VDI-Buch



Christian Brecher
Manfred Weck

Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3

Mechatronische Systeme, Steuerungstechnik und Automatisierung

9. Auflage

VDI

Springer Vieweg

Christian Brecher · Manfred Weck

Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3

Mechatronische Systeme, Steuerungstechnik und Automatisierung

9. Auflage

Springer Vieweg

Christian Brecher
Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

Manfred Weck
Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen
Aachen, Deutschland

ISBN 978-3-662-46568-4 ISBN 978-3-662-46569-1 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Ursprünglich erschienen unter Weck, M., Werkzeugmaschinen 3 und 4
© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1995, 2001, 2006, 2021
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zum Kompendium Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme

Werkzeugmaschinen zählen zu den bedeutendsten Produktionsmitteln der metallverarbeitenden Industrie. Ohne die Entwicklung dieser Maschinengattung wäre der heutige hohe Lebensstandard der Industrienationen nicht denkbar. Die Bundesrepublik Deutschland nimmt bei der Werkzeugmaschinenproduktion eine führende Stellung in der Welt ein. Innerhalb der Bundesrepublik Deutschland entfallen auf den Werkzeugmaschinenbau etwa 7,5 % des Produktionsvolumens des gesamten Maschinenbaus und 7,0 % der Beschäftigten des Maschinenbaus sind im Werkzeugmaschinenbau tätig (VDW, Stand 2017).

So vielfältig wie das Einsatzgebiet von Werkzeugmaschinen sind auch ihre konstruktive Gestalt und ihr Automatisierungsgrad. Entsprechend den technologischen Verfahren reicht das weitgespannte Feld von den urformenden und umformenden über die trennenden Werkzeugmaschinen (wie spanende und abtragende Werkzeugmaschinen) bis hin zu den Fügemaschinen. In Abhängigkeit von den zu bearbeitenden Werkstücken und Losgrößen haben diese Maschinen einen unterschiedlichen Automatisierungsgrad mit einer mehr oder weniger hohen Flexibilität. So werden Einzweck- und Sonderwerkzeugmaschinen ebenso wie Universalmaschinen mit umfangreichen Einsatzmöglichkeiten auf dem Markt angeboten.

Aufgrund der gestiegenen Leistungs- und Genauigkeitsanforderungen hat der Konstrukteur dieser Maschinen eine optimale Auslegung der einzelnen Maschinenkomponenten sicherzustellen. Hierzu benötigt er umfassende Kenntnisse über die Zusammenhänge der physikalischen Eigenschaften der Bauteile und der Maschinenelemente. Eine umfangreiche Programmbibliothek versetzt den Konstrukteur heute in die Lage, die Auslegungen rechnerunterstützt vorzunehmen. Messtechnische Analysen und objektive Beurteilungsverfahren eröffnen die Möglichkeit, die leistungs- und genauigkeitsbestimmenden Kriterien, wie die geometrischen, kinematischen, statischen, dynamischen, thermischen und akustischen Eigenschaften der Maschine zu erfassen und nötige Verbesserungen gezielt einzuleiten.

Die stetige Tendenz zur Automatisierung der Werkzeugmaschinen hat zu einem breiten Fächer von Steuerungsalternativen geführt. In den letzten Jahren nahm die Entwicklung der Elektrotechnik/Elektronik sowie der Softwaretechnologie entscheidenden Einfluss auf die Maschinensteuerungen. Mikroprozessoren und Prozessrechner ermöglichen steuerungstechnische Lösungen, die vorher nicht denkbar waren. Die Mechanisierungs- und Automatisierungsbestrebungen beziehen auch den Materialtransport und die Maschinenbeschickung mit ein. Die Überlegungen auf diesem Gebiet führten in der Massenproduktion zu Transferstraßen und in der Klein- und Mittelserienfertigung zu flexiblen Fertigungszellen und -systemen.

Die in dieser Buchreihe erschienenen drei Bände zum Thema „Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme“ richten sich sowohl an die Studierenden der Fachrichtung „Produktionstechnik“ als auch an alle Fachleute aus der Praxis, die sich in die immer komplexer werdende Materie dieses Maschinenbauzweiges einarbeiten müssen. Außerdem verfolgen diese Bände das Ziel, dem Anwender bei der Auswahl der geeigneten Maschinen einschließlich der Steuerungen zu helfen. Dem Maschinenhersteller werden Wege für eine optimale Auslegung der Maschinenbauteile, der Antriebe und der Steuerungen sowie Möglichkeiten zur gezielten Verbesserung aufgrund messtechnischer Analysen und objektiver Beurteilungsverfahren aufgezeigt.

Der Inhalt des Gesamtwerkes lehnt sich eng an die Vorlesung „Werkzeugmaschinen“ an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen an und ist wie folgt gegliedert:

Band l: Werkzeugmaschinen – Maschinenarten und Anwendungsbereiche,
Band 2: Werkzeugmaschinen – Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung,
Band 3: Werkzeugmaschinen – Mechatronische Systeme, Steuerungstechnik und Automatisierung.

Christian Brecher
Aachen, im September 2015

Vorwort zum Band 3

Der vorliegende Band 3 soll dem Leser einen Einblick in die Steuerungs- und Automatisierungstechnik von Werkzeugmaschinen geben. Der Schwerpunkt liegt sowohl in der Darstellung von Lösungen, die sich seit langem in der Praxis bewährt haben, als auch in der Vorstellung neuester Entwicklungen.

Der erste Teil dieses Bandes beschäftigt sich mit den mechatronischen Komponenten zur Erzeugung hochdynamischer Antriebsbewegungen der Werkzeugmaschinen, wobei ihre mechanische und regelungstechnische Auslegung im Vordergrund steht. Bei komplexen und hochautomatisierten Maschinen wird die Diagnose von Maschinen- und Prozesszuständen zunehmend bedeutsamer. Messtechnische Signalerfassung, -verarbeitung und -interpretation werden detailliert für viele praktische Anwendungen dargestellt.

Der zweite Teil dieses Bandes betrachtet insbesondere die verschiedenen Arten von Steuerungen für Werkzeugmaschinen. Außerdem werden in diesem Teil die in der Peripherie eingesetzten Roboter sowie die zugehörigen Robotersteuerungen behandelt. Abgerundet wird die Betrachtung des Gesamtsystems durch eine Einführung in die übergeordneten Leitsysteme sowie eine Zusammenfassung des Themas Engineering.

Der Inhalt dieses Bandes gliedert sich im Einzelnen wie folgt:

Nach einer kurzen Einleitung (*Kapitel 1*), welche grundlegende Begriffe der Mechatronik und Steuerungstechnik einführt und die historische Entwicklung der Automatisierung umreißt, wird in *Kapitel 2* der prinzipielle Aufbau einer Vorschubachse erklärt. Bevor die mechanischen Übertragungselemente detailliert beschrieben werden, wird zunächst eine Einführung in die elektronische Umrichtertechnik gegeben. Außerdem werden die Anforderungen an Motoren als Antrieb für Vorschubachsen erörtert und verschiedene Motortypen vorgestellt. Die zur Regelung der Vorschubantriebe benötigten Positionsmesssysteme werden dem Leser in diesem Kapitel ebenfalls erläutert.

Die Exaktheit der Fertigung ist stark von dem dynamischen Verhalten der Vorschubachse abhängig, welches im folgenden *Kapitel 3* näher betrachtet wird. Nachdem regelungstechnische Grundlagen erklärt werden, folgt die Vorstellung verschiedener Verfahren zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens einer Vorschubachse. Außerdem wird der gesamte Lageregelkreis einer Vorschubachse näher betrachtet: Neben den wichtigsten Kenngrößen wird auch das Übertragungsverhalten der mechanischen Komponenten beschrieben.

Im Anschluss wird die Steuerung der Vorschubantriebe in *Kapitel 4* behandelt. Im ersten Teil wird der generelle Aufbau von Bahnsteuerungen beschrieben. Moderne Steuerungen werden durch Computer realisiert, die in verschiedenen Modulen die Interpolation und Lageregelung durchführen und dem Werker eine geeignete Bedienschnittstelle zur Verfügung stellen. Im Anschluss werden dem Leser typische Bahnfehler und deren Zustandekommen näher gebracht, bevor Maßnahmen zu deren Reduzierung erläutert werden.

In *Kapitel 5* kann der Leser sich über die Auslegung von Vorschubantrieben informieren. Nach der Vorstellung verschiedener Antriebskonzepte wird das Vorgehen zur Auslegung eines Vorschubantriebes beschrieben und die Anforderungen an die einzelnen Komponenten werden genauer erläutert. Im Anschluss an die mechanische Auslegung wird kurz auf die Spezifikation eines geeigneten Messsystems eingegangen, bevor abschließend die notwendigen Schritte zur manuellen und automatischen Inbetriebnahme eines Vorschubantriebes detailliert beschrieben werden.

Durch die hohe Belastung wichtiger Komponenten wie Hauptspindeln, Vorschubantriebe und Werkzeuge ist eine Maschinen- und Prozessdiagnose von großer Bedeutung. Dies wird

dadurch verstärkt, dass die Anlagen vielfach ohne oder nur mit geringer Aufsicht durch den Maschinenbediener gefahren werden. *Kapitel 6* befasst sich daher sehr umfassend mit dieser Thematik. Da in fast allen Fällen die eigentlichen Kennwerte (Abnutzung, Verschleiß usw.) messtechnisch nicht direkt erfasst werden können, werden indirekte Verfahren angewandt. Hierbei werden die Auswirkungen (Kräfte, Schwingungen, Temperatur) gemessen und über Modelle auf die interessanten Kenngrößen zurückgeführt. Neben einer sorgfältigen und sicheren Messwerterfassung spielt die Auswertung und richtige Interpretation der Messdaten eine große Rolle. Zahlreiche praktische Beispiele für die wichtigsten Maschinenkomponenten und Fertigungsverfahren werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Kapitel 7 leitet in den zweiten Teil dieses Bandes ein. Neben einer Definition des Begriffs Automatisierung folgt eine kurze Beschreibung der historischen Entwicklung der Automatisierung von Werkzeugmaschinen. Neben einer Einführung in Funktionsabläufe, wie sie zur Steuerung eingesetzt werden, folgen einige praktische Beispiele für automatisierte Funktionen im Umfeld einer Werkzeugmaschine.

Es folgt in *Kapitel 8* die Beschreibung der mechanischen Steuerungen als älteste Gattung der Steuerungstechnik. Wenn sie auch im Zeitalter der Elektronik und Informatik stark an Bedeutung verloren haben, so sind dennoch viele Exemplare der mechanischen Automaten in den Werkstätten zu finden.

Die Grundlagen der Informationsverarbeitung werden im Anschluss behandelt. Das *Kapitel 9* bildet die Basis für die elektrischen Steuerungen, die in *Kapitel 10* erörtert werden. Neben verbindungsprogrammierten (VPS) werden speicherprogrammierte Steuerungen (SPS, PLC) vorgestellt und ihre Wirkungsweise anhand von Beispielen verdeutlicht. Im Werkzeugmaschinenbau haben die speicherprogrammierbaren Steuerungen eine besondere Bedeutung erlangt, weshalb nicht nur die unterschiedlichen Programmierverfahren ausführlich dargestellt werden, sondern auch die prinzipielle Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung von komplexen SPS-Programmen geschildert wird.

Numerische Steuerungen (NC) haben eine zentrale Bedeutung für die Automatisierung von Werkzeugmaschinen erlangt. In *Kapitel 11* werden der interne Aufbau, der Funktionsumfang, die Programmierung bzw. die diversen Programmierverfahren und die Bedienung von Numerischen Steuerungen sowie Entwicklungstendenzen ausführlich erörtert.

Daran anschließend wird in einem gesonderten *Kapitel 12* die geometrische Datenverbindung in den NC-Steuerungen behandelt. Hierzu zählen verschiedene Verfahren zur Interpolation, Bewegungsführung und Werkzeugkorrekturen. Die NC-interne Behandlung des Vorschub-Overrides und der externen Geschwindigkeitsbeeinflussung werden am Ende dieses Kapitels gesondert erklärt.

Numerisch gesteuerte Handhabungssysteme und Industrieroboter sind heute vielfach Bestandteil von autonomen Fertigungs- und Montagezellen sowie flexiblen Fertigungssystemen. Sie werden in vielfältigen Aufgabenbereichen eingesetzt, unter anderem zur Maschinenbeschickung und zum Werkstücktransport. Des Weiteren werden sie oft für Schweiß- und Schneidaufgaben eingesetzt. *Kapitel 13* behandelt daher intensiv die Robotersteuerungen. Diverse Roboterkinematiken, Koordinatentransformationen und Programmiermöglichkeiten bilden die Schwerpunkte dieses Kapitels.

Der Trend zur durchgehenden Integration und Vernetzung aller Unternehmensbereiche zu integrierten Informations- und Datenverarbeitungssystemen greift immer weiter um sich. Diese als „CIM“ (Computer Integrated Manufacturing) bezeichnete bereichsübergreifende computerunterstützte Informationsverarbeitung in Produktionsanlagen verbindet alle Automatisierungsgeräte und Computer mit dem Ziel der Rationalisierung der Informations-Verarbeitungsvorgänge. In *Kapitel 14* wird ein Modell für die CIM-Struktur eines Unternehmens vorgestellt. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Leitstandsysteme zur Steuerung verketteter Anlagen.

Die fortschreitende Automatisierung und das Zusammenwachsen der informationstechnischen Systeme innerhalb eines Unternehmens stellen besondere Anforderungen an die Entwicklungsprozesse einer Anlage. Prozesse müssen zuverlässig und beherrschbar gestaltet werden, neue Funktionen sollen integriert werden und sicherheitsrelevante Aspekte müssen berücksichtigt werden. In *Kapitel 15* wird daher das Engineering automatisierungstechnischer Systeme betrachtet. Methodik, Architekturmodellierung, Systems Engineering, Design, Auslegung, Implementierung und Test sind die wesentlichen Aufgaben im Engineering, die dem Leser in Bezug auf Softwareentwicklung und Elektrokonstruktion erläutert werden.

Die Überarbeitung dieser neunten Auflage geschah unter Mitwirkung meiner wissenschaftlichen Mitarbeiter. Allen Beteiligten möchte ich für ihre große Einsatzbereitschaft sehr herzlich danken. Für die Koordination und Organisation der grundlegenden Überarbeitung zur neunten Auflage möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Christian Ecker und Herrn Christian Fimmers, M.Sc. besonders danken.

Den Firmen, die das Bildmaterial für diesen Band zur Verfügung gestellt haben, möchte ich ebenso herzlich danken.

Christian Brecher
Aachen, im Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung ... 1

1.1 Das mechatronische System Werkzeugmaschine ... 4

1.2 Engineering ... 5

1.3 Aktuelle Entwicklungen ... 6

Abkürzungsverzeichnis ... 7

Literaturverzeichnis ... 7

2 Vorschubachsen in Werkzeugmaschinen ... 9

2.1 Umrichter für WZM-Vorschubachsen ... 13

2.1.1 Aufbau von Umrichtersystemen ... 13

2.1.2 Regelungselemente in Umrichtern ... 14

2.1.2.1 Analoge Regelung ... 16

2.1.2.2 Digitale Regelung ... 16

2.1.2.3 Zusätzliche Funktionen digitaler Antriebsregler ... 17

2.1.3 Schnittstellen zur Steuerung ... 18

2.1.3.1 Analoge Schnittstelle ... 19

2.1.3.2 Digitale Schnittstelle ... 19

2.2 Motoren in Vorschubachsen ... 24

2.2.1 Anforderungen an die Antriebseinheiten ... 24

2.2.2 Gleichstrommotoren ... 27

2.2.3 Synchronmotoren ... 32

2.2.4 Asynchronmotoren ... 37

2.2.5 Auslegung und Berechnung elektrischer Antriebe ... 44

2.2.5.1 Hochlauf ohne Strombegrenzung ... 45

2.2.5.2 Hochlauf mit Strombegrenzung ... 46

2.2.5.3 Numerische Ermittlung des Hochlaufs bei nichtlinearen und unstetigen Kennlinien ... 48

2.2.5.4 Auswahl von Motoren nach statischen Gesichtspunkten ... 49

2.2.6 Bauarten basierend auf Gleichstrom- und Drehstromservoantriebe ... 50

2.2.6.1 Schrittmotoren ... 51

2.2.6.2 Linearmotoren ... 53

2.2.7 Strom- und Leistungsmessung an Elektromotoren ... 57

2.3 Positionsmesssysteme für NC-Maschinen ... 59

2.3.1 Grundlagen der Weg- und Winkelmessung ... 59

2.3.1.1 Grundbegriffe ... 59

2.3.1.2 Messprinzipien und Messverfahren ... 59

2.3.2 Messsysteme ... 62

2.3.2.1 Photoelektrische Messverfahren ... 62

2.3.2.2 Interferometer ... 72

2.3.2.3 Elektromagnetische Aufnehmer ... 72
2.3.2.4 Magnetische Aufnehmer ... 75
2.3.3 Interpolationsverfahren und Richtungserkennung ... 79
2.3.3.1 Interpolation mit Hilfsphasen ... 80
2.3.3.2 Digitale Interpolation ... 81
2.3.3.3 Amplitudenauswertung ... 82
2.3.3.4 Richtungserkennung ... 82
2.3.4 Messgeräte – Auswahl und Einbau ... 82
2.3.4.1 Auswahl des Messgeräts ... 83
2.3.4.2 Anbauort in der Anlage und Maschine ... 84
2.3.4.3 Montagehinweise ... 84
2.3.4.4 Elektrischer Anschluss ... 86
2.4 Mechanische Übertragungselemente ... 86
2.4.1 Komponenten zur Wandlung von Rotationsbewegung in Translationsbewegung ... 86
2.4.1.1 Gewindespindel-Mutter-Antrieb ... 87
2.4.1.2 Ritzel-Zahnstange-Antrieb ... 92
2.4.1.3 Schnecke-Zahnstange-Antrieb ... 94
2.4.1.4 Zahnriemen-Antriebe ... 94
2.4.1.5 Kettenantrieb ... 95
2.4.2 Vorschubgetriebe ... 97
2.4.2.1 Zahnradgetriebe ... 97
2.4.2.2 Zahnriementriebe ... 98
2.4.2.3 Sondervorschubgetriebe ... 99
2.4.3 Kupplungen ... 105
2.4.3.1 Ausgleichskupplungen ... 105
Abkürzungsverzeichnis ... 109
Formelzeichenverzeichnis ... 109
Literaturverzeichnis ... 112

3 Dynamisches Verhalten von Vorschubachsen ... 113
3.1 Regelungstechnische Grundlagen ... 116
3.1.1 Lineare zeitkontinuierliche Übertragungssysteme ... 118
3.1.1.1 Zeitverhalten von Regelkreisgliedern ... 118
3.1.1.2 Grundsysteme von Regelkreisgliedern und ihre Darstellung ... 121
3.1.1.3 Aufbau eines Regelkreises ... 122
3.1.1.4 Wirkungsplan (Blockschaltbild) ... 123
3.1.1.5 Stabilität von Regelkreisen ... 123
3.1.1.6 Einstellregeln für analog arbeitende Regler ... 125
3.1.2 Lineare zeitdiskrete Übertragungssysteme ... 126
3.1.2.1 Darstellung zeitdiskreter Systeme ... 127
3.1.2.2 z-Transformation ... 127
3.1.2.3 Lineare Differenzengleichungen ... 128
3.1.2.4 Einstellregeln für zeitdiskret arbeitende Regler ... 129
3.1.2.5 z-Übertragungsfunktion ... 130

3.1.3 Feedforward-Controller zur Schleppfehlerkorrektur 131
3.1.4 Zustandsregelung 132
3.1.4.1 Darstellung im Zustandsraum 133
3.1.4.2 Entwurf des Zustandsreglers 134
3.2 Regelung von Vorschubantrieben 136
3.2.1 Vorschubantrieb als Regelkreis 136
3.2.1.1 Aufbau und Wirkungsweise der Lageregelung 136
3.2.2 Berechnung von zeitkontinuierlichen Lageregelkreisen 137
3.2.3 Übertragungsverhalten des linearen Lageregelkreises 137
3.2.4 Simulation von Vorschubantrieben 140
3.3. Übertragungsverhalten der Mechanik 142
3.3.1 Physikalische Grenzen des mechanischen und elektrischen Systems 143
3.3.2 Übertragungsverhalten elektromechanischer Antriebssysteme 144
3.3.2.1 Kinematisches Übertragungsverhalten 144
3.3.2.2 Statisches Übertragungsverhalten 144
3.3.2.3 Dynamisches Übertragungsverhalten 145
3.3.3 Übertragungsverhalten linearer Direktantriebe 147
3.4 Einflüsse des Messsystems auf die Vorschubregelung 149
3.4.1 Verhalten von elektromechanischen Achsen bei Regelung über indirektes und direktes Messsystem 149
3.4.2 Einfluss des Messsystems bei linearen Direktantrieben 151
3.4.3 Verbesserung der Vorschubregelung durch Verwendung eines Ferraris-Sensors 151
3.4.4 Kleinste verfahrbare Schrittweite 153
3.5 Statische und dynamische Steifigkeit von Vorschubachsen 154
3.5.1 Statische Steifigkeit 155
3.5.1.1 Statische Steifigkeit elektromechanischer Antriebe (Gewindespindelantrieb) 155
3.5.1.2 Statische Steifigkeit beim elektrischen Lineardirektantrieb 156
3.5.2 Dynamische Steifigkeit 156
3.5.2.1 Dynamische Steifigkeit elektromechanischer Vorschubachsen 157
3.5.2.2 Elektrischer Lineardirektantrieb 158
Abkürzungsverzeichnis 161
Formelzeichenverzeichnis 161
Literaturverzeichnis 163

4 Vorschubantriebe zur Bahnerzeugung 165
4.1 Aufbau von Bahnsteuerungen 168
4.2 Bahnfehler an Werkzeugmaschinen 168
4.2.1 Bahnfehler im Interpolator 168
4.2.2 Typische Bahnfehler der Lageregelung 169
4.2.3 Auswirkungen der mechanischen Übertragungselemente 170

4.2.4 Bestimmung der dynamischen Bahnabweichungen ... 171
4.2.4.1 Eckenverrundung ... 171
4.2.4.2 Kreisform- und Durchmesserabweichung ... 172
4.2.5 Einfluss des K_V-Faktors auf die Bahnabweichungen ... 173
4.3 Maßnahmen zur Verringerung der Bahnabweichungen ... 175
Abkürzungsverzeichnis ... 176
Formelzeichenverzeichnis ... 176
Literaturverzeichnis ... 176

5 Auslegung von Vorschubantrieben ... 177
5.1 Auslegung des Motors und der mechanischen Komponenten ... 180
5.1.1 Bestimmung der Anforderungen und Wahl des Antriebsprinzips ... 181
5.2.2 Wahl und Auslegung der mechanischen Komponenten ... 181
5.1.3 Auswahl und Auslegung des Antriebsmotors ... 183
5.1.3.1 Auslegung nach stationären Größen ... 184
5.1.3.2 Dynamische Auslegung ... 184
5.1.3.3 Optimales Übersetzungsverhältnis ... 185
5.2 Auslegung des Messsystems ... 186
5.3 Inbetriebnahme der Regelung ... 186
5.3.1 Manuelle Inbetriebnahme ... 187
5.3.1.1 Einstellung des Drehzahlreglers ... 187
5.3.1.2 Einstellung des Lagereglers ... 189
5.3.2 Automatische Inbetriebnahme ... 190
Abkürzungsverzeichnis ... 190
Formelzeichenverzeichnis ... 190
Literaturverzeichnis ... 191

6 Prozessüberwachung ... 193
6.1 Einführung ... 196
6.1.1 Hintergrund, Begriffe und Ziele ... 196
6.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung von Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Instandhaltungsmaßnahmen ... 199
6.1.3 Einflussgrößen auf die Funktion der Fertigungsmittel und die Qualität der Produkte ... 199
6.1.4 Strategien und Struktur von Überwachungssystemen ... 200
6.1.4.1 Strategien für Überwachungssysteme ... 200
6.1.4.2 Die Struktur von Überwachungssystemen ... 201
6.1.4.3 Zusammenhang und Abgrenzung zwischen Prozessüberwachung und Maschinendiagnose ... 202
6.1.4.4 Mechanische und optische Sensoren ... 203
6.1.4.5 Steuerungsinterne Informationen ... 203
6.1.5 Prinzipien der Prozessregelung ... 205

6.2 Signalverarbeitung und Mustererkennung ... 206
6.2.1 Analoge Signalaufbereitung ... 208
6.2.2 Digitale Vorverarbeitung ... 211
6.2.3 Merkmalsextraktion ... 211
6.2.4 Klassifikation ... 212
6.2.4.1 Feste Grenzen ... 213
6.2.4.2 Mitlaufende Schwellen ... 213
6.2.4.3 Mehrdimensionale Klassifikation ... 213

6.3 Technologische Prozessüberwachung und Prozessregelung bei verschiedenen Fertigungsverfahren ... 216
6.3.1 Drehbearbeitung ... 216
6.3.1.1 Sensorsysteme zur Drehmoment- und Zerspankraftmessung ... 216
6.3.1.2 Kraft-, Drehmoment- und Leistungsregelung bei der Drehbearbeitung ... 218
6.3.1.3 Automatische Schnittaufteilung für das Drehen ... 221
6.3.1.4 Prozessüberwachung beim Drehen ... 223
6.3.2 Fräsbearbeitung ... 226
6.3.2.1 Sensorsysteme und Verfahren zur Prozessüberwachung beim Fräsen ... 226
6.3.2.2 Prozessüberwachung für die Fräsbearbeitung ... 229
6.3.2.3 Prozessregelung für die Fräsbearbeitung ... 233
6.3.2.4 Prozessregelung beim Gussputzen ... 237
6.3.2.5 Automatische Ratterbeseitigung ... 238
6.3.3 Bohren ... 244
6.3.3.1 Prozessüberwachung beim Bohren und Tiefbohren ... 244
6.3.3.2 Prozessregelung für das Tiefbohren ... 248
6.3.4 Schleifen ... 249
6.3.4.1 Prozessregelung ... 249
6.3.4.2 Abrichtüberwachung ... 251
6.3.5 Funkenerosive Bearbeitung ... 252
6.3.6 Kollisionsüberwachung ... 256

6.4 Statistische Prozessregelung ... 259

6.5 Maschinenzustandsüberwachung ... 260
6.5.1 Verfahren der Instandhaltung und Wartung ... 260
6.5.1.1 Reaktive Instandhaltung ... 261
6.5.1.2 Zeitabhängige (präventive) Instandhaltung ... 261
6.5.1.3 Zustandsorientierte Instandhaltung ... 263
6.5.2 Maschinenzustandsüberwachung ... 264
6.5.2.1 Kennwerte ... 264
6.5.2.2 Sensorische Zustandserfassung ... 265
6.5.3 Messwertanalyse ... 268
6.5.3.1 Konventionelle Diagnosefunktionen ... 268
6.5.3.2 Anwendungsbeispiele ... 273

Abkürzungsverzeichnis ... 276
Formelzeichenverzeichnis ... 277
Literaturverzeichnis ... 279

7 Automatisierung von Maschinen und Anlagen ... 281
7.1 Begriffsbestimmung ... 284
7.2 Geschichtliche Entwicklung und Gründe für die Automatisierung von Werkzeugmaschinen ... 284
7.3 Steuerungs- und Automatisierungstechnik als Teilaufgabe der Maschinenentwicklung ... 285
7.4 Steuerung von Funktionsabläufen ... 287
7.4.1 Automatisierbare Funktionen der Fertigungseinrichtungen ... 287
7.4.2 Funktionsfolgen ... 288
7.4.3 Elemente der Steuerung, Programmierung und Speicherung ... 289
7.5 Beispiele automatisierter Funktionen ... 290
7.5.1 Weg- und Schaltinformationen ... 290
7.5.1.1 Lineare Wegaufnehmer ... 290
7.5.1.2 Nocken- und Schalterleisten ... 291
7.5.1.3 Absolute und inkrementale Drehgeber zur Erfassung der Istposition einer Maschinenbaugruppe und zur Drehzahlregelung ... 292
7.5.2 Werkstücktransport und -handhabung ... 292
7.5.3 Werkzeughandhabung und -speicherung ... 295
7.5.4 Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Sicherheit ... 298
7.5.5 Leittechnik ... 298
7.5.6 Entsorgung ... 298
Abkürzungsverzeichnis ... 299
Literaturverzeichnis ... 299

8 Mechanische Steuerungen ... 301
8.1 Einspindeldrehautomat ... 305
8.2 Mehrspindeldrehautomat ... 312
8.3 Weiterentwicklung des mechanisch gesteuerten Mehrspindlers ... 321
8.4 Elektronische Königswelle ... 322
8.4.1 Funktionsweise ... 323
8.4.2 Anwendung ... 325
Abkürzungsverzeichnis ... 325
Formelzeichenverzeichnis ... 325
Literaturverzeichnis ... 326

9 Grundlagen der Informationsverarbeitung ... 327

9.1 Grundlagen ... 330
9.1.1 Zahlensysteme ... 330
9.1.2 Datencodes ... 332
9.1.3 Boole'sche Algebra ... 334
9.1.4 Karnaugh-Veitch-Diagramm ... 337

9.2 Bausteine ... 339
9.2.1 Realisierung der Grundfunktionen ... 339
9.2.2 Erweiterte Funktionen ... 342
9.2.2.1 Flip-Flop ... 342
9.2.2.3 Flankengetriggerte Flip-Flops ... 343
9.2.2.4 Binärzähler ... 343
9.2.2.5 Halbaddierer ... 344
9.2.2.6 Volladdierer und Addierwerke ... 344
9.2.2.7 Vergleicher ... 347
9.2.2.8 Decodierer ... 347
9.2.2.9 Parityprüfer ... 347
9.2.2.10 A/D-Wandler ... 348
9.2.2.11 D/A-Wandler ... 351
9.2.3 Integrierte Schaltkreise ... 352
9.2.4 Bedien- und Anzeigeelemente ... 354
9.2.5 Rechner ... 354

9.3 Kommunikation in der Automatisierungstechnik ... 356
9.3.1 Anforderungen an die Kommunikationstechnik ... 356
9.3.2 OSI-Referenzmodell ... 357
9.3.3 Busarchitekturen und -zugriffsverfahren ... 359
9.3.4 Bus-Systeme ... 360
9.3.5 Industrial Ethernet ... 361
9.3.6 Wireless Communication ... 362
9.3.7 Near Field Communication ... 363
9.3.8 Middleware-Protokolle ... 364

Abkürzungsverzeichnis ... 365

Literaturverzeichnis ... 365

10 Elektrische Steuerung ... 367

10.1 Aufbau und Einordnung von elektrischen Steuerungen ... 370
10.1.1 Verknüpfungssteuerungen ... 372
10.1.2 Ablaufsteuerungen ... 372

10.2 Verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS) ... 374
10.2.1 Anwendungsgebiete und Aufgaben ... 374
10.2.2 Anwendungsbeispiele ... 374

10.3 Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) ... 376
10.3.1 Anwendungsgebiete und Aufgaben ... 376

10.3.2 Aufbau und Funktionsweise ... 379
10.3.2.1 Aufbau ... 379
10.3.2.2 Funktionsweise ... 381
10.3.3 SPS-Programmierung ... 383
10.3.3.1 Kontaktplan-Programmierung ... 384
10.3.3.2 Funktionsplan-Programmierung ... 385
10.3.3.3 Programmierung mit Anweisungsliste ... 386
10.3.3.4 Beispiele für komplexere Programmanweisungen ... 386
10.3.3.5 Strukturierter Text (Hochsprachen-Programmierung) ... 390
10.3.3.6 Ablaufsprache ... 391
10.3.4 Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung von komplexen SPS-Programmen ... 392
10.3.4.1 Spezifikation der Steuerungsaufgabe ... 392
10.3.4.2 Programmentwurf und Programmierung ... 393
10.3.4.3 Programmtest ... 394
10.4 Sicherheitssteuerungen ... 396
10.4.1 Maschinenrichtlinie ... 397
10.4.2 Performance Levels ... 398
10.4.3 Zweikanalige, fehlererkennende Steuerungsstruktur ... 398
10.4.4 Dreikanalige, fehlertolerante Steuerungsstruktur ... 399
10.4.5 Konventionelle Sicherheitsschaltung in Relaistechnik ... 399
10.4.6 Fehlersichere Prozessankopplung ... 401
10.4.6.1 Sichere Auswertung von Prozesseingängen ... 401
10.4.6.2 Fehlersichere und fehlertolerante Prozessausgänge ... 403
10.5 Motion Control ... 404
10.5.1 Grundlagen und Anwendung ... 404
10.5.2 Aufbau und Funktionsweise von MC-Systemen ... 405
10.5.2.1 Systemarchitektur von MC-Systemen ... 405
10.5.2.2 Feldbussysteme für Motion Control ... 405
10.5.3 Programmierung ... 407
10.5.3.1 Projektierung von Motion-Control-Systemen ... 408
Abkürzungsverzeichnis ... 408
Literaturverzeichnis ... 409

11 Numerische Steuerung ... 411
11.1 Geschichtliche Entwicklung numerischer Steuerungen ... 414
11.2 Aufbau und Funktionsbeschreibung numerischer Steuerungen ... 415
11.2.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung ... 415
11.2.2 Hardware und Schnittstellen einer NC-Steuerung ... 417
11.2.2.1 Interner Aufbau ... 419
11.2.2.2 Externe Schnittstellen ... 421
11.2.3 Software einer NC-Steuerung ... 422

11.2.4 Funktionsweise einer NC-Steuerung ... 423
11.2.4.1 NC-Interpreter ... 423
11.2.4.2 Geometriedatenverarbeitung ... 424
11.2.4.3 Interpolation ... 425
11.2.4.4 Achsregelung ... 425
11.2.5 Funktionsumfang moderner NC-Steuerungen ... 425
11.2.5.1 Standard-Funktionen ... 425
11.2.5.2 Funktionen zur Steuerung automatisierter Produktionszellen ... 430
11.2.6 Offenheit von Steuerungssystemen ... 431
11.2.6.1 Motivation und Ziele offener Steuerungssysteme ... 433
11.2.6.2 Ausprägungen offener Steuerungssysteme ... 433
11.2.6.3 Realisierung offener Steuerungen ... 433
11.2.6.4 Herstellerübergreifende Standards für offene Steuerungen ... 438
11.3 Werkstückprogrammierung in der NC-Fertigung ... 438
11.3.1 Aufbau eines satzbasierten NC-Programms ... 439
11.3.2 Aufbau eines objektorientierten NC-Programms ... 441
11.3.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte ... 442
11.3.3.1 Maschinen-Nullpunkt *M* ... 444
11.3.3.2 Referenzpunkt *R* ... 444
11.3.3.3 Werkstücknullpunkt ... 444
11.3.3.4 Werkzeugbezugspunkt *E* ... 444
11.3.3.5 Werkzeugaufnahme-N und Schlittenbezugspunkt ... 444
11.3.3.6 Startpunkt ... 444
11.3.3.7 Werkzeuggeometrie ... 444
11.4 NC-Programmierverfahren ... 445
11.4.1 Manuelle NC-Programmierverfahren ... 446
11.4.1.1 Grundlagen und Vorgehensweise ... 446
11.4.1.2 Programmierbeispiel (DIN 66025) ... 449
11.4.1.3 Zusätzliche Befehle zur Programmeingabe ... 450
11.4.2 Maschinelle NC-Programmierverfahren ... 455
11.4.2.1 CAD/CAP/CAM-Kopplung ... 458
11.4.2.2 Programmierbeispiel anhand des EXAPT-Systems ... 471
11.4.2.3 Programmierbeispiel für ein objektorientiertes NC-Programm (STEP-NC) ... 477
11.4.2.4 Werkstattorientierte NC-Programmierung ... 477
11.4.2.5 Werkstattnahe Programmierung mit manueller Prozessführung ... 480
11.4.2.6 Kostenvergleich der Programmierverfahren ... 482
11.4.3 Digitalisierung von Werkstückgeometrien zur NC-Datengenerierung ... 484
11.4.3.1 Messgeräte zur Digitalisierung von Werkstücken ... 485
11.4.3.2 Abtaststrategien ... 487
11.4.3.3 Tastsysteme ... 488
11.4.3.4 Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Messdaten ... 493

11.5 Benutzerschnittstellen an Werkzeugmaschinen ... 497
11.5.1 Bedienfelder an Werkzeugmaschinen ... 497
11.5.2 Manuelle Prozessführung ... 499
11.5.2.1 Allgemeine Übersicht ... 499
11.5.2.2 Bedienelemente zur Prozessführung ... 499
11.5.2.3 Möglichkeiten für die Realisierung einer benutzerorientierten Prozessführung ... 500
11.5.2.4 Entwicklungstendenzen ... 503
11.5.3 Benutzerorientierte Darstellung prozess- und systembezogener Kenngrößen ... 504
11.5.3.1 Ausgangssituation ... 504
11.5.3.2 Benutzergerechte Vermittlung der Kenngrößen ... 504
11.5.3.3 Technische Realisierung und Anwendungsbeispiele ... 506
Abkürzungsverzeichnis ... 508
Formelzeichenverzeichnis ... 508
Literaturverzeichnis ... 509

12 Führungsgrößenerzeugung und Interpolation ... 511
12.1 Interpolation ... 515
12.1.1 Funktionen zur satzorientierten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen ... 516
12.1.1.1 Beschleunigungs- und Verzögerungsphase ... 518
12.1.1.2 Konstantgeschwindigkeitsphase ... 521
12.1.1.3 Bremseinsatzpunkterkennung ... 521
12.1.2 Funktionen zur satzübergreifenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen ... 522
12.1.2.1 Satzübergänge ... 522
12.1.2.2 Vorausschauende Geschwindigkeitsführung ... 524
12.1.3 Interpolation einfacher Bahnen ... 526
12.1.3.1 Geradeninterpolation ... 526
12.1.3.2 Kreisinterpolation ... 527
12.1.4 Spline-Interpolation ... 528
12.1.4.1 Polynomsplines ... 529
12.1.4.2 B-Splines ... 533
12.1.4.3 NURBS ... 536
12.1.4.4 Auswertung von Splines ... 536
12.1.5 Sonstige Verfahren ... 538
12.2 Geometrische Transformationen ... 538
12.2.1 Nullpunktverschiebungen ... 538
12.2.2 Werkzeugkorrekturen ... 539
12.2.3 Kinematische Transformation für die Fünf-Achs-Fräsbearbeitung ... 540
12.2.3.1 Serielle Kinematiken ... 542
12.2.3.2 Parallele Kinematiken ... 542

12.3 Externe Lage- und Geschwindigkeitsbeeinflussung ... 545
12.3.1 Kompensation geometrischer Fehler ... 545
12.3.1.1 Kompensation geometrischer Fehler von Vorschubantrieben ... 545
12.3.1.2 Kompensation thermischer Verlagerungen ... 546
12.3.1.3 Kompensation statischer Prozesslasten ... 550
12.3.1.4 Messregelung für Schleifprozesse ... 553
12.3.2 Vorschub-Override und externe Geschwindigkeitsbeeinflussung ... 554
12.3.2.1 Override ... 554
12.3.2.2 Externe Geschwindigkeitsbeeinflussung ... 555
12.3.2.3 Look-Ahead-Funktion ... 555
12.3.3 Referenzpunktfahrt ... 555
Abkürzungsverzeichnis ... 556
Formelzeichenverzeichnis ... 556
Literaturverzeichnis ... 558

13 Roboter und Robotersteuerung ... 559
13.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung ... 563
13.2 Roboterkinematiken und Einlegegeräte ... 564
13.2.1 Vertikaler Knickarmroboter ... 567
13.2.2 Horizontaler Knickarmroboter ... 570
13.2.3 Kartesische Linienportal-Roboter ... 571
13.2.4 Kartesisches Flächenportal und Linienportal mit Querausleger ... 572
13.2.5 Parallelkinematiken ... 573
13.2.5.1 Kombinierte Kinematiken ... 573
13.2.5.2 Vollparallele Kinematiken ... 573
13.2.6 Sonderbauformen ... 574
13.2.6.1 Zylinder- und Kugelkoordinatenroboter ... 574
13.2.6.2 Hybridkinematiken ... 575
13.2.6.3 Kollaborative Roboterbauformen ... 575
13.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte ... 577
13.4 Koordinatentransformation und Bahngenerierung ... 579
13.5 Bedienung und Programmierung von Robotern ... 589
13.5.1 Online-Programmierverfahren ... 590
13.5.2 Offline-Programmiersysteme ... 596
13.5.3 Industrial Robot Language (IRL) als Beispiel einer Roboter-Programmiersprache ... 601
13.6 Kommunikationsschnittstellen für Robotersteuerungen ... 610
13.7 Sensordatengewinnung und -verarbeitung ... 610

13.8 Greiftechnik in der Robotik ... 613
13.8.1 Prozessdefinitionen ... 614
13.8.2 Greifprinzipien ... 614
13.8.3 Greifertypen ... 615
13.8.3.1 Mechanische Greifer ... 615
13.8.3.2 Pneumatische Greifer ... 619
13.8.3.3 Sonderformen ... 621
13.8.4 Greifsysteme ... 623
13.9 Entwicklungstendenzen ... 626
Abkürzungsverzeichnis ... 630
Formelzeichenverzeichnis ... 630
Literaturverzeichnis ... 631

14 Fertigungsleittechnik ... 633
14.1 Die Unternehmensstruktur im CIM-Verbund ... 636
14.1.1 CIM-Komponenten ... 637
14.1.1.1 PPS ... 638
14.1.1.2 CAD ... 638
14.1.1.3 CAP und CAM ... 639
14.1.1.4 CAQ ... 639
14.1.2 Automatisierte Produktion ... 639
14.1.3 Ebenenmodell eines Unternehmens der Fertigungsindustrie ... 640
14.2 Unternehmensebene ... 641
14.2.1 ERP-Systeme ... 642
14.2.1.1 Funktionalitäten eines ERP-Systems ... 642
14.2.1.2 Modularität von ERP-Systemen ... 642
14.2.1.3 Einführung eines ERP-Systems ... 644
14.2.1.4 Aktuelle Entwicklungen von ERP-Systemen ... 644
14.3 Betriebsleitebene ... 645
14.3.1 Manufacturing Execution Systems ... 645
14.3.1.1 Aufgaben eines MES ... 645
14.3.1.2 Ausprägungen und Systemtypen ... 645
14.3.2 Fertigungsleitsysteme ... 646
14.3.2.1 Technische Systemkonzepte ... 647
14.3.2.2 DNC (Distributed Numerical Control) ... 647
14.3.2.3 Materialflusssteuerung ... 649
14.3.2.4 Fertigungshilfsmittelorganisation ... 650
14.3.3 Kommunikation in der Leittechnik ... 656
14.3.3.1 Kommunikationssegmente des Fertigungsbereichs ... 657

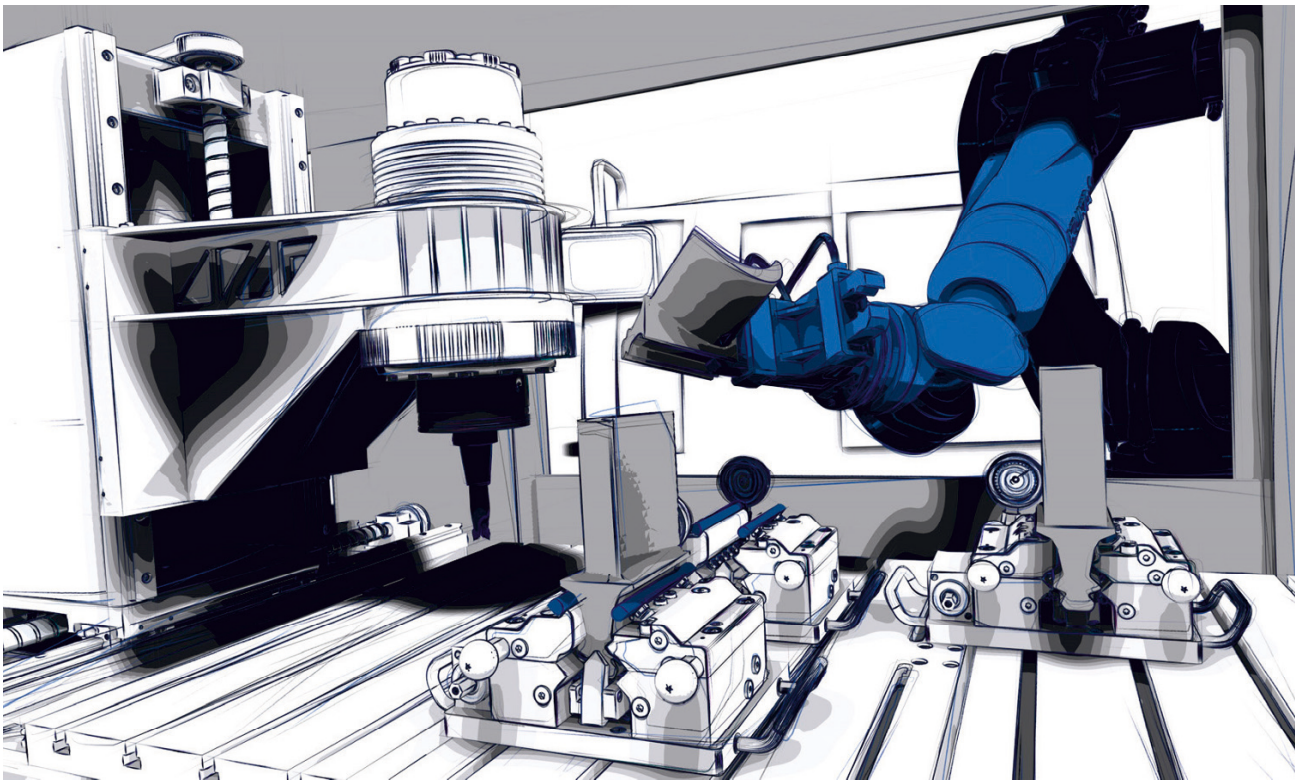
14.4 Prozessleitebene ... 659
14.4.1 Elektronischer Leitstand ... 659
14.4.1.1 Aufgaben von Werkstattsteuerungssystemen ... 659
14.4.1.2 Funktionsumfang elektronischer Leitstände ... 659
14.4.2 Fertigungsleitrechner ... 661
14.4.2.1 Funktionsumfang von Fertigungsleitrechnern ... 661
14.4.3 SCADA-Systeme ... 662
14.4.3.1 Aufgaben ... 662
14.4.3.2 Konzepte ... 662
14.5 Smart Automation Lab: Industrie 4.0-Forschungslabor ... 663
14.5.1 Produktzentrierte Steuerung ... 663
14.5.2 Plug & Produce ... 664
14.5.3 Kognitive Montage ... 665
Abkürzungsverzeichnis ... 666
Literaturverzeichnis ... 667

15 Engineering ... 669
15.1 Softwareentwicklung ... 672
15.1.1 Entwicklungsmodelle ... 672
15.1.1.1 Wasserfall-Modell ... 673
15.1.1.2 V-Modell ... 673
15.1.1.3 Agile Softwareentwicklung ... 674
15.1.2 Entwicklungsphasen ... 675
15.1.2.1 Planungsphase ... 675
15.1.2.2 Definitionsphase ... 675
15.1.2.3 Entwurfsphase ... 675
15.1.2.4 Implementierungsphase ... 676
15.1.2.5 Abnahme- und Einführungsphase ... 679
15.1.2.6 Wartungs- und Pflegephase ... 679
15.1.3 Modellgetriebene Softwareentwicklung ... 679
15.2 Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen ... 680
15.2.1 Einführung ... 680
15.2.2 Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen ... 681
15.2.2.1 Energiebereitstellung ... 681
15.2.2.2 Realisierung von Steuerungsfunktionen ... 681
15.2.2.3 Schutzfunktionen für Personal und Anlage ... 682
15.2.3 Zusammenwirken zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion ... 684
15.2.3.1 Schnittstelle zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion ... 684
15.2.3.2 Verständigungshilfsmittel zur Funktionsfestlegung in einer Werkzeugmaschine ... 685

15.2.4 Komponenten und Verfahren der Elektrokonstruktion 686
15.2.4.1 Normen und Vorschriften zur Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen 686
15.2.4.2 Kriterien zur Auswahl von Komponenten 688
15.2.4.3 Schaltungsunterlagen 688
15.2.4.4 Schaltungsunterlagen am Beispiel einer Drehmaschine 690
15.2.4.5 Verfahren der Elektrokonstruktion 694
15.2.5 Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen 696
15.2.5.1 Energieversorgung 696
15.2.5.2 Elektrische Komponenten in Werkzeugmaschinen 696
15.2.5.3 Bedienerschnittstelle 699
15.2.5.4 Sicherheitseinrichtungen 702
15.2.5.5 Schaltschrankbau 703
Literaturverzeichnis 708

16 Serviceteil 711

Kapitel 1



Einführung

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M. Sc., Dr.-Ing. Johannes Nittinger und Simon Storms M. Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

Einführung

1.1 Das mechatronische System Werkzeugmaschine – 4

1.2 Engineering – 5

1.3 Aktuelle Entwicklungen – 6

Abkürzungsverzeichnis – 7

Literaturverzeichnis – 7

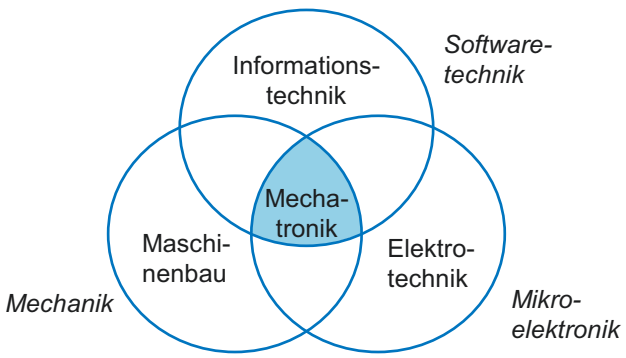
© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_1

1

1.1 Das mechatronische System Werkzeugmaschine

Seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts hat die fortwährende Optimierung der Mikroelektronik bzw. des Mikrocomputers die Automatisierungstechnik und im Speziellen den Umfang an Funktionalität und Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen gravierend verändert bzw. ständig verbessert. So wurde die Realisierung flexibel programmierbarer Steuerungstechnik möglich, die mithilfe passgenauer Softwaresysteme in der Lage ist, komplexe Schalt- und Regelungsaufgaben auszuführen.

An der Entwicklung moderner Werkzeugmaschinen und ihrer Komponenten sind heute daher in der Regel interdisziplinäre Teams aus den Bereichen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beteiligt. Die Überlagerung der einzelnen Fachdisziplinen bietet dabei erhebliches Synergiepotential, um beispielsweise die Funktionalität von Komponenten zu verbessern oder um technische Systeme räumlich zu kompakten, *smarten* Einheiten zu integrieren [ISER99]. Für Komponenten, deren Funktionsweise auf dieser Integration beruht, wird allgemein die Bezeichnung „Mechatronik" verwendet, die sich aus den beteiligten Fachdisziplinen ableitet (vgl. ◘ Bild 1.1).



◘ **Bild 1.1** Beteiligte Fachdisziplinen zur Entwicklung mechatronischer Komponenten

Der heute verwendete Mechatronik-Begriff geht jedoch über den reinen Komponentenbezug hinaus und beinhaltet insbesondere die interdisziplinäre Entwicklungsmethodik, d. h. das charakteristische Vorgehen zur Realisierung mechatronischer Systeme [JANS10] (vgl. *Engineering*, ► Kap. 1.2).

Ein mechatronisches System ist gekennzeichnet durch seinen Aufbau aus einem Grundsystem, verschiedenen Sensoren und Aktoren sowie einer oder mehrerer Komponenten zur Informationsverarbeitung (vgl. ◘ Bild 1.2). Dabei bildet das Grundsystem die Schnittstelle zu von außen sichtbaren Systemfunktionen indem es den externen Stoff- und Energiefluss beeinflusst. Innerhalb des Systems beruht diese Manipulation auf der Ansteuerung von Aktoren, d. h. den Stellgliedern des Systems, die über eine separate Energiezuführung mit Leistung zur Funktionsausführung versorgt werden. Informationen bezüglich des aktuellen Zustandes des Grundsystems werden durch Sensoren bestimmt, die hierzu verschiedene Messgrößen, wie z. B. elektrischen Strom oder Spannung aufzeichnen. Die Interpretation der Sensordaten sowie die Ansteuerung der Aktoren geschieht schließlich durch die informationstechnische Verknüpfung durch ein integriertes Rechnersystem. Das Rechnersystem besteht aus einem oder mehreren Prozessoren und führt Steuerungs- und Regelungsaufgaben aus.

Außerdem verfügt das Rechnersystem in der Regel über externe Schnittstellen zum Informationsaustausch mit anderen technischen Systemen. Zur Kommunikation kommen hier unterschiedliche Protokolle zum Einsatz, deren Eigenschaften wie z. B. die Kommunikationsgeschwindigkeit (Echtzeitfähigkeit) oder -sicherheit (Redundanz), an den jeweiligen Einsatzzweck angepasst, ausgewählt werden müssen. Innerhalb des mechatronischen Systems findet häufig nur eine Vorverarbeitung von Informationen statt. Komplexere Berechnungen oder die Ermittlung von Sollwerten wird dagegen meist auf leistungsstärkere oder umfangreicher vernetzte Rechnersysteme ausgelagert.

Neben der industriellen Maschine-zu-Maschine-Kommunikation über industrielle Kommunikationsprotokolle können auch Eingabemöglichkeiten für den Bediener einer Anlage vorgesehen werden. Die Eingabe kann dabei direkt mit der mechatronischen Komponente erfolgen, wie z. B. durch Betätigen eines Zustimmtasters oder zunächst über ein Bedienerterminal führen, das die Eingabewerte des Bedieners für das technische System aufbereitet und überträgt.

Heutige Werkzeugmaschinen wie auch Maschinen und Anlagen aus anderen Branchen, beinhalten eine Vielzahl unterschiedlicher mechatronischer Aggregate, deren Anforderungen an die Informationsverarbeitung und -bereitstellung sich stark voneinander unterscheiden. ◘ Bild 1.3 gibt dazu einen Überblick über mechatronische Teilsysteme von Werkzeugmaschinen. So befinden sich in Hauptspindelantrieben heute eine Vielzahl von Sensoren z. B. zur Positions- und Drehzahlüberwachung des Antriebs, zur Temperaturkontrolle oder zur Realisierung von Diagnosefunktionen, die Auskunft über den aktuellen Zustand der Spindel liefern bzw. diese vor Beschädigung schützen. Bei Vorschubantrieben, die das aufgespannte Werkzeug entlang definierter Bewegungsbahnen relativ zur Hauptspindel bewegen, bestehen höchste Anforderungen an die Kommunikation und das Regelverhalten – insbesondere dann, wenn an der Bewegung mehrere Vorschubachsen beteiligt sind und diese synchronisiert werden müssen.

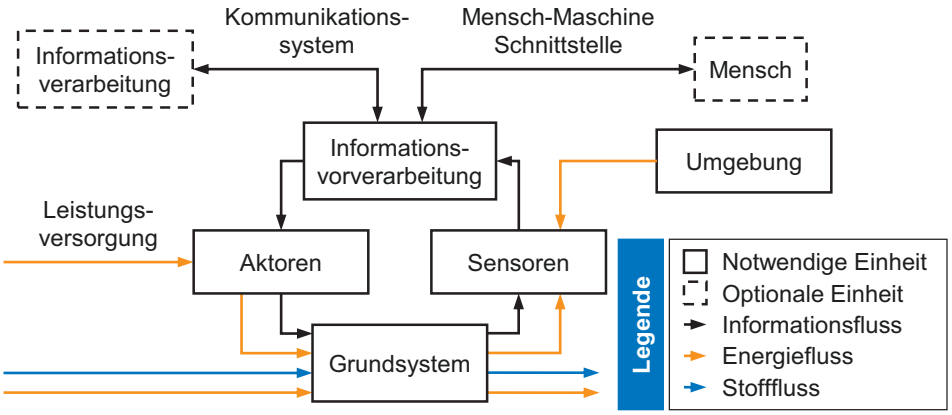


Bild 1.2 Allgemeine Grundstruktur eines mechatronischen Systems

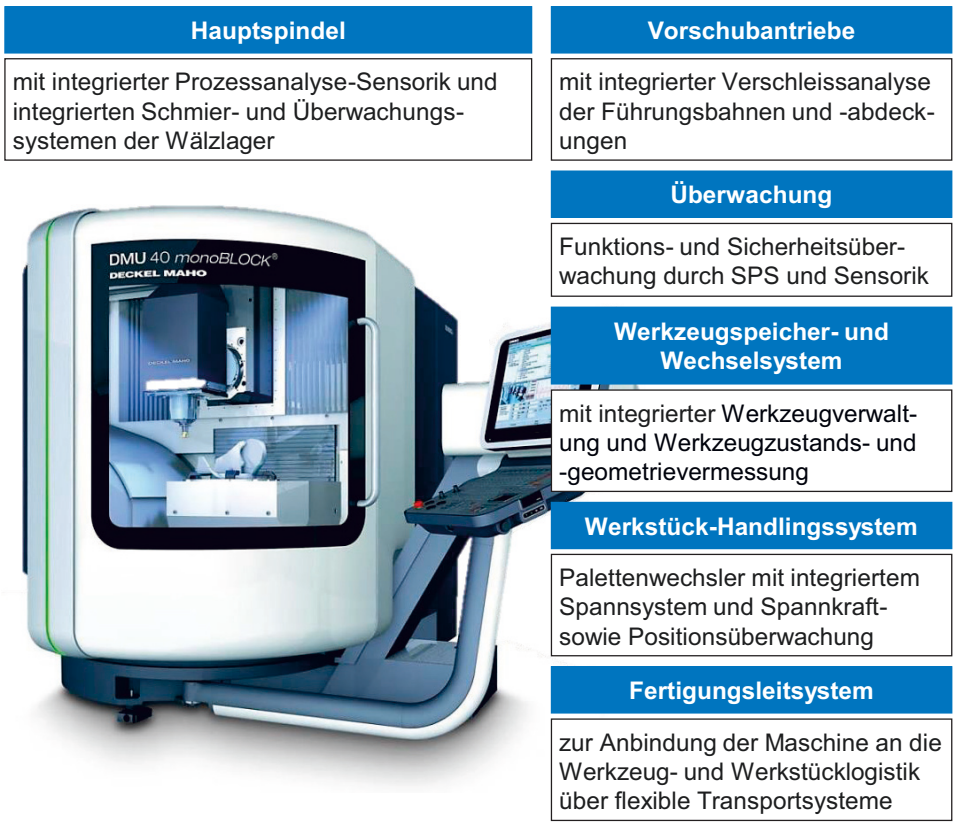


Bild 1.3 Mechatronische Komponenten von Werkzeugmaschinen. Quelle: DMG MORI

Zur Bearbeitungsunterstützung werden automatisierte Handlingsysteme eingesetzt, die beispielsweise den Werkzeugwechsel oder die Speicherung von Werkzeugen in Magazinen erledigen oder das Auf- und Umspannen von Werkstücken durchführen. Auch hier bestehen hohe Anforderungen an die Schnittstellenkommunikation zwischen der Steuerungseinheit des jeweiligen (maschineninternen) Handlingsystems und der übergeordneten Maschinensteuerung, um beispielsweise Kollisionen zu vermeiden und die Abfolge der Abläufe zu koordinieren.

Darüber hinaus ist eine Werkzeugmaschine selbst als komplexes mechatronisches Gesamtsystem in die Fertigungstopologie des Unternehmens eingebunden. Kommunikation zur Auftragsauslösung und Verkettung findet hier einerseits vertikal, d. h. mit einem übergeordneten Leitsystem statt. Andererseits können auch weitere (maschinenexterne) Betriebsmittel wie z. B. Förder- oder Prüfsysteme, die jeweils über eigene Steuerungstechnik verfügen, an der Ausführung beteiligt sein.

1.2 Engineering

Produzierende Unternehmen stehen heute vor der Herausforderung, zum einen schnell auf neue Trends reagieren können zu müssen und andererseits die Herstellkosten

gering zu halten. Dies fordert den Produktionsanlagen eine hohe Flexibilität und Wandelbarkeit ab, was zu einer hohen Komplexität der Anlagen führt. Da von den Anlagenherstellern weiterhin kurze Entwicklungs- und Inbetriebnahmezeiten verlangt werden, ist eine effiziente Beherrschung des Engineering-Prozesses für Hersteller von Werkzeugmaschinen und produktionstechnischen Anlagen eine zentrale Kernkompetenz im internationalen Wettbewerb.

Der Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme findet entsprechend der interdisziplinären Problemstellung bei den meisten Maschinenherstellern über mehrere Fachabteilungen verteilt statt. Die an der Entwicklung von Werkzeugmaschinen und Produktionssystemen beteiligten Fachabteilungen sind typischerweise folgende:

- Mechanik,
- Elektrik,
- Fluidik (oft mit Elektrik verknüpft),
- Steuerungstechnik (teils mit Elektrik verknüpft),
- Softwareentwicklung,
- Montage/Inbetriebnahme.

Während die Abläufe der Entwicklung früher einem streng sequentiellen Ablauf folgten wird heutzutage zunehmend dazu übergegangen, verschiedene Schritte stärker zu parallelisieren [VDI11]. Insbesondere für individualisierte Maschinen und Anlagen führt dies bei der Auftragsabwicklung zu insgesamt kürzeren Durchlaufzeiten. Es wird jedoch auch deutlich, dass durch die Parallelisierung insbesondere bei hoch integrierten Systemen, mit einem hohen Vernetzungsgrad der Disziplinen, der Kommunikationsbedarf zwischen den Abteilungen deutlich ansteigt. Eine große Gefahr geht dabei von potenziellen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Phasen aus. Wenn beispielsweise Design-Entscheidungen der steuerungstechnischen Programmerstellung eine andere Dimensionierung von Komponenten aus der Fluidkonstruktion erforderlich machen, kann dies unter Umständen wiederum Änderungen in der mechanischen Konstruktion nach sich ziehen.

Zur effizienten Beherrschung des Entwicklungsprozesses bei gleichzeitig steigender Anlagenkomplexität können auf organisatorischer Seite etwa verschiedene Vorgehensmodelle beim Anlagenentwurf sowie im Umgang mit Änderungsiterationen verwendet werden, beispielsweise das V-Modell oder das Wasserfall-Modell [BRÖH95] [ROYC87]. Auf technischer Seite kann der Entwicklungsprozess insbesondere durch den konsequenten und abteilungsübergreifenden Einsatz von geeigneter Software unterstützt werden. Eine besonders hohe Integration verschiedener Entwicklungswerkzeuge kann dabei durch den Einsatz von Werkzeugen eines einzelnen Herstellers erreicht werden. Dies birgt jedoch für den Maschinenhersteller die Gefahr, sich von den Produkten des Softwareherstellers abhängig zu machen und führt neben einem hohen unternehmerischen Risiko zu einer schlechten Verhandlungsposition.

Eine weitere Basistechnologie zur Beherrschung interdisziplinärer Systeme stellt die Modellierung dar. Ob als zentraler Dokumentationsträger eines Systems Engineering Prozesses oder als Verhaltensmodell zur physikalischen Simulation bilden besonders interdisziplinäre Modelle verschiedenste Aspekte eines Systems zentral ab und erlauben prinzipiell eine teil- bzw. vollautomatisierte, rechnerbasierte Interpretation und Verarbeitung.

Ein verbreitetes Beispiel für einen sinnvollen Einsatz von Modellen ist die virtuelle Inbetriebnahme, welche insbesondere die Implementierung der steuerungstechnischen Programme vor dem Aufbau des realen Systems erlaubt. Je nach Verfügbarkeit der Modelle ist die Simulation des Systems entweder vollständig virtuell (Software-in-the-loop) oder es werden mit realer Steuerungshardware virtuelle Komponenten angesteuert (Hardware-in-the-loop).

1.3 Aktuelle Entwicklungen

Im Bereich der industriellen Produktionstechnik werden aktuell viele Forschungs- und Entwicklungsarbeiten unter dem Schlagwort „Industrie 4.0“ zusammengefasst. Industrie 4.0 steht dabei für die technischen und organisatorischen Umwälzungen, die durch den schrittweisen Einzug der modernen Informations- und Kommunikationstechnologien in die Fertigung hervorgerufen werden. In Anlehnung an drei frühere tiefgreifende Veränderungen in der Produktionstechnik während der vergangenen 300 Jahre wird damit in vielen Diskussionen im Vorfeld bereits die vierte Industrielle Revolution angekündigt (vgl. ◘ Bild 1.4). Diese verbindet die weltweit agierende Produktionstechnik mit der Informatik bzw. Informationstechnik (IT) unter besonderer Berücksichtigung der Rolle des Menschen.

Mit der Weiterentwicklung der Informationstechnologien sind viele Vorgehensmodelle für die Entwicklung entstanden, z. B. Spiralmodell, V-, W-, Doppel-W- und Y-Modelle und Software-Lösungen für einzelne Bereiche und spezifische Probleme [VOGE03; BOEH88].

Die zunehmende Zahl an Insellösungen führte allerdings zu zahlreichen Brüchen im Unternehmensinformationsfluss. Die Bemühungen, ein übergreifendes Integrationskonzept für die Informationsverarbeitung in Produktionsunternehmen zu entwickeln, wurden in den 1980er Jahren unter dem Begriff „Computer-Integrated Manufacturing (CIM)“ zusammengefasst. Als Hauptaufgabe stand dabei die Vereinigung von Produktionsplanung und -steuerung mit den CAx-Technologien im Vordergrund.

Dass bei vielen CIM-Projekten der erhoffte Erfolg ausblieb, kann auf unterschiedliche organisatorische und technische Faktoren zurückgeführt werden:

- unzureichende Berücksichtigung des Menschen mit seinen kreativen Fähigkeiten,

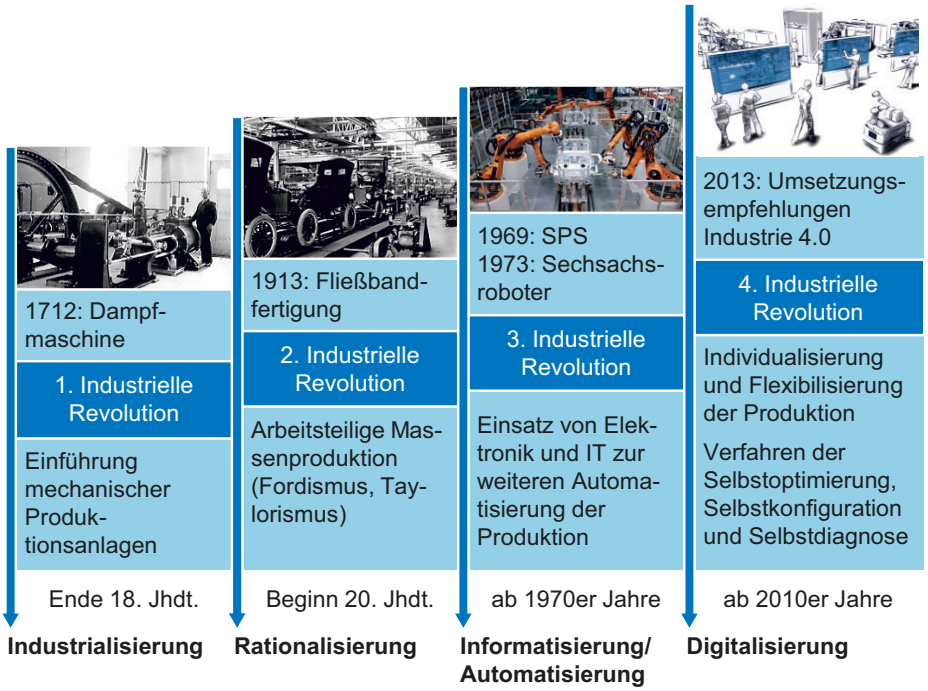


Bild 1.4 Wichtige Meilensteine auf dem Weg zu modernen Produktionssystemen.

- geringer Reifegrad der Informations- und Kommunikationstechnologien,
- fehlende digitale Daten für die Vernetzung,
- fehlende Offenheit der Software-Werkzeuge,
- fehlende Verfügbarkeit von Kommunikationsstandards und Austauschformaten,
- fehlendes IT-Know-How außerhalb spezialisierter Fachbereiche,
- fehlende Berücksichtigung organisatorischer Rahmenbedingungen,
- hohe Kosten für die informationstechnische Infrastruktur,
- geringe Gewichtung der Komplexitätsreduzierung im Sinne von Lean-Ansätzen.

Obwohl die CIM-Vision aufgrund dieser Faktoren zum Ende der 1990er Jahre als gescheitert galt, behielt die Grundidee des integrierten Informationsmanagements ihre Berechtigung, da die Probleme der heterogenen IT-Landschaft ungelöst blieben [ABRA05]. Aus Richtung des Engineerings wurde der Integrationsgedanke unter dem Begriff Produktlebenszyklus-Management (PLM) weiterverfolgt. Ausgangspunkt war hierbei das Produktdatenmanagement, d.h. die Verwaltung von CAx-Daten und technischen Dokumenten mit übergeordneten Systemen, die Produktstrukturen, Workflows, Zugriffsrechte etc. abbilden. Der Übergang vom PDM zum PLM ist dadurch gekennzeichnet, dass Integrationslösungen zwischen der Konstruktion und anderen Unternehmensbereichen geschaffen wurden (Projektmanagement, Fertigung, Service, Controlling etc.). Ein weiterer Ansatz, mit dem Teile der CIM-Vision weiterverfolgt und -entwickelt werden, ist die Digitale Fabrik, die als Überbegriff für vernetzte digitale Modelle der Fabrik sowie der dazugehörigen Ressourcen und Prozesse eingeführt wurde [VDI11]. Die Digitale Fabrik umfasst damit zahlreiche Anwendungsgebiete von Layout-Planung über die Logistik- und Montageplanung bis zur virtuellen Inbetriebnahme.

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
CAQ	Computer-aided quality
CAx	Computer-aided x / Computer-assisted x
CIM	Computer-Integrated Manufacturing
IT	Informationstechnik
PDM	Produktdatenmanagement
PLM	Produktlebenszyklus-Management
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung

Literaturverzeichnis

[ABRA05] Abramovici, M.; Schulte, S.: PLM-Neue Bezeichnung für alte CIM-Ansätze oder Weiterentwicklung von PDM. In: Konstruktion. 1. Jg., 2005, Nr. 1, S. 2

[BOEH88] Boehm, B. W.: A spiral model of software development and enhancement. In: Computer. 21. Jg., 1988, Nr. 5, S. 61–72

[BRÖH95] Bröhl, A.-P.; Dröschel, W.: Das V-Modell. Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. 2. Aufl. München: Oldenbourg, 1995

[ISER99] Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Grundlagen. Berlin: Springer, 1999

[JANS10] Janschek, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme. Methoden – Modelle – Konzepte. Berlin: Springer, 2010

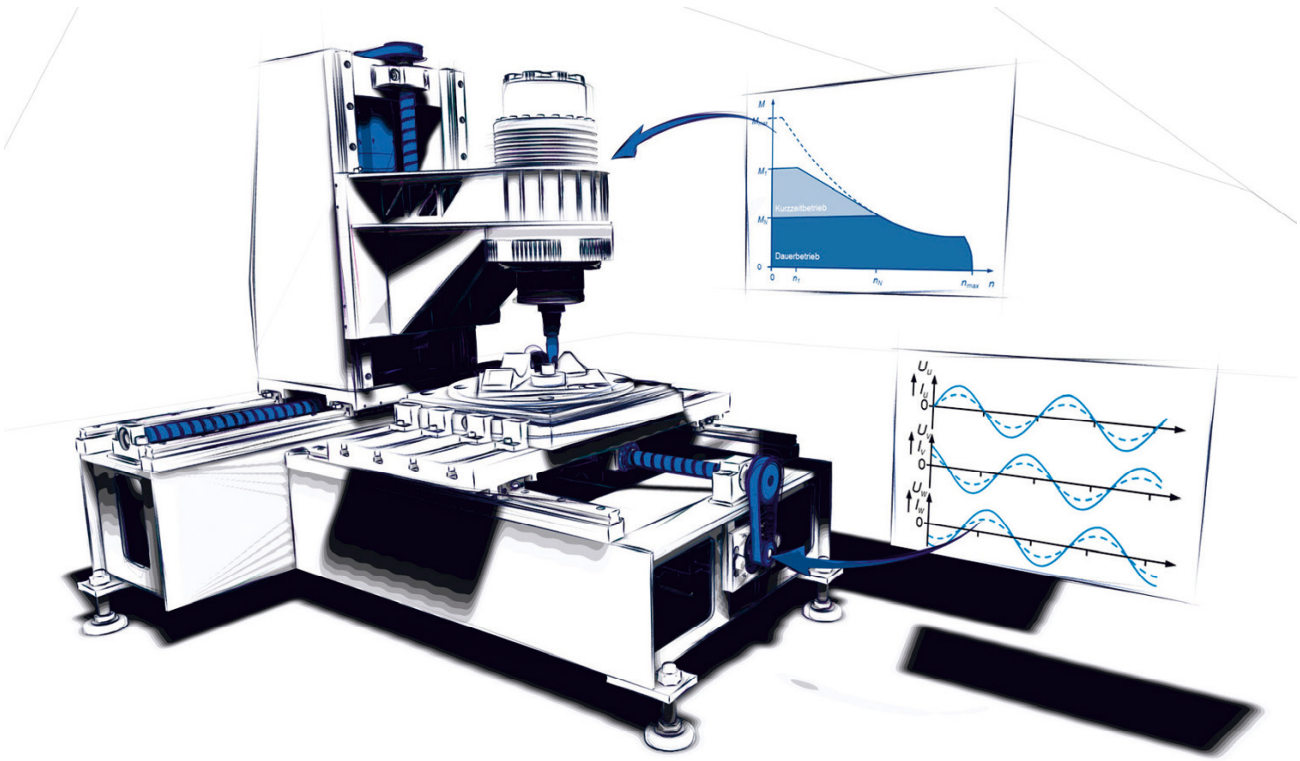
[ROYC87] Royce, W. W.: Managing the development of large software systems. In:: Proceedings of the 9th International Conference on

Software Engineering. (Reihe: ICSE '87). Monterey, California, USA, 1987: IEEE (Veranst.), S. 328–338

[VDI11] Richtlinie VDI 4499 Blatt 2 (Mai 2011). Digitale Fabrik – Digitaler Fabrikbetrieb

[VOGE03] Vogel-Heuser, B.: Systems software engineering. Angewandte Methoden des Systementwurfs für Ingenieure: Oldenbourg, 2003

Kapitel 2



Vorschubachsen in Werkzeugmaschinen

Ich danke meinen Mitarbeitern Dr.-Ing. Thomas Berners, Dipl.-Inform. Enno Bierbaum, Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M.Sc., Dr.-Ing. Markus Obdenbusch, Simon Storms M.Sc. und Stephan Wein M.Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

Ganzheitlich verzahnt!



- Praxisorientiertes Grundlagen- und Nachschlagewerk
- Umfasst sämtliche Aspekte der Getriebetechnik
- Beschreibt die Auslegung, Herstellung, Untersuchung und Simulation von Zahnradgetrieben und Zahnradfertigungsprozessen
- Alle Grundlagenthemen werden durch aktuelle Forschungsergebnisse ergänzt

Online bestellen unter **www.hanser-fachbuch.de**

Vorschubachsen in Werkzeugmaschinen



2.1 Umrichter für WZM-Vorschubachsen – 13

2.1.1 Aufbau von Umrichtersystemen – 13

2.1.2 Regelungselemente in Umrichtern – 14

2.1.3 Schnittstellen zur Steuerung – 18

2.2 Motoren in Vorschubachsen – 24

2.2.1 Anforderungen an die Antriebseinheiten 24

2.2.2 Gleichstrommotoren – 27

2.2.3 Synchronmotoren – 32

2.2.4 Asynchronmotoren – 37

2.2.5 Auslegung und Berechnung elektrischer Antriebe – 44

2.2.6 Bauarten basierend auf Gleichstrom- und Drehstromservoantriebe – 50

2.2.7 Strom- und Leistungsmessung an Elektromotoren – 57

2.3 Positionsmesssysteme für NC-Maschinen – 59

2.3.1 Grundlagen der Weg- und Winkelmessung – 59

2.3.2 Messsysteme – 62

2.3.3 Interpolationsverfahren und Richtungserkennung – 79

2.3.4 Messgeräte – Auswahl und Einbau – 82

2.4 Mechanische Übertragungselemente – 86

2.4.1 Komponenten zur Wandlung von Rotationsbewegung in Translationsbewegung – 86

2.4.2 Vorschubgetriebe – 97

2.4.3 Kupplungen – 105

Abkürzungsverzeichnis – 109

Formelzeichenverzeichnis – 109

Literaturverzeichnis – 112

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_2

Zu den wichtigsten Elementen automatischer Fertigungseinrichtungen zählen Vorschubantriebe, die entsprechend den vorgegebenen Bewegungsanweisungen in Verbindung mit Werkzeugen die Kontur der Werkstücke erzeugen. Bei rein mechanischen bzw. elektro- oder hydromechanischen Fertigungsautomaten liegen die für die Bearbeitung eines Werkstücks erforderlichen Informationen über Weg und Geschwindigkeit in Form von mechanischen Speichern, in Kurvenscheiben oder Schablonen vor (vgl. ▶ Kap. 8). Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen erhalten die entsprechenden Informationen in Form von NC-Daten (vgl. ▶ Kap. 11).

Die Steuerungseinheit der Maschine wertet die jeweiligen Signale aus und gibt sie über den Interpolator an die Antriebseinheit als Führungsgröße weiter. Sie ist die Stelleinrichtung für Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Ihr Motor führt daraufhin eine Drehwinkeländerung mit vorgegebener Drehzahl aus, die durch die mechanischen Übertragungselemente in eine entsprechende Lageänderung des zu bewegenden Maschinenteils umgesetzt wird, vgl. ◘ Bild 2.1.

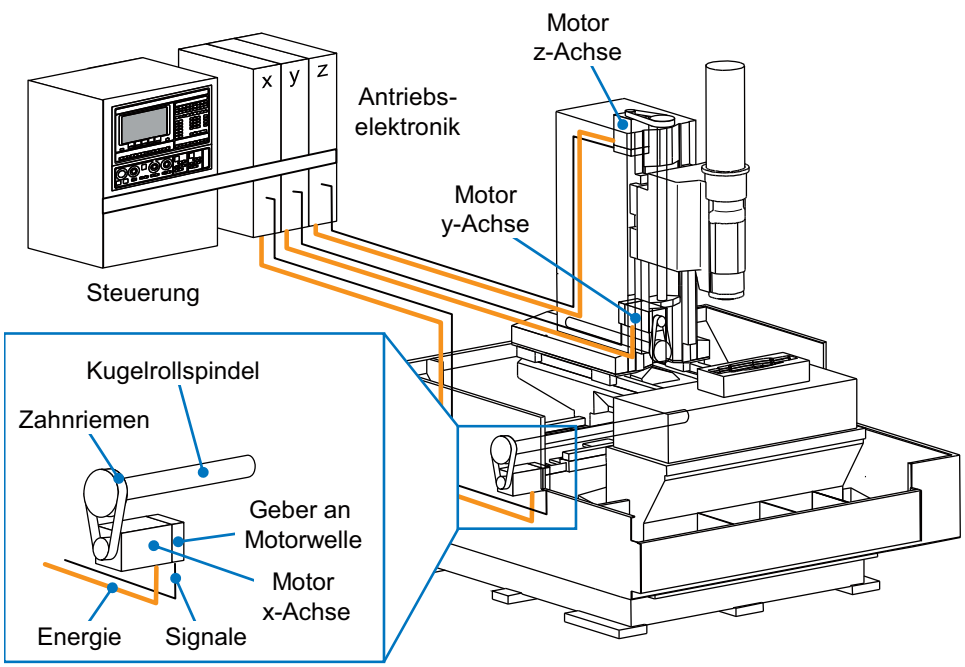
Um die von außen vorgegebene Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück auszuführen, werden eine oder mehrere koordiniert geregelte Bewegungen von Einzelachsen überlagert [BREC02]. Je nach Ausführung der Maschine kann dazu entweder die Werkstückaufnahme oder der Werkzeugschlitten angetrieben werden [GROS06].

Die einzelnen Achsen bilden jeweils ein abgeschlossenes System aus Antrieb, Kraftwandlung und Positionsbestimmung. Dabei liegt ihrem strukturellen Aufbau ein allgemeiner Wirkzusammenhang der verschiedenen Systembestandteile zugrunde, der in Form eines Regelkreises schematisch dargestellt werden kann (vgl. ◘ Bild 2.2). Er beschreibt sowohl den Informationsfluss als auch die Schnittstellen zwischen internen und externen Elementen des Achsensystems. Während Umrichter, Motor und mechanische Übertragungselemente die Regelstrecke bilden und in ihrer Wirkung durch den ausgeführten Positionierungsprozess beeinträchtigt werden, erfolgt die Rückführung der einzelnen Regelgrößen über jeweils geeignete Messsysteme.

Aus der Differenz zwischen gemessenen Ist-Werten und vorgegebenen Soll-Werten ergibt sich eine Regelabweichung, die über einen Regler in neue Werte für die jeweiligen Stellglieder überführt werden. Zur Beschreibung und Auslegung des dynamischen Gesamtsystems können Methoden der Regelungstechnik verwendet werden (vgl. ▶ Kap. 3).

Grundsätzlich werden Vorschubantriebe anhand ihres Wirkprinzips in direkte und indirekte Antriebe unterschieden. Während konventionelle Antriebssysteme, zu denen mechanisch-elektrische Antriebssysteme zählen, die translatorische Bewegung indirekt erzeugen, z. B. durch mechanische Wandlung einer rotatorischen Antriebsbewegung, erfolgt die Krafterzeugung bei linearen Direktantrieben unmittelbar zwischen den relativ zueinander verschiebbaren Primär- und Sekundärteilen. Betrachtet man den elektrischen Lineardirektantrieb als eben abgewickelten Rotationsantrieb, dann entspricht das Primärteil dem Stator einer äquivalent rotierenden Maschine.

Um die Eignung eines entsprechenden Antriebsprinzips für das System einer einzelnen Werkzeugmaschine zu überprüfen, sind seine Eigenschaften den aufgaben- und systemspezifischen Anforderungen wie die Positioniergenauigkeit,



◘ **Bild 2.1** Vorschuberzeugung in einer 3-achsigen Werkzeugmaschine

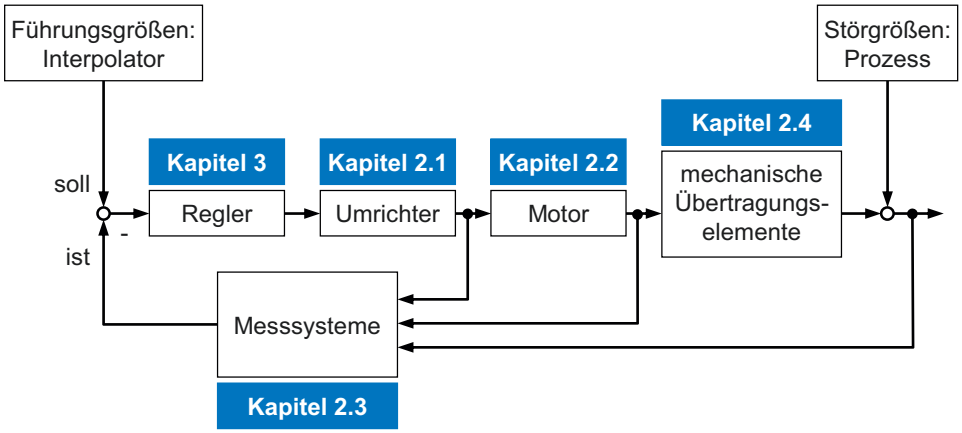


Bild 2.2 Schematischer Aufbau eines Vorschubachsensystems und Kapitelstruktur

die Ruckfreiheit der Bewegung oder die mechatronische Verträglichkeit mit anderen Systemkomponenten gegenüberzustellen. Dabei beschreiben verschiedene Kennwerte jeweils einen Aspekt des Systemverhaltens, das sich aus der Kombination der einzelnen Komponenteneigenschaften ergibt. Bei Vorschubantrieben für Werkzeugmaschinen sind die erreichbare Geschwindigkeit, die maximale Beschleunigung, die erzielbaren Vorschubkräfte, die kinematische Genauigkeit und die statische und die dynamische Steifigkeit typische Beschreibungsmerkmale für das Verhalten [BREC02]. Sie werden insbesondere von der Art und dem Aufbau des Antriebsstranges beeinflusst.

Im Folgenden werden die einzelnen Systemunterabschnitte entsprechend des Zusammenhangs aus Bild 2.2 beschrieben und relevante Auslegungsgrößen im Sinne der Funktionserfüllung erläutert.

2.1 Umrichter für WZM-Vorschubachsen

Servoverstärker enthalten neben dem Regel- und Kontrollteil eine Leistungseinheit. Um die dynamischen Eigenschaften der Vorschubservomotoren vollständig nutzen zu können, werden moderne Bauelemente der Leistungselektronik eingesetzt.

Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen benötigen Ansteuerungen, die einen Betrieb des Servomotors in allen vier Quadranten des Drehzahl-Drehmoment-Diagramms zulassen:

1. Rechtslauf motorisch,
2. Rechtslauf bremsend (rückspeisend),
3. Linkslauf motorisch,
4. Linkslauf bremsend (rückspeisend).

Nach dem derzeitigen Stand der Technik stehen Transistor- und Thyristorverstärker zur Verfügung. Transistorverstärker werden für kleine und mittlere Antriebssysteme bis zu einer Leistung von 200 kW gebaut. Thyristorverstärker umfassen eine Leistungspalette bis zu Leistungen von 10 MW.

2.1.1 Aufbau von Umrichtersystemen

Sollen Gleichstrommotoren angesteuert werden, ist eine regelbare, in der Polarität umkehrbare Gleichspannungsquelle hoher Leistung erforderlich. Die notwendige Energie wird dem Wechselstrom- bzw. Drehstromnetz entnommen und, ggf. nach einer Transformation auf die benötigte Spannung in einem steuerbaren Gleichrichter umgeformt. Für Antriebssysteme mit Gleichstrommotoren kleiner Leistung kann eine der Steuereingangsspannung proportionale Ausgangsspannung mit Leistungsoperationsverstärkern realisiert werden (Bild 2.3 oben). Mit analog arbeitenden Gleichspannungsverstärkern kann eine hohe Dynamik erreicht werden. Die Verlustleistung dieses Verstärkertyps kann jedoch viel größer als die Nennleistung des Motors werden.

Beim Impulsbreiten- oder Frequenzmodulator arbeiten die Transistoren oder Thyristoren als elektronische Schalter, die eine Gleichspannung impulsförmig auf den Motor schalten. Die Zwischenkreisspannung kann für die Abgabe großer Leistungen direkt durch Gleichrichtung aus dem 400-V-Netz erzeugt werden. Über die Pulsbreite bzw. Frequenz wird der Mittelwert des Ausgangsstroms gesteuert (Bild 2.3 Mitte). Es werden zumeist IGBT (engl. Insulated Gate Bipolar Transistor) eingesetzt, da sich diese gegenüber den bisher eingesetzten Bipolartransistoren durch höhere mögliche Schaltfrequenzen (oberhalb von 100 kHz), kürzere Verzögerungszeiten und eine einfachere Ansteuerung auszeichnen. Diese Verstärker haben nahezu die gleichen dynamischen Eigenschaften wie die Gleichspannungsverstärker bei wesentlich geringeren Verlustleistungen im Transistor. Der Ausgangsstrom wird durch die Motorinduktivität hinreichend geglättet, sodass in den meisten Fällen zusätzliche Glättungsdrosseln entbehrlich sind.

Die Steuerung von Drehstrom-Servomotoren wird zumeist mit sinusförmigen Strömen variabler Frequenz und Amplitude durchgeführt. Die hierfür erforderliche genaue Rotorlageerfassung erfolgt über einen hochauflösenden Positionsgeber. Gegenüber der herkömmlichen Speisung mit blockförmi-

gen Strömen werden eine geringere Drehmomentwelligkeit und eine höhere Dynamik erzielt. Drehstrom-Servomotoren werden von Pulswechselrichtern gespeist (Bild 2.3 unten). Die Zwischenkreisspannung wird zumeist durch direkte Gleichrichtung oder durch Umrichten aus dem 400 V-Netz erzeugt. Zwischenkreisspannungen bis 750 V finden bereits Anwendung. Für den nachgeschalteten dreiphasigen Wechselrichter sind IGBT für die bei Servomotoren üblichen Motorleistungen am besten geeignet, da sich aufgrund der hohen Schaltfrequenzen nur eine geringe Drehmomentwelligkeit und Geräuschentwicklung am Servomotor ergibt.

Ein Schutz des Leistungsteils vor Überlastung, Kurzschluss und Erdschluss sowie gegen Überspannung und Spannungsausfall ist heute Stand der Technik. Die Meldung solcher Fehlerzustände und weiterer Signale sowie die Ankopplung an Feldbussysteme zählen zum Standard moderner Antriebsverstärker. Fehlerzustände können auch direkt vom Antrieb gemeldet werden und z. B. über das SERCOS-Interface von der Steuerung abgefragt werden (vgl. ▶ Kap. 2.1.3.2).

Prinzipiell können Asynchronmotoren, die hauptsächlich für Hauptspindelantriebe eingesetzt werden, wie die für Servoachsen typischen permanenterregten Synchronmotoren mit der gleichen Leistungselektronik arbeiten. Durch Softwaretausch ist die gleiche Hardware für den jeweils anderen Motorentyp einsetzbar. Zur Erzeugung der Schaltsignale zur Ansteuerung der IGBT stehen ebenso wie für die Auswertung der Strommessung und die Rotorlageerfassung integrierte Bausteine und Microcontroller zur Verfügung [SCHM09].

2.1.2 Regelungselement in Umrichtern

Frequenzumrichter für elektrische Antriebssysteme in Werkzeugmaschinen sind heute meist modular ausgeführt.

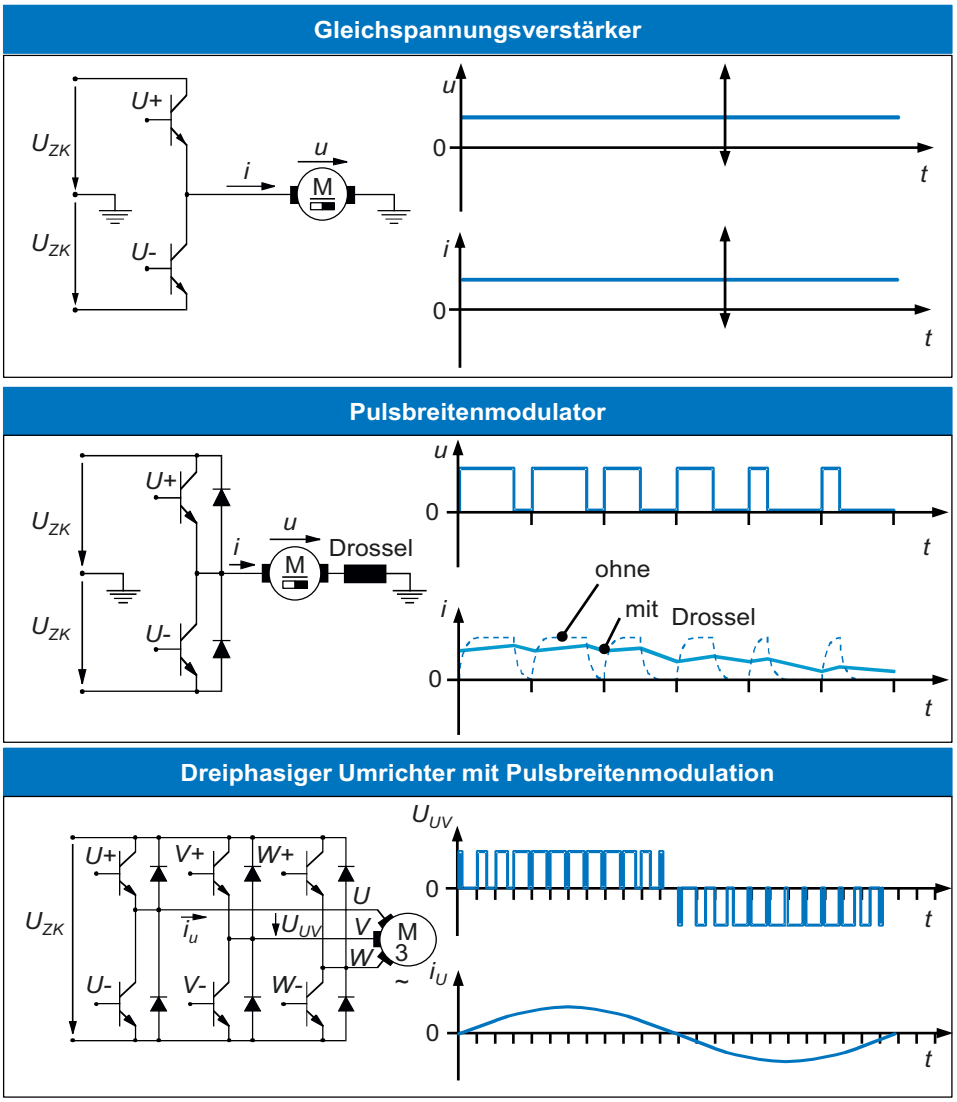


Bild 2.3 Grundschaltungen elektronischer Regelverstärker

Das Antriebsmodul beispielsweise besteht in der Regel aus einem Leistungsteil mit eingeschobener Regelungskarte. Dadurch lässt sich dieselbe Regelungselektronik für verschiedene Umrichterbaugrößen verwenden, anderseits kann der gewünschte Leistungsumfang der Regelung individuell durch den Einsatz verschiedener Reglerkarten bestimmt werden.

Die Regelungshardware in den Umrichtersystemen hat eine je nach Hersteller unterschiedlich definierte Schnittstelle zur Leistungselektronik. Hier wird meist die PWM-Schnittstelle (Pulsweitenmodulation) verwendet, um möglichst tief in der Wirkungskette anzugreifen. Das heißt, dass die Leistungselektronik keinerlei eigene Intelligenz oder Rechenleistung mehr aufweist, sondern die für das Durchschalten der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) notwendigen Signale entgegennimmt und Messsignale wie Strom, Temperatur oder Zwischenkreisspannung zur Auswertung auf der Reglerkarte zur Verfügung stellt (Bild 2.4).

Die Reglerkarte ist primär für die Regelung eines Motors verantwortlich. Je nach Ausbaustufe und Schnittstelle zur

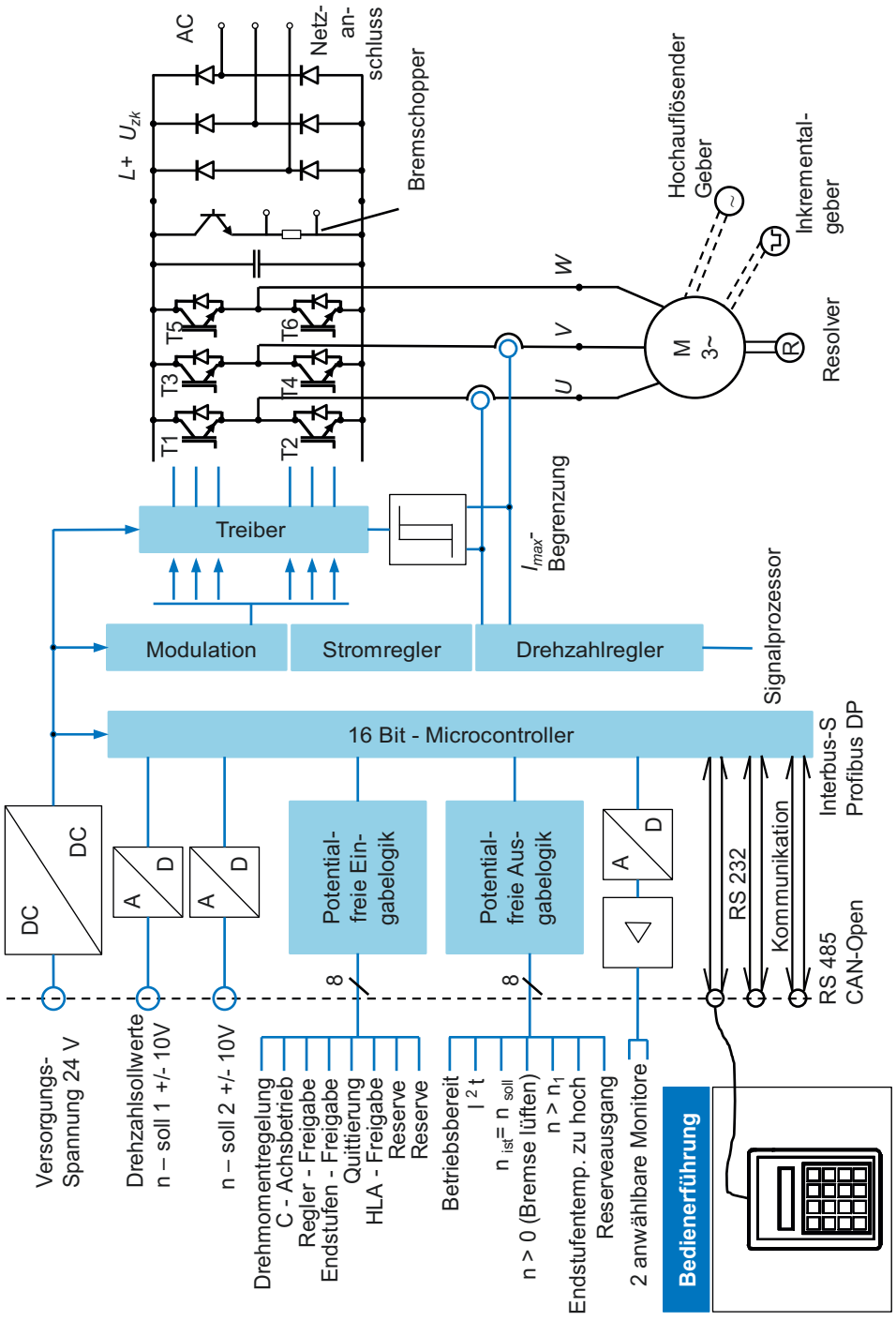


Bild 2.4 Aufbau einer Drehstrom-motoransteuerung mit 10-V-Drehzahl-Schnittstelle und Feldbusankopplung.

Steuerung sind dies die Stromregelung, die Drehzahl- oder Geschwindigkeitsregelung und die Lageregelung. Die Regelkreise können analog (in alten Anlagen) oder digital ausgeführt werden.

Grundlage für die Regelung ist die Messung der Istwerte. Auch dies geschieht meist in den Antriebsreglern. Eingang für die Stromregelung ist der Stromistwert, der im Umrichter gemessen werden kann. Die Geschwindigkeitsregelung basiert bei älteren (analogen) Systemen auf der Messung der Spannung des Tachogenerators. Bei digitalen Antriebsreglern wird hierfür das zeitdiskret differenzierte Signal des Drehgebers oder Linearmaßstabs verwendet, das auch als Istsignal für die Lageregelung dient. Auf die Antriebsregelung wird in den ▶ Kap. 3 und 4 ausführlich eingegangen.

Heutige Antriebsregler übernehmen neben der eigentlichen Regelung des Motors noch eine Vielzahl anderer Aufgaben. Dies sind Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen, Inbetriebnahmehilfen oder Messoperationen, welche in ▶ Kap. 2.1.2.3 näher vorgestellt werden.

2.1.2.1 Analoge Regelung

Analoge Regler sind dadurch gekennzeichnet, dass die internen Größen (z. B. Geschwindigkeitsdifferenz und Stromsollwert) durch analoge Signale wie etwa Spannungen repräsentiert werden (Bild 2.5). Die Verarbeitung der Signale erfolgt mit Hilfe von Operationsverstärkern. Vorwiegend kommen Regler mit PI-Verhalten zum Einsatz, vereinzelt findet man auch PID-Regler.

Die Einstellung der Reglerfaktoren wird bei analogen Reglern meist mit mechanischen Stellgliedern vorgenommen. Dies ist relativ aufwendig und unflexibel. Während der Inbetriebnahme muss jede Achse einzeln von einem Techniker eingestellt werden.

Die analoge Regelung spielt heute in Werkzeugmaschinen nur noch eine untergeordnete Rolle. Mit den Fortschritten in der Computertechnologie wurden Prozessoren verfügbar, die den hohen Anforderungen der Regelung in Werkzeugmaschinen gewachsen sind.

2.1.2.2 Digitale Regelung

Heute werden auch in den schnellen Drehzahl- und Stromregelkreisen digitale Prozessoren eingesetzt. Aufgrund der hohen notwendigen Rechenleistung kommen hier meist digitale Signalprozessoren (DSPs) zum Einsatz. Diese Zentraleinheiten sind durch ihren Aufbau speziell für die Berechnung von komplexen Operationen und einen hohen Datendurchsatz ausgelegt.

Heute übliche Drehzahl- und Stromregelkreise werden je nach Anwendungsfall mit einer Frequenz von bis zu 16 kHz (Taktrate 62,5 µs) abgetastet. Für die Stromregelung einer asynchronen Hauptspindel wird aufgrund der Feldregelung mehr Rechenzeit benötigt als für die Regelung eines Synchronmotors.

Ebenfalls in diesem schnellen Takt muss die Auswertung der Messsignale durchgeführt werden. So muss der Iststrom für die Stromregelung zur Verfügung stehen und in jedem Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsreglertakt die aktuelle Istposition ausgewertet und die Istgeschwindigkeit berechnet werden. Teilweise hat der Achsrechner hierbei zusätzlich ein nichtlineares Verhalten der Wandlungs- und Verstärkungselektronik zu kompensieren, um den genauen Positionswert zu berechnen.

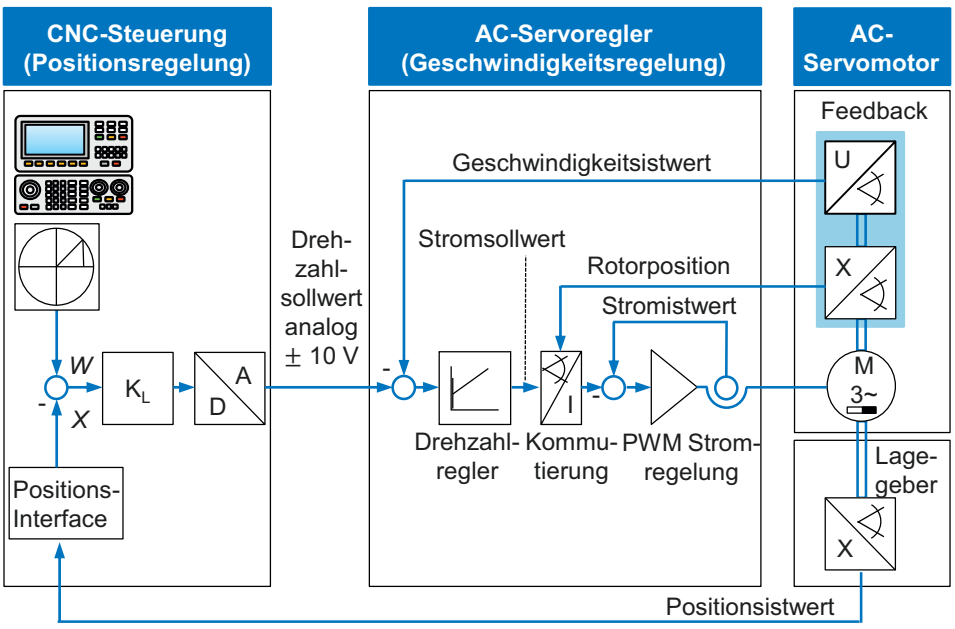


Bild 2.5 Gerätebild einer analogen Vorschubregelung

2.1.2.3 Zusätzliche Funktionen digitaler Antriebsregler

Mit dem Einzug der Mikroprozessoren in die Antriebsregler wurde es möglich, viele Funktionen aus der Steuerung in die Antriebe zu verlagern. Ziel ist hierbei unter anderem, die antriebsspezifische Funktionalität besser zu bündeln und durch eine einfachere Struktur den notwendigen Datenaustausch zu minimieren. Im Folgenden werden einige Zusatzfunktionen in Antrieben kurz beschrieben.

Parametersatzumschaltung

Antriebsregler unterstützen meist die Verwaltung mehrerer Parametersätze. Die Umschaltung zwischen diesen Einstellungen kann während des Betriebs relativ problemlos erfolgen, z. B. anlässlich eines Gangwechsels im Übersetzungsgetriebe einer Hauptspindel. Hierbei wird aufgrund der unterschiedlichen Übersetzung eine andere reduzierte Massenträgheit wirksam, die entsprechend andere Reglereinstellungen erfordern kann. Diese Reglereinstellungen können dann durch Auswahl eines zur aktuell eingestellten Getriebestufe passenden Parametersatzes von der Steuerung aktiviert werden.

Grenzwertüberwachung

In den einzelnen Reglern sind Grenzwerte parametrierbar, um die nachfolgenden Bauelemente nicht zu überlasten. Dies sind beispielsweise eine Transistorstromgrenze, die durch die Baugröße des Umrichters festgelegt ist, ein Strom- bzw. Momentengrenzwert oder eine Grenzdrehzahl des Motors.

Außerdem wird die Ausgangsgröße der Regler daraufhin überwacht, ob sie eine längere Zeitspanne am Maximalwert verbleibt. In diesem Fall wird von einem Parametrierungsfehler oder einem Störfall ausgegangen und die geplante Bearbeitung unterbrochen.

Überwachung von Motor- und Umrichtertemperatur

Der Antrieb überwacht die Temperatur in den Motorwicklungen und im Umrichter mit Sensoren, um eine Überlastung dieser Bauteile zu vermeiden. Meist sind zwei Temperaturschwellen einstellbar: Wird die erste überschritten, erfolgt die Ausgabe einer Warnung an die Steuerung, die die Antriebe daraufhin gezielt stillsetzen kann. Beim Überschreiten der zweiten Schwelle wird das Antriebssystem abgeschaltet, um Schäden zu vermeiden.

Neben der Überwachung der Motortemperaturen wird auch die theoretisch in den Motor eingebrachte Leistung überwacht, um eine kurzfristige Überlastung zu vermeiden. Hintergrund ist die hohe kurzzeitige Überlastbarkeit (5-fach bei Synchronmotoren). Wird der Motor zu lange an der Stromgrenze betrieben, können bereits bleibende thermische Schäden eintreten, bevor die Temperatursensoren die Abschaltschwelle erreicht haben.

Verfahrbereichsüberwachung

Viele Antriebsregler überwachen bereits den Verfahrbereich der Achse und realisieren auf diese Art die zum Schutz der Mechanik notwendigen Softwareendschalter. In Maschinenachsen kann damit ein dreistufiges Sicherheitskonzept verwirklicht werden (Bild 2.6).

Die Steuerung gibt nur Sollwerte innerhalb des zulässigen Achsverfahrbereichs aus. An den Rändern des Arbeitsraums wird die Bahngeschwindigkeit gezielt reduziert. Stellt der Antriebsregler eine Verletzung der Softwareendschalter fest, bremst er seinen Motor sofort mit maximal zulässigem Moment ab und gibt ein Signal an die anderen Antriebsregler, die daraufhin entsprechend reagieren können.

Wird trotz der genannten Sicherheitsvorkehrungen einer der Hardwareendschalter überfahren (etwa aufgrund einer falschen Parametrierung der Verfahrbereiche), wird die Freigabe für die Leistungsteile entzogen, gleichzeitig werden die Bremsen aktiviert. Ungebremste Motoren trudeln aus. Unter Umständen kann eine Achse kollidieren, wenn die Geschwindigkeit nicht innerhalb des verbleibenden Abstands zum Anschlag abgebaut werden kann.

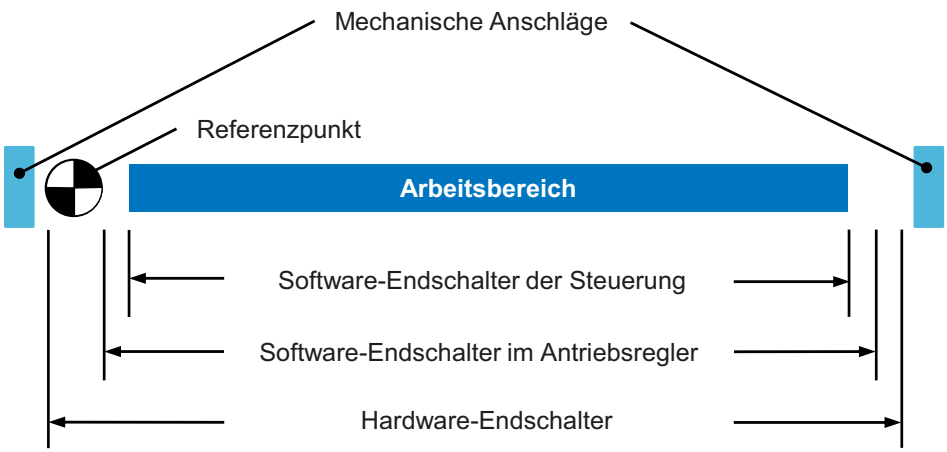


Bild 2.6 Verfahrbereichsbegrenzung in Vorschubachsen

Zweckmäßigerweise liegt der Referenzpunkt bei inkrementellen Messsystemen (vgl. ▶ Kap. 2.3) außerhalb des Verfahrbereichs einer Achse. Dadurch kann der Referenzpunkt von jeder Position im Verfahrbereich in derselben Richtung angefahren werden.

Plausibilitätskontrollen

Neben dem Verfahrbereich wird oft auch der Schleppfehler überwacht. Wird der maximal zulässige Schleppfehler überschritten, schließt der Antrieb auf eine Überlastung der Achse oder eine falsche Parametrierung und schaltet sich ab.

Eine ähnliche Funktion ist die Klemmüberwachung. Wenn sich die Achse nach dem Aufbau eines ausreichenden Motormomentes innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums nicht bewegt, wird die Achse ebenfalls abgeschaltet.

Motoren in vertikalen Achsen sind in der Regel mit einer Bremse versehen, die nach dem Aufbau des Haltemoments im Motor gelöst wird. Auch diese Funktion kann vom Antrieb übernommen werden, um andere Steuerungssysteme zu entlasten. Die Bremse kann vom Antrieb automatisch wieder eingeschaltet werden, sobald das Motormoment nicht mehr anliegt, etwa um ein Herunterfallen der Achse zu vermeiden.

Kompensation geometrischer Fehler

Antriebsregler, die auch den Lageregelkreis enthalten, können Spindelsteigungsfehler und Teilungsfehler des direkten Messsystems kompensieren. Hierzu ist im Antriebsregler eine Kompensationstabelle hinterlegt. Die Werte für die Kompensation können z. B. durch eine Vermessung der Achse mit Hilfe eines Laserinterferometers bestimmt werden.

Inbetriebnahmeunterstützung

Moderne digitale Achsregler unterstützen die Inbetriebnahme, indem sie aus den vorliegenden Daten der Motorbaugröße Starteinstellungen für ihre Regler berechnen. Mit diesen Reglereinstellungen kann die Maschine bewegt werden. Es ist in der Regel jedoch die Optimierung durch einen Techniker ratsam, um die dynamischen Eigenschaften der Achse zu verbessern.

2.1.3 Schnittstellen zur Steuerung

Die Schnittstelle zwischen Antrieb und NC ist – je nach Hersteller und Einsatzfall – auf verschiedenen Ebenen realisiert (◘ Bild 2.7). Über die Schnittstelle werden Sollwerte für die in den Antrieben realisierten Regelkreise übergeben. Je nach Lage der Schnittstelle werden die Regelkreise im Antrieb oder in der Steuerung geschlossen. Die Realisierung eines Regelkreises in der Steuerung setzt voraus, dass die für die Regelung benötigten Istwerte von den Antrieben an die Steuerung übertragen werden, falls ihre Erfassung in den Antrieben und nicht direkt in der Steuerung erfolgt.

In ◘ Bild 2.7 links werden der Drehzahl- und der Stromregelkreis im Steuerungssystem geschlossen. Die Erfassung der Position erfolgt ebenfalls in der Steuerung. Über die Schnittstelle werden Stromsollwerte übertragen. Eine solche Schnittstelle findet man beispielsweise in den Ω-Systemen der Firma Baumüller Nürnberg.

In der Mitte von ◘ Bild 2.7 ist die Drehzahlsollwertschnittstelle dargestellt. Der Lageregler wird hierbei in der Steuerung geschlossen, die anderen Regelkreise im Antrieb. Die Istwerterfassung findet im Antrieb statt, sodass die aktuellen Lageistwerte über die Schnittstelle in die Steuerung übertragen werden, um den Lageregelkreis zu schließen. Dieses Vorgehen liegt darin begründet, dass das Drehzahlsignal bei digitalen Antriebsreglern üblicherweise aus dem Lagesignal des Motorgebers abgeleitet wird. Auch ein optional verwendbares direktes Messsystem wird aus Gründen der leichteren Skalierbarkeit der Achsanzahl an den Antrieb angeschlossen. Die Drehzahlschnittstelle kommt beispielsweise im Simodrive 611D-System der Firma Siemens zum Einsatz.

◘ Bild 2.7 rechts zeigt die Lage einer Schnittstelle für Lagesollwerte. Hierbei werden alle Regelkreise im Antrieb geschlossen. Der Datenverkehr der Schnittstelle wird hierdurch stark reduziert und es werden hohe Reglertaktraten möglich, da schnelle Datenflüsse nur innerhalb eines Gerätes realisiert werden müssen. Außerdem eröffnet sich hierdurch die Möglichkeit, auch die Feininterpolation im Antrieb auszuführen und aktualisierte Lagesollwerte nur noch im Interpolationstakt an die Antriebe zu übergeben. Dies reduziert die Datenrate weiter. Eine solche Schnittstelle wird beispielsweise meist in den Bus-Systemen eingesetzt (▶ Kap. 2.1.3.2).

Ein einheitlicher Trend zu einer bestimmten Lage der Schnittstelle zwischen Antrieb und Steuerung ist derzeit nicht zu erkennen. Je nach Anwendungsfall hat jede der Schnittstellen spezifische Vor- und Nachteile. So ermöglicht eine tief liegende Schnittstelle (z. B. Stromsollwerte) eine umfangreiche Koordination der Regelung von verschiedenen Antrieben, da die Daten in der Steuerung schnell zwischen den einzelnen Achsen ausgetauscht werden können. Diese Lösung ist jedoch aufwendig und unter Umständen teuer, da viele Daten in kurzen Zeitabständen transportiert werden müssen. Auf der anderen Seite erlaubt eine hoch gelegene Schnittstelle (z. B. Lagesollwerte) schnelle Abtastraten der Regelkreise, da innerhalb der Regelkreise keine externe Kommunikation notwendig ist. Eine Koordinierung der verschiedenen Antriebe untereinander ist in den schnellen Regelkreisen jedoch schwierig.

Die Stromsollwert- und Drehzahlsollwertschnittstelle wurden früher über analoge Spannungssignale realisiert. Aufgrund der ungenügenden Auflösung und Genauigkeit

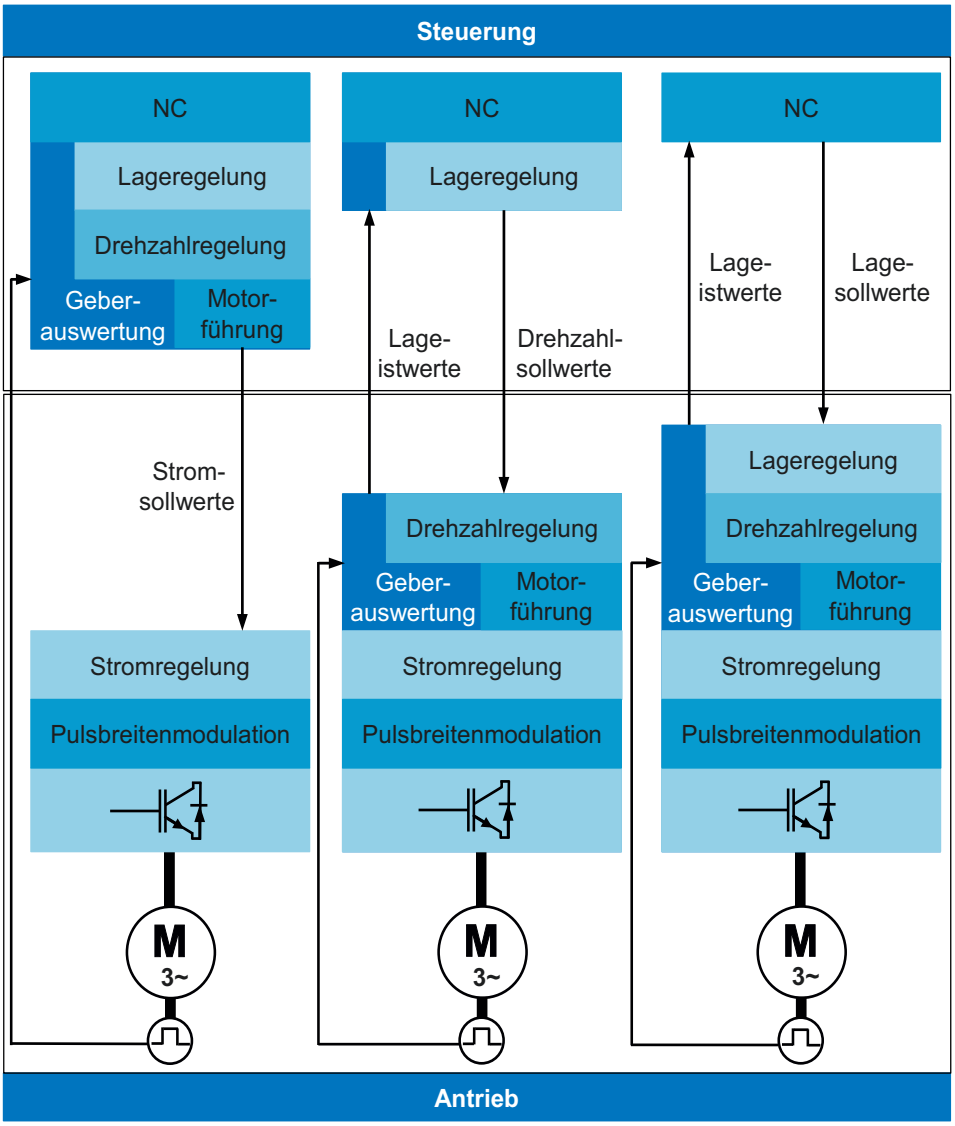


Bild 2.7 Unterschiedliche Lage der Schnittstelle zwischen Steuerung und Antrieb

der analogen Signale eignete sich diese Methode jedoch nicht für eine Lageschnittstelle.

Im Folgenden werden die analoge ±10-V- und eine digitale Schnittstelle (SERCOS-Interface) beschrieben.

2.1.3.1 Analoge Schnittstelle

Mit der Erweiterung des Servoverstärkers um einen Drehzahlregelkreis wurde der Verstärker zu einem Antriebsregelgerät mit der international standardisierten analogen ±10-V-Drehzahlschnittstelle für den Verstärkereingang. Mit dieser Schnittstelle konnten Antriebe und Steuerungen unterschiedlicher Hersteller problemlos zusammenwirken.

Seit 1990 wird die Digitaltechnik bei Vorschubantrieben verstärkt eingesetzt, um die für heutige Ansprüche ungenaue und störempfindliche analoge Eingangsschnittstelle durch eine digitale Schnittstelle mit hoher Reproduzierbarkeit, Zuverlässigkeit und Flexibilität zu ersetzen.

Beim heutigen Stand der Technik lassen sich sowohl die Lage- als auch die Drehzahlregelung digital durchführen. In der untersten (Strom-) Regelschleife werden wegen der guten dynamischen Eigenschaften noch häufig analoge Schaltungen eingesetzt, da für eine digitale Regelung schnelle und damit teure Rechner benötigt werden. Diese sind nur bei entsprechenden Anforderungen zu rechtfertigen. Bild 2.8 zeigt die Struktur einer Antriebsregelung mit der herkömmlichen analogen ±10-V-Schnittstelle. Sowohl die Lageregelung in der NC als auch die Drehzahlregelung im Servoverstärker werden hier bereits digital durchgeführt.

2.1.3.2 Digitale Schnittstelle

Ein hoher Grad an Flexibilität bei der Auswahl der optimalen Regelungs- und Steuerungsstrategie der Antriebe kann durch die Verwendung einer digitalen Schnittstelle zwischen NC und Servoverstärker erreicht werden. Dadurch wird es möglich, je nach Anwendung die Regelung der Antriebe mehr oder weniger in die Servoverstärker zu integrieren

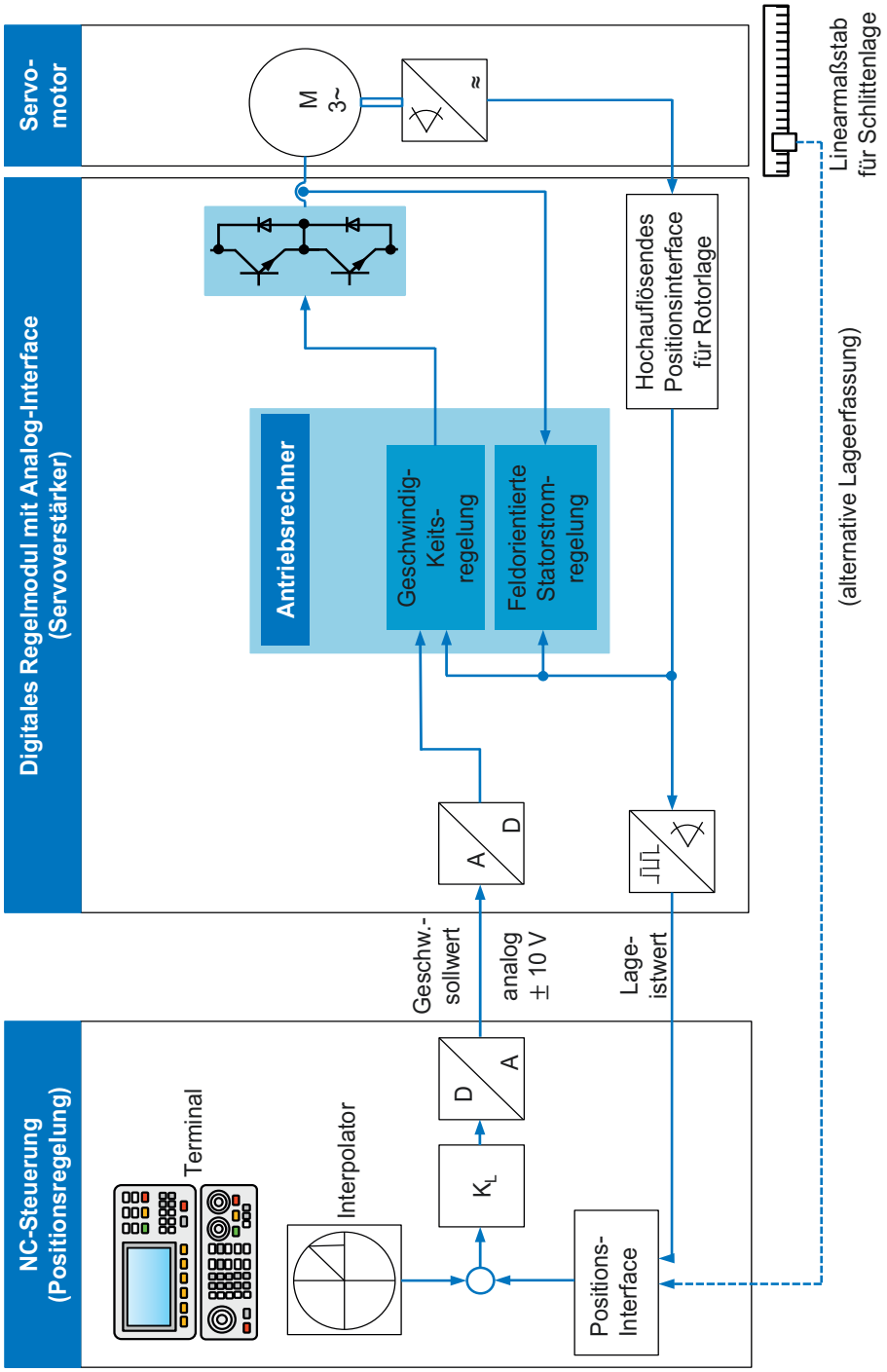


Bild 2.8 Struktur einer Antriebsregelung mit analoger Drehzahlschnittstelle. Nach Bosch Rexroth

[SCHÖ09]. Durch die Übertragung weiterer Daten über die digitale Antriebsschnittstelle wird die Inbetriebnahme, Überwachung und Protokollierung des Servosystems durch die NC-Steuerung erreicht.

Die Zykluszeiten moderner numerischer und speicherprogrammierbarer Steuerungen (NC und SPS) liegen in der Größenordnung weniger Millisekunden, die Abtastraten im Regelkreis digital geregelter Antriebe im Bereich von 100 µs. Wird beispielsweise der Antriebsregelkreis aufgeschnitten bzw. die Lageregelung dezentralisiert, muss auch die Kommunikation zwischen der NC und den dezentralen Komponenten mit denselben Zykluszeiten arbeiten. Da bei der Übertragung der Soll- und Istwerte keine undefinierten Verzögerungen auftreten dürfen, ist ein im Submillisekundenbereich echtzeitfähiges Übertragungssystem mit hoher Kommunikationsleistung erforderlich.

Prinzipiell kommen für die digitale Antriebsschnittstelle serielle oder parallele Datenübertragungsverfahren in Betracht. Vorteile einer seriellen Datenübertragung sind der vergleichsweise geringe Aufwand und die Möglichkeit, ohne

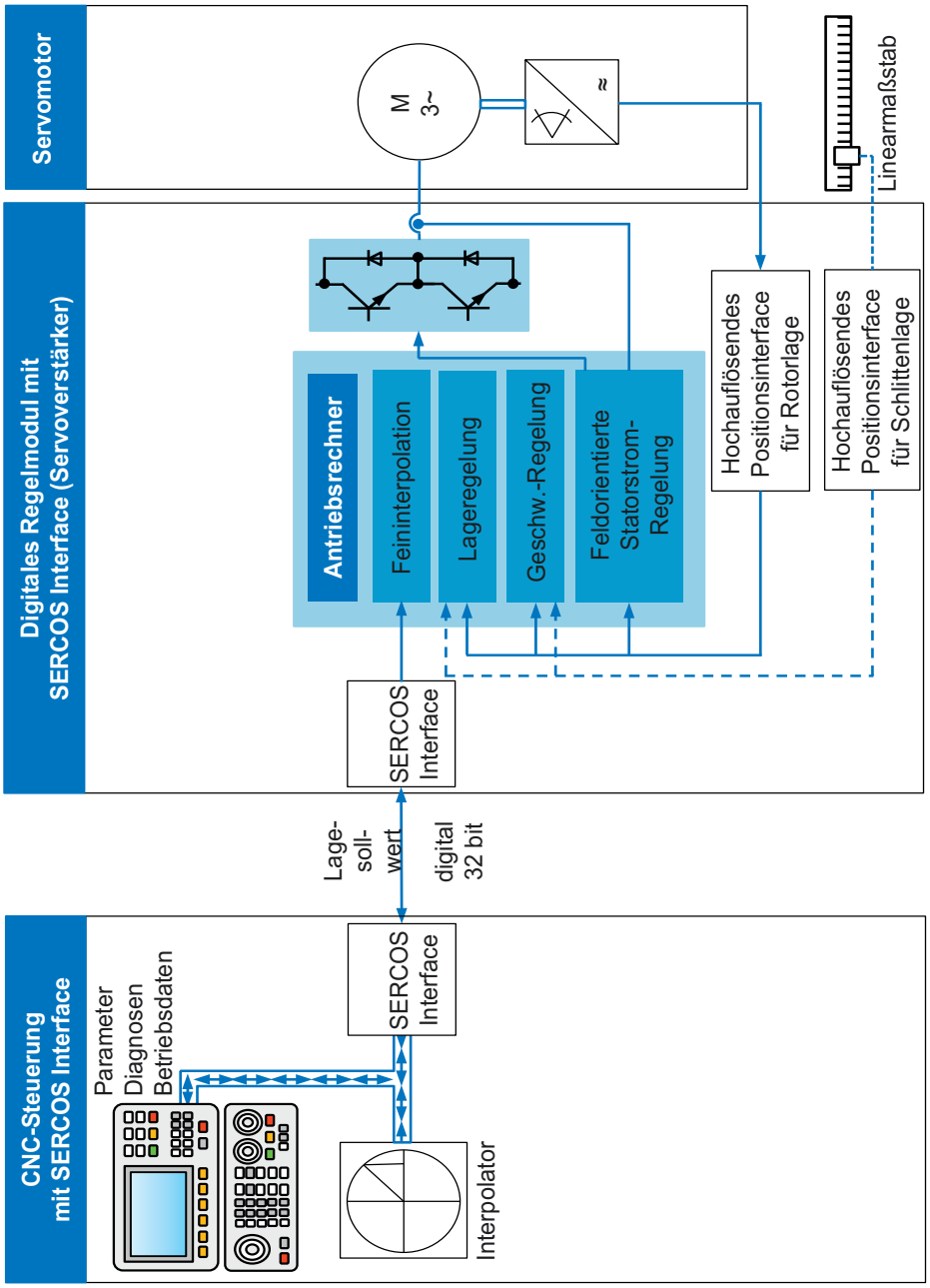


Bild 2.9 Struktur einer Antriebsregelung mit digitaler Positionsschnittstelle. Nach Bosch Rexroth

einschneidende Festlegungen der digitalen Steuerungs- und Servoverstärkerhardware eine herstellerunabhängige Antriebsschnittstelle zu schaffen. Mit einer parallelen Schnittstelle können die Daten über einen Datenbus zwischen NC und Antrieben übertragen werden. Eine solche Schnittstelle hat prinzipbedingt eine höhere Übertragungskapazität, ist jedoch aufwendiger. Die Gesamtleistung des parallelen Busses ist wegen der Übertragungssicherheit begrenzt (≤ 10 m). Eine Standardisierung wird bei einem Parallelbus durch den hohen Abstimmungsaufwand für die Servoverstärker-Hardware erschwert.

In jüngster Zeit lösen digitale Schnittstellen zwischen den Antrieben und der Steuerung die bislang eingesetzte und standardisierte ±10-V-Schnittstelle zunehmend ab. Oftmals sind jedoch sowohl die hardwaretechnische Realisierung der Schnittstelle als auch die zur Datenübertragung eingesetzten Protokolle und Datenformate vom Antriebs- bzw. Steuerungshersteller spezifiziert und nicht dem Anwender offengelegt.

SERCOS Interface

Die Realisierung einer standardisierten digitalen Schnittstelle zur seriellen Kommunikation zwischen Steuerungen und Antrieben ist das SERCOS Interface (engl. Serial Realtime Communication System). Es wurde von einem Arbeitskreis des VDW (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V.) und des Fachverbandes Elektrische Antriebe

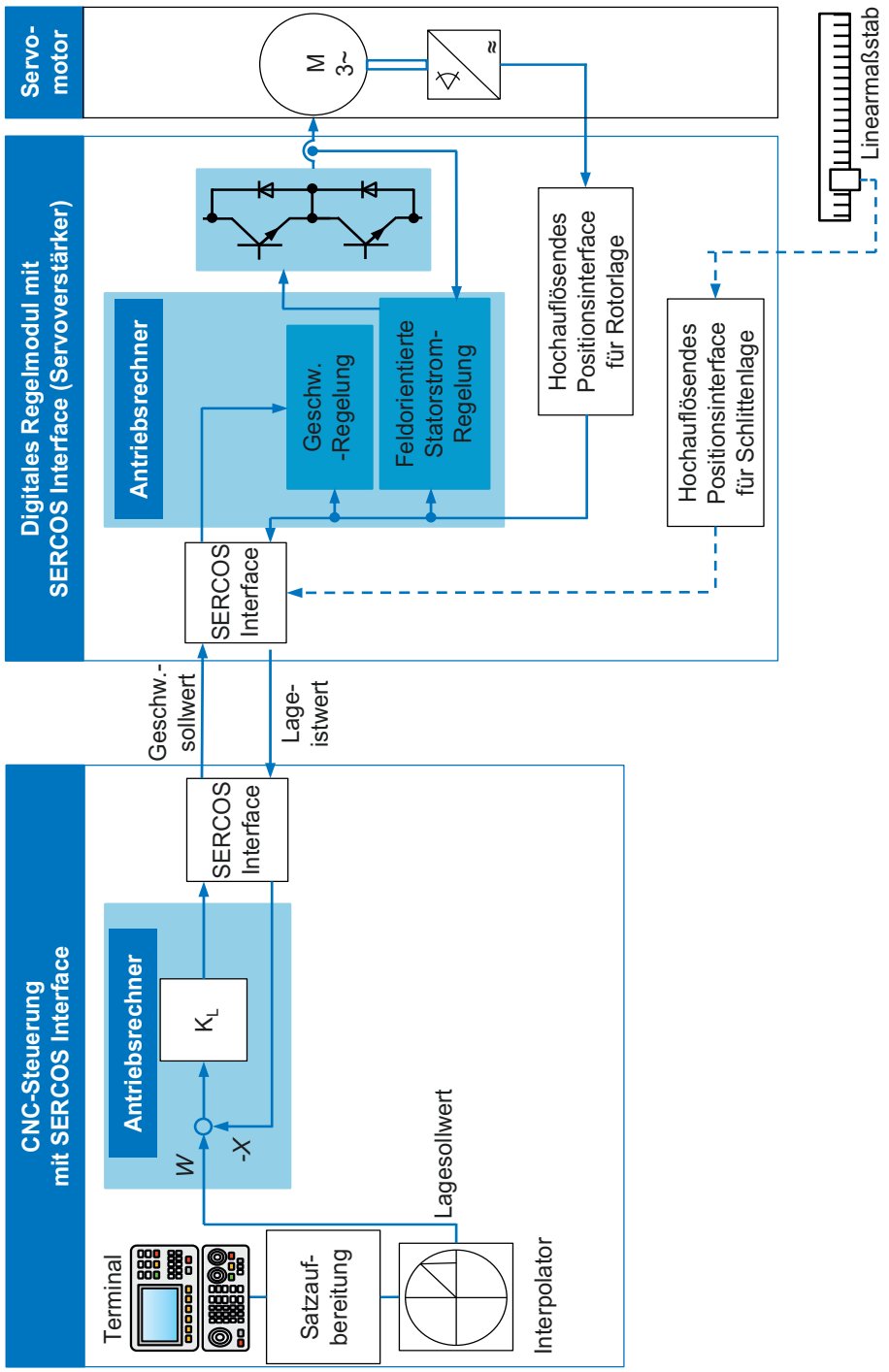


Bild 2.10 Struktur einer Antriebsregelung mit digitaler Drehzahlschnittstelle. Nach Bosch Rexroth

im ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.) spezifiziert. Ziel der Vereinbarungen ist eine herstellerunabhängige Schnittstellenlösung mit wesentlich erweiterter Funktionalität gegenüber der vorher üblichen analogen ±10 V-Drehzahlschnittstelle [LARS03]. Besonderer Wert wurde auf Zeitäquidistanz und die Synchronisation von Messzeitpunkten, Sollwertübernahme und Interpolation gelegt.

Neben den vordefinierten Standard-Betriebsarten Moment-, Drehzahl- und Lagevorgabe durch die NC sind zahlreiche andere erweiterte Betriebsarten möglich, wie z. B. die Lageregelung mit Vorsteuerung. In Bild 2.9 ist die Struktur einer digitalen Antriebsregelung dargestellt, in der der Servoverstärker die gesamte Lageregelung enthält. Die NC gibt Lagesollwerte vor, die via SERCOS zum Antrieb übertragen werden. Lage- und Drehzahlistwert können mit einem Geber

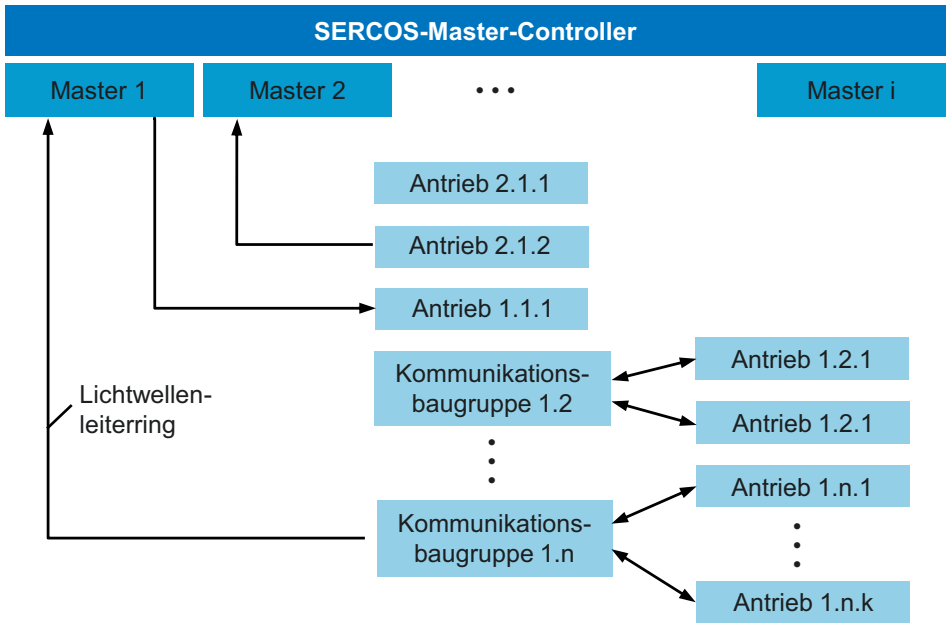


Bild 2.11 SERCOS-Architektur. Nach Schneider Electric

i: SERCOS-Ringe
n: Nummerierung der Kommunikationsbaugruppen eines Ringes
k: Nummerierung der Antriebe einer Kommunikationsbaugruppe

am Motor oder mit einem hochauflösenden Linearmaßstab erfasst werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die digitale Realisierung der klassischen Drehzahlsollwertschnittstelle (vgl. Bild 2.10 gegenüber Bild 2.8). Der Lageregelkreis wird durch die Übertragung der Drehzahlsollwerte bzw. der Lageistwerte über die digitale Schnittstelle geschlossen.

Eine Drehmomentschnittstelle ist für spezielle Anwendungen ebenfalls möglich, erfordert jedoch wegen des notwendigen Soll- und Istwertaustausches über die digitale Schnittstelle im relativ kurzen Stromregeltakt eine hohe Kommunikationsleistung.

Im Gegensatz zu der im Bild 2.10 dargestellten Verwendung des seriellen SERCOS Interfaces wird von der Firma Siemens zur Realisierung dieser Struktur in der Steuerungs-/Antriebskombination 840D/611D ein paralleler Antriebsbus eingesetzt. Aufgrund der höheren Bandbreite des parallelen Antriebsbusses lassen sich kurze Taktzeiten bei einer größeren Anzahl von Achsen realisieren.

Ein SERCOS-Ring besteht aus einem Busmaster und mehreren Busslaves (Bild 2.11). Mehrere Busmaster können an einen SERCOS-Master-Controller angeschlossen sein. Die numerische Steuerung übernimmt die Aufgabe des Busmasters oder des Master-Controllers, die Antriebsregler für die einzelnen Achsen sind die Busslaves. Durch den Einsatz leistungsfähiger Kommunikationsbaugruppen können pro physikalischem Interface mehrere Antriebe (Slaves) angekoppelt werden.

In einem Zyklus werden alle regelmäßig benötigten Daten zwischen dem Master und den Antrieben ausgetauscht (zyklische Übertragung). Neben den zyklischen Daten ist die flexible Übermittlung von Bedarfsdaten möglich (azyklische Übertragung). Die Echtzeitfähigkeit der SERCOS-Architektur ist durch einen maximalen zeitlichen Jitter von ±7 µs gekennzeichnet.

Die Stationen bzw. Slaves sind ringförmig über Lichtwellenleiter miteinander verbunden. Sendet der Master Telegramme aus, werden diese von allen Stationen durchgereicht und erreichen letztlich wieder den Master. Die Slaves geben die empfangenen Daten weiter (Repeaterfunktion). Bedingt durch die Repeater entsteht in jeder Station eine Zeitverzögerung des Datenstroms von der Übertragungszeit eines Bits.

Die genaue Anzahl der maximal je Lichtleiterring zu bedienenden Antriebe ist von der für die gewählte Betriebsart erforderlichen Zykluszeit, dem Datenumfang sowie der möglichen Bruttodatenrate abhängig. Außerdem können die antriebs- und steuerungsinternen Reaktions- und Verarbeitungszeiten einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbare Kommunikationsleistung haben.

Initialisierungsprozedur und Kommunikationsphasen

Alle Kommunikationsparameter werden in der fünf Phasen umfassenden Initialisierungsprozedur des Systems bestimmt und ausgetauscht. Der Master gibt durch das Aussenden eines Mastersynchrontelegramms (MST) in äquidistanten Zeitabständen die Kommunikationszykluszeit vor. Es enthält nur ein einziges Datenbyte, welches die gerade aktuelle Kommunikationsphase (0 bis 4) enthält. Möglich sind Zykluszeiten von 62,5 µs, 125 µs, 250 µs, 500 µs und jedem ganzzahligen Vielfachen von 1 ms (max. 65 ms). Das MST wird von

allen Slaves empfangen und startet dort die Zeitzähler für die Übertragungszeitpunkte. Während Phase 0 prüft der Master durch Aussenden des MST, ob der Glasfaserring geschlossen ist. In den Phasen 1 und 2 sendet der Master zusätzlich zum MST ein Masterdatentelegramm (MDT) mit nur einem Datensatz, welcher noch keine zyklischen Daten enthält. Durch die Angabe einer individuellen Slaveadresse selektiert der Master nacheinander jeden einzelnen Slave, um die Antriebe zu identifizieren und Kommunikationsparameter zu übertragen. Jeder Slave antwortet jeweils mit einem Antriebstelegramm (AT), das ebenfalls noch keine zyklischen Daten enthält. Das System ist anschließend bereit, in den zyklischen Betrieb zur Übertragung von Echtzeitdaten umzuschalten. Die Zykluszeit und die Sendezeitschlitze unterliegen in diesen Phasen noch schwachen Anforderungen.

In Phase 3 werden zunächst weitere Parameter übertragen und letzte Überprüfungen vorgenommen. Die zyklischen Daten besitzen noch keine Gültigkeit. Darauf folgt die zyklische Betriebsphase 4. Übergänge zwischen den einzelnen Phasen sind nur in aufsteigender Reihenfolge zulässig (0–1, 1-2, 2-3, 3-4). Im Falle eines fatalen Kommunikationsfehlers wird jedoch in die Phase 0 zurückgeschaltet und es folgt eine erneute Initialisierungsphase.

Die Reihenfolge der genannten Synchron- und Datentelegramme wiederholt sich in jedem Kommunikationszyklus. Durch das starre Kommunikationsprotokoll wird eine hohe zyklische Kommunikationsleistung erreicht. Sie wird jedoch auf Kosten einer geringfügig eingeschränkten Flexibilität erkauft. So ist beispielsweise eine direkte Kommunikation zwischen den Slaves nicht möglich.

Übertragung zyklischer Daten

Im MDT werden als zyklische Daten die Sollwertdaten und das Steuerwort an den Antrieb übermittelt. Der Antrieb antwortet mit dem AT, welches die zyklischen Istwertdaten und den Antriebsstatus enthält. Je nach Betriebsart des Achsreglers als Lage-, Geschwindigkeits- oder Momentenregler und je nach Konfiguration durch den Anwender werden die entsprechenden Soll- und Istwerte ausgetauscht. Enthält der Achsregler beispielsweise die gesamte Lageregelung, so muss die NC lediglich die Positionssollwerte (x_{soll}, y_{soll}, …) vorgeben. Für die Vorsteuerung kann als additiver Sollwert ein Drehzahlaufschaltwert ($n_{x,auf}$, $n_{y,auf}$, …) übertragen werden. Eine Übertragung der Istgrößen ist prinzipiell nicht erforderlich, kann jedoch zusätzlich für Überwachungs- oder Anzeigezwecke erfolgen. Durch ein Steuerwort gibt die NC die Betriebsart des Achsreglers vor. Dadurch ist z. B. der Wechsel zwischen Positions- und Geschwindigkeitsregelung des Antriebs auch während des Betriebs möglich. Im Statuswort meldet der Antrieb der NC Zustandsänderungen (z. B. Abschaltung, Überlast) sowie die aktuelle Betriebsbereitschaft.

Übertragung von Bedarfsdaten

Durch die azyklische Datenübertragung wird die Anzeige und Eingabe praktisch beliebiger antriebsinterner und weniger zeitkritischer Daten-, Parameter- und Diagnoseinformationen über das NC-Bedienfeld ermöglicht. Die Übertragung der Bedarfsdaten (z. B. Parameter und herstellerspezifische Daten jeglicher Art) wird auf mehrere aufeinanderfolgende Zyklen aufgeteilt und zusammen mit den zyklischen Daten übertragen. Für diesen Zweck ist das in den Datensätzen der Antriebstelegramme und Masterdatentelegramme übertragene Informationswort vorgesehen.

Der Master kann auf Anforderung der Steuerung Parameterdaten der Slaves lesen bzw. schreiben. Anforderung und Quittierung der azyklischen Daten werden durch sogenannte Handshake-Bits innerhalb des Kontroll- bzw. Statuswortes sichergestellt. Die NC kann z. B. Grenzwerte für jeden Antrieb vorgeben, Kommandos absetzen oder über Parameter die Antriebseigenschaften beeinflussen, z. B. Änderung der Reglerparameter oder Anpassung des Antriebs an unterschiedliche Messgeber. Der Antrieb kann das Erreichen bestimmter Achspositionen oder nähere Informationen über seinen Zustand (z. B. Motortemperatur) an die NC melden. Während der Initialisierung werden über den azyklischen Datenkanal die Übertragungseigenschaften festgelegt. Beispielsweise werden hier die Telegramminhalte vereinbart. Die NC kann außerdem beim jeweiligen Antrieb die unterstützten Daten und Kommandos abfragen.

2.2 Motoren in Vorschubachsen

2.2.1 Anforderungen an die Antriebseinheiten

Heute finden im Werkzeugmaschinenbau für Vorschubantriebe hauptsächlich Elektromotoren Anwendung. Diese sind in unterschiedlichsten Bauformen, Leistungsklassen und speziellen Eigenschaften hinsichtlich der Anwendung in Werkzeugmaschinen verfügbar. Die Antriebseinheiten von Werkzeugmaschinen mit Bahnsteuerungen müssen hohen Anforderungen genügen, da diese als Stellglied im Lageregelkreis die Bearbeitungsqualität wesentlich beeinflussen. Folgende Forderungen werden daher an die Antriebe gestellt:

- ruckfreier Lauf auch bei kleinsten Vorschubgeschwindigkeiten (geringe Drehmomentwelligkeit, winkelunabhängiges Moment, wegunabhängige Vorschubkraft),
- Eilganggeschwindigkeiten bis 120 m/min,
- Geschwindigkeit steuerbar im Verhältnis von mindestens 1 : 10 000 (je nach Auflösung des D/A-Umsetzers),
- Drehmoment an der Motorwelle von 5 bis 100 Nm bzw. Vorschubkraft von 500 bis 20.000 N,
- hohe Kurzzeitüberlastbarkeit bzw. hohes Impulsdreh-

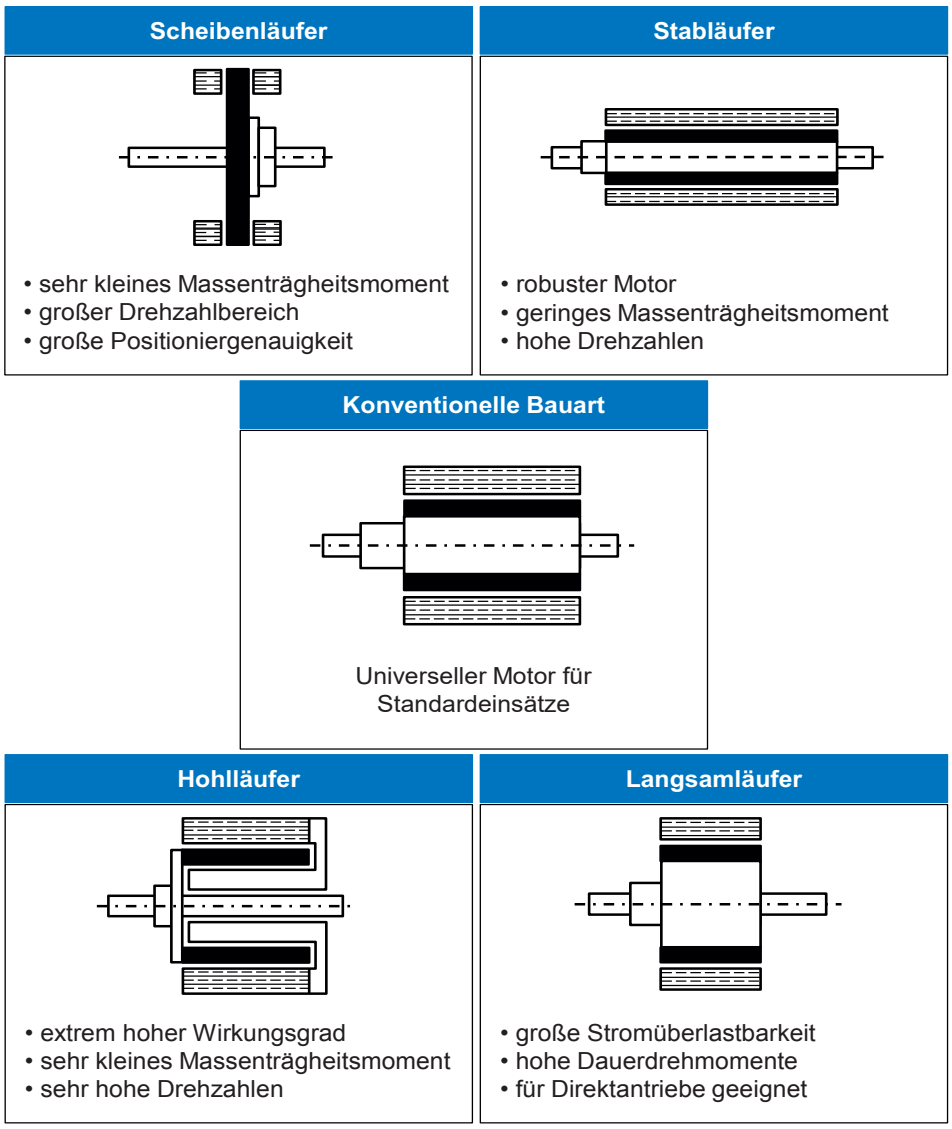
moment beim Beschleunigen und Abbremsen (kurzzeitig vier- bis zehnfach),
- möglichst hohes Beschleunigungsvermögen im gesamten Drehzahlbereich,
- hohe Positioniergenauigkeit, Ausführung kleinster Weginkremente (< 1 µm),
- hohe dynamische Güte, d. h. geringe Zeitkonstanten (Anregelzeit $T_{an} = 5$ ms bis 50 ms, Totzeit $T_t <$ Abtastzeit der NC-Steuerung), um möglichst geringe Anfahr- und Verzögerungszeiten zu erzielen,
- hohe Eckkreisfrequenz $\omega_E \geq 100$ bis 600 s^{-1}, wobei die untere Schranke bei großen Amplituden und die obere Schranke bei kleinen Amplituden gefordert wird, damit sowohl ein hochdynamisches Bahnfahren als auch ein genaues Positionieren möglich ist,
- geringes Bauvolumen und Gewicht,
- geringe Verlustleistung (Erwärmung),
- hohe Zuverlässigkeit.

Die genannten Forderungen lassen sich mit speziell für hochdynamische Antriebe entwickelten Elektro- und Hydraulikmotoren in Verbindung mit geeigneten Regel- und Steuereinrichtungen verwirklichen. Derart optimierte Motoren werden als Servomotoren bezeichnet.

Bei den (rotatorischen) Elektromotoren wird zwischen Gleichstrom-, Synchron-, Asynchron- und Schrittmotoren unterschieden. Daneben stellt der Linearmotor einen Antrieb dar, der nach den gleichen Arbeitsprinzipien eine translative Bewegung ausführt.

Kennzeichnend für Servomotoren sind die dynamischen Eigenschaften der Antriebe, wie geringe Masse bzw. geringes Trägheitsmoment, hohes Beschleunigungsvermögen sowie extrem gleichmäßiger Lauf auch bei kleinsten Drehzahlen bzw. Vorschubgeschwindigkeiten. Servomotoren werden in verschiedensten Sonderbauformen gefertigt. Die prinzipiell unterschiedlichen Bauarten rotatorischer Motoren sind in Bild 2.12 gegenübergestellt. Zur Verringerung der Massen

Bild 2.12 Bauarten von Servomotoren



der sich bewegenden Teile bieten sich unter anderem folgende Maßnahmen an:

- dünner, scheibenförmiger Rotor bei axialem Feldverlauf, kleines Läufergewicht, kurze Baulänge (Scheibenläufer),
- stabförmiger Rotor, schlanke Bauform, kleines Trägheitsmoment, Schnellläufer (Stabläufer),
- korbförmiger Rotor und zusätzlicher feststehender Statorkern (Hohlläufer).

Zur Realisierung von Direktantrieben mit großem Drehzahlbereich werden Langsamläufer mit vergleichsweise hohem Trägheitsmoment eingesetzt. Wegen der großen Masse weisen diese eine große Wärmekapazität auf. Sie sind daher zumeist kurzeitig hoch überlastbar und können ein großes Spitzenmoment abgeben.

Scheibenläufer

Scheibenläufermotoren (vgl. Bild 2.12 links oben) sind Gleichstromservomotoren mit Permanentfelderregung, in deren Luftspalt eine aus Isolationsmaterial bestehende Scheibe (Rotor) mit aufgeklebten Kupferleitern drehbar gelagert ist. Das von typischerweise acht bis zehn Polpaaren gebildete Magnetfeld breitet sich homogen im Inneren des Motors aus. Der magnetische Rückschluss erfolgt durch die Eisenteile des Motorgehäuses. Der Strom wird über Spezialkohlebürsten direkt auf die Leiterzüge übertragen. Durch die Wechselwirkung mit dem Magnetfeld wirkt auf die Läuferscheibe eine Kraft, sodass sich die Scheibe dreht.

Durch das Fehlen des Eisens im Anker wird nicht nur das Trägheitsmoment reduziert, es ergeben sich außerdem kleine Werte für die Ankerinduktion. Dadurch lassen sich große Stromanstiegsgeschwindigkeiten realisieren, sodass der Motor in wenigen Millisekunden auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt werden kann.

Stabläufer (Schnellläufer)

Stabläufer oder Minertia-Motoren (vgl. Bild 2.12 rechts oben) sind Gleichstromservomotoren mit stabförmigem Anker, die geringe Trägheitsmomente und ein hohes Beschleunigungsvermögen aufweisen. Auf die Motorwelle ist ein nutenloser Siliziumstahlblechkern als Träger der Ankerwicklung aufgepresst. Die Wicklung wird mit Glasfaserbandagen festgehalten.

Hohlläufer (Glockenankerläufer)

Beim Hohlläufermotor (vgl. Bild 2.12 links unten) sind die Ankerwicklungen auf einen glockenförmigen Wicklungskorb aufgebracht, der fest mit der Motorwelle verbunden ist. Im Gegensatz zum konventionellen Gleichstrommotor ist das Eisen des Ankers nicht Teil der Welle, sondern feststehend und bildet einen Teil des Gehäuses. Damit ergibt sich für den Rotor ein geringes Massenträgheitsmoment.

Langsamläufer

Servomotoren dieses Typs sind dauermagneterregte Gleichstrommotoren mit hoher Polzahl (vgl. Bild 2.12 rechts unten). Sie zeichnen sich durch hohe Drehmomente auch bei niedrigen Drehzahlen aus. Die dabei entstehende Verlustwärme wird von der hohen Wärmespeicherkapazität des großen Läufers aufgenommen. Der Motor eignet sich für den Direktantrieb von Vorschubspindeln. Die Drehzahl reicht zumeist bis maximal 3000 min^{-1}. Bedingt durch die Dauermagneterregung ist der Wirkungsgrad hoch.

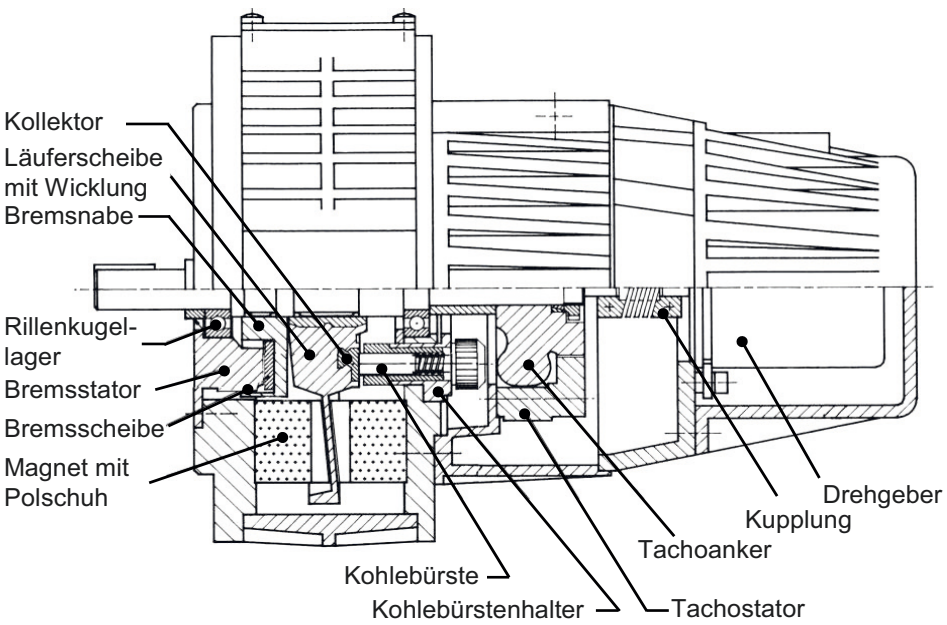


Bild 2.13 Aufbau eines Scheibenläufermotors mit Tacho und Drehgeber. Nach INFRANOR

2.2.2 Gleichstrommotoren

Fremderregte Gleichstrommotoren wurden lange als Hauptantriebe an Werkzeugmaschinen eingesetzt, da sie im geregelten Zustand eine hohe Drehsteifigkeit unter Last aufweisen und ihre Drehzahl in weiten Grenzen variiert werden kann. Heute haben sie ihre vorrangige Position bei den Haupt- und Vorschubantrieben an die Synchronmotoren verloren. Dennoch wird im Folgenden das Verhalten der Gleichstrommotoren beschrieben, da ihre Eigenschaften grundsätzlich auch für andere Motorengattungen gelten. Zum Betrieb einer Gleichstrommaschine ist eine elektrische Energiequelle erforderlich, die eine einstellbare Gleichspannung erzeugt.

Der prinzipielle Aufbau und das Schaltbild einer fremderregten Gleichstrommaschine sind in ◘ Bild 2.14 dargestellt. Im Maschinenständer (Stator) wird durch den Erregerstrom I_f ein magnetischer Fluss ϕ erzeugt, der über den Luftspalt den Anker (Rotor) durchdringt. In den Wicklungen des Ankers, im Bild als doppelte Leiterschleife senkrecht zur Zeichenebene dargestellt, fließt der Ankerstrom. Nach dem physikalischen Prinzip, dass ein Magnetfeld auf einen stromdurchflossenen Leiter eine Kraft ausübt, entsteht ein Drehmoment in der eingezeichneten Richtung. Damit die Richtung des Drehmomentes konstant bleibt (Rotation), muss die Richtung des Ankerstroms in dem jeweiligen Spulenteil nach einer halben Umdrehung des Läufers umgekehrt (kommutiert) werden. Dies geschieht mit Hilfe der Kollektorlamellen auf der Welle, die den Ankerstrom, der über Kohlebürsten zugeführt wird, mit wechselnder Richtung durch die Läuferwicklungen leiten, sodass ein räumlich stehendes Ankerfeld entsteht.

Bei realen Gleichstrommaschinen sind sowohl die Ständerwicklungen als auch die Läuferwicklungen über den Umfang verteilt, um ein gleichmäßiges Drehmoment zu erzeugen. ◘ Bild 2.14 (unten) zeigt in Form einer Abwicklung die Läuferwicklungen, ihre Anbindungen, die Kollektorlamellen und die Lage der Bürsten. Ein weiterer physikalischer Effekt ist mitbestimmend für das Verhalten der Gleichstrommaschine. Durch die Bewegung der Ankerwicklung im Ständerfeld wird im Ankerkreis eine Gegenspannung induziert, die proportional zur Drehzahl steigt und der Ankerspannung entgegengerichtet ist. Die Auswirkung dieses Effektes auf das Betriebsverhalten der Maschine wird im folgenden Abschnitt erläutert.

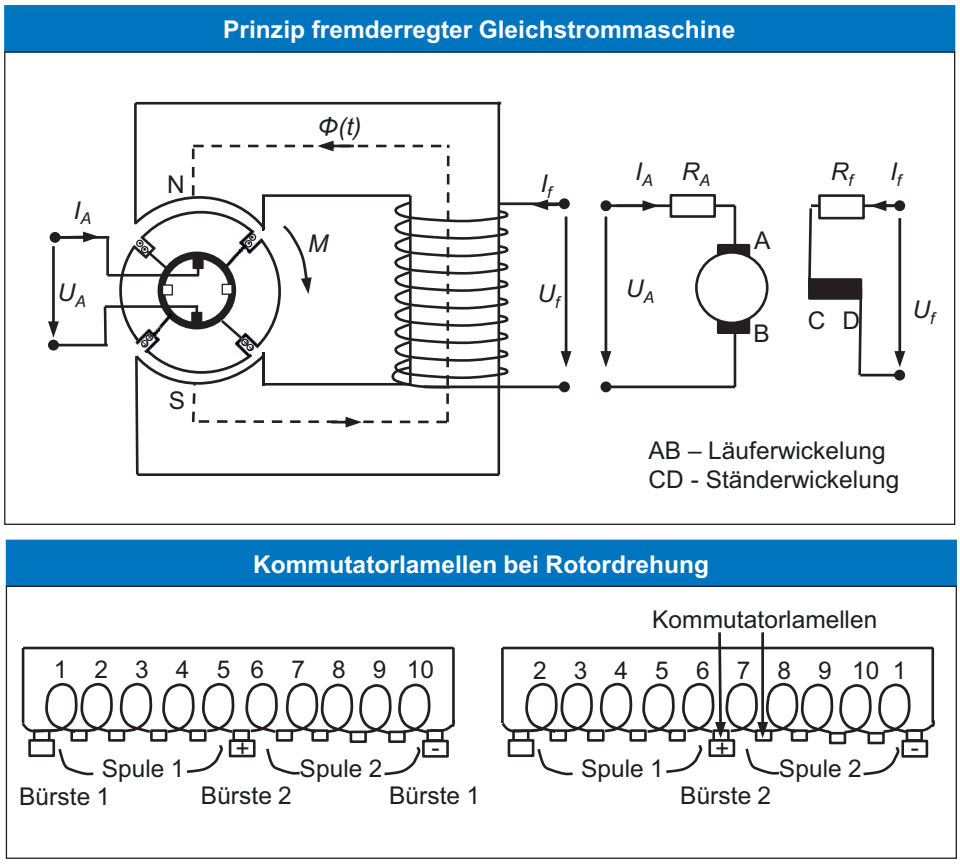
Grund- und Betriebsgleichungen

Die Grundgleichungen des Gleichstrommotors lauten:

$$U_i = k_1 \phi n \quad \text{induzierte Gegenspannung} \tag{2.1}$$

$$U_A = U_i + R_A I_A \tag{2.2}$$

Bild 2.14 Prinzip und Schaltbild der fremderregten Gleichstrommaschine



$U_A = k_1 \phi n + R_A I_A$ oder

$U_A = k_2 \phi \omega + R_A I_A$ mit $\omega = 2\pi n$ und $k_2 = k_1 \frac{1}{2\pi}$

$$M = k_2 \phi I_A = \frac{k_1}{2\pi} \phi I_A \tag{2.3}$$

Hierin sind U_A die Ankerspannung, R_A der Ohmsche Ankerinnenwiderstand, I_A der Ankerstrom und ϕ der durch die Erregerwicklung erzeugte magnetische Fluss. $U_i = k_1 \phi n$ ist die induzierte Gegenspannung des Motors und k_1, k_2 sind motorspezifische Konstanten, die sich aus dem Aufbau, der Größe und der Wicklungsanordnung der jeweiligen Maschine ergeben. Dabei besteht der Zusammenhang $k_1 = 2\pi k_2$. Beim Anfahren ($n = 0$) gilt für die induzierte Gegenspannung U_i:

$$n = 0 \rightarrow U_i = k_1 \phi n = 0 \tag{2.4}$$

Es fließt der höchste Ankerstrom I_{Amax}, der gemäß Gleichung (2.2) nur durch den Innenwiderstand des Ankers begrenzt ist:

$$n = 0 \rightarrow I_{A\max} = \frac{U_A}{R_A} \tag{2.5}$$

Entsprechend groß ist das Motormoment beim Anfahren

$$M = k_2 \phi I_{A\max} = k_2 \phi \frac{U_A}{R_A} \tag{2.6}$$

zur Beschleunigung von Rotor und angekoppelter Last. Proportional zur steigenden Drehzahl wächst die induzierte Gegenspannung gemäß Gleichung (2.1), bis sie den Wert der angelegten Ankerspannung, reduziert um den lastabhängigen Ankerspannungsverlust ($I_A R_A$), erreicht. Für den Leerlauf des Motors (ohne Reibungsverluste) ergibt sich aus Gleichung (2.3):

$$M = 0 \rightarrow I_A = 0 \tag{2.7}$$

Für den Ankerstrom $I_A = 0$ gilt nach Gleichung (2.2) für die Leerlaufdrehzahl n_0:

$$U_A = U_i \rightarrow n_0 = \frac{1}{k_1 \phi} U_A \tag{2.8}$$

Für den Betrieb ergibt sich aus Gleichung (2.2) und Gleichung (2.3) die lastabhängige Drehzahlgleichung des ungeregelten Gleichstrommotors:

$$n = \frac{U_A}{k_1 \phi} - \frac{R_A}{k_1 k_2 \phi^2} M \tag{2.9}$$

Dieser Zusammenhang ist in Form des Drehzahl-Drehmoment-Kennlinienfeldes in Bild 2.15 gezeigt, wobei auch der Übergang in den Generatorbetrieb dargestellt wird. Wie man Gleichung (2.9) entnehmen kann, bestehen zwei Möglichkeiten die Drehzahl des Gleichstrommotors zu verändern.

Zunächst verstellt man im Drehzahlbereich $n = 0$ bis n_0 die Ankerspannung U_A bei maximalem Erregerfeld ϕ_{max}. Für eine weitere Drehzahlerhöhung über n_0 hinaus wird das Feld ϕ geschwächt. Der belastungsabhängige (M) Drehzahlabfall wird durch den zweiten Term in Gleichung (2.9) bestimmt:

$$\frac{R_A}{k_1 k_2 \phi^2} M$$

Er wird durch die Verlustleistung des Ankerwiderstandes R_A hervorgerufen. Die negativen Steigungen der Geraden 1 bis 3 sind parallel, da $\phi = \phi_{max}$ konstant eingestellt ist. Im Drehzahlbereich der Feldschwächung $n > n_0$ wird die Feldstärke ϕ reduziert. Somit ändert sich die Steigung der Lastgeraden 4 und 5 mit $\frac{1}{\phi_i}$. Das heißt, der lastabhängige Drehzahlabfall nimmt zu.

Drehzahlverstellung und Belastungsgrenzen

Die Einstellung der Drehzahl einer Gleichstrommaschine kann mit Hilfe der Ankerspannung U_A (Anker- oder Primärverstellung) oder des magnetischen Flusses ϕ (Feld- oder Sekundärverstellung) (Bild 2.16) erfolgen. Entsprechend Gleichung (2.9) bewirkt dabei eine Vergrößerung der Ankerspannung eine Erhöhung der Drehzahl. Dagegen führt eine Erhöhung des Flusses φ zu einer Verminderung der Drehzahl. In beiden Verstellbereichen ergeben sich unterschiedliche Belastungsgrenzen, die anhand von Bild 2.16 erläutert werden sollen. In der oberen Bildhälfte sind die beiden Einstellgrößen, Ankerspannung und magnetischer Fluss, über der Drehzahl aufgetragen, im unteren Teil die dazugehörende Kennlinienschar $M(n)$ sowie die Grenzkennlinien für das Lastmoment M_{max} und den zulässigen Ankerstrom I_{Amax}.

Ebenfalls eingetragen sind die Grenzen für die maximal verfügbare Leistung P_{mech} an der Motorwelle und die dabei aus dem Netz aufgenommene elektrische Leistung P_{max}. Der maximal zulässige Dauerankerstrom (Einschaltdauer ED = 100 %), der durch die thermische Belastbarkeit der Wicklung und bei höheren Drehzahlen durch den Kommutator (Bürstenfeuer) begrenzt ist, wird in beiden Bereichen als konstant angenommen:

$$I_{A\max} = konst \neq f(n) \tag{2.10}$$

Kurzzeitige Überlastungen sind je nach Wärmekapazität des Läufers und Ausgangstemperatur möglich. Das sogenannte Bürstenfeuer bezeichnet eine Funkenbildung an den Kanten

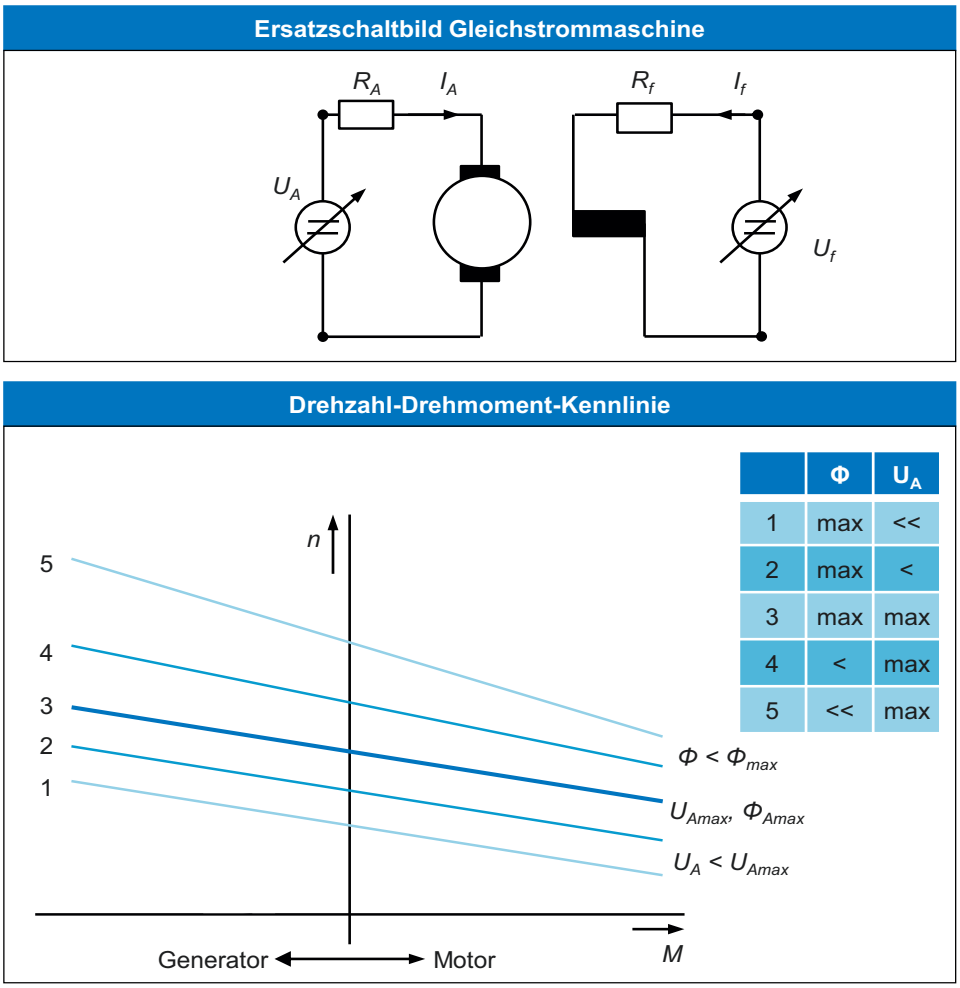


Bild 2.15 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie. Nach [HENN99]

der Kohlebürsten. Diese Erscheinung resultiert aus einer selbstinduzierten Spannung, die den Stromübergang von einer Lamelle zur nächsten verlangsamt und ab einer gewissen Stärke die Funken erzeugt.

Die Ankerverstellung deckt den Bereich kleiner bis mittlerer Drehzahlen bei hoher Momentenbelastung des Motors ab. Die maximal eingestellte Erregung garantiert dabei die höchstmögliche Drehsteifigkeit.

$$U_{A\min} \le U_A \le U_{A\max} \tag{2.11}$$

$$\phi = \phi_{\max} = konst \tag{2.12}$$

Aus Gleichung (2.2) und Gleichung (2.9) folgt für die Abhängigkeit der Drehzahl von der Ankerspannung:

$$n = \frac{U_A}{k_1\phi_{\max}} - \frac{R_A I_A}{k_1\phi_{\max}} = \frac{U_A}{k_1\phi_{\max}} - \frac{R_A M}{k_1 k_2 \phi_{\max}^2} \tag{2.13}$$

Da der magnetische Fluss im Ankerverstellbereich konstant ist (Gleichung (2.12)) ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Drehzahl von der anliegenden Ankerspannung. Die Drehzahl wird um einen lastabhängigen Anteil vermindert:

$$n \sim U_A - CM \tag{2.14}$$

Das grundsätzlich zulässige Dauerbelastungsmoment M_{max} folgt unmittelbar aus der Gleichung (2.3):

$$M_{\max} = k_2 \phi_{\max} \mathrm{I}_{max} \tag{2.15}$$

Auf Grund der Voraussetzungen aus Gleichung (2.10) und Gleichung (2.12) ergibt sich ein konstantes maximales Belastungsmoment. Zur Ermittlung der aufgenommenen maximalen elektrischen Dauerleistung wird die Gleichung (2.2) mit I_{Amax} multipliziert:

$$P\max = U_A I_{A\max} = k_1\phi_{\max} n \mathrm{I}_{max} + R_A I_{\max}^2 \tag{2.16}$$

Dies entspricht der Leistungsbilanz:

$$P_{\max} = P_{mech} + P_{verl} \tag{2.17}$$

$$P_{max} = \omega M_{max} + R_A I_{A\,max}^2 \tag{2.18}$$

Dabei ist P_{verl} die von der Drehzahl unabhängige, in Wärme umgesetzte, lastabhängige, elektrische Verlustleistung. Mechanische Verluste durch Lager- und Luftspaltreibung sowie die Lüfterleistung sind hierbei nicht berücksichtigt. Die an der Welle verfügbare maximale mechanische Leistung P_{mech} und die aus dem Netz maximal aufnehmbare elektrische Leistung steigen linear mit zunehmender Drehzahl an. Die Grenze U_{Amax} des Primärverstellbereiches ist durch die Spannungsfestigkeit der Wicklungsisolation gegeben.

Die Feldverstellung wird angewendet, um höhere Drehzahlen zu erzielen als sie bei der Primärverstellung erreichbar sind. Dabei tritt allerdings, wie im Folgenden gezeigt wird, eine zunehmende Verminderung der Drehsteifigkeit und des zulässigen Belastungsmomentes auf. Für die Stellgrößen gilt im Feldverstellbereich:

$$U_A = U_{A\,max} = konst, \tag{2.19}$$

$$\phi_{min} \le \phi \le \phi_{max} \tag{2.20}$$

Aus Gleichung (2.2) folgt für die Abhängigkeit der Drehzahl vom magnetischen Fluss ϕ:

$$n = \frac{1}{k_1 \phi}(U_{A\,max} - R_A I_A) \sim \frac{1}{\phi} \tag{2.21}$$

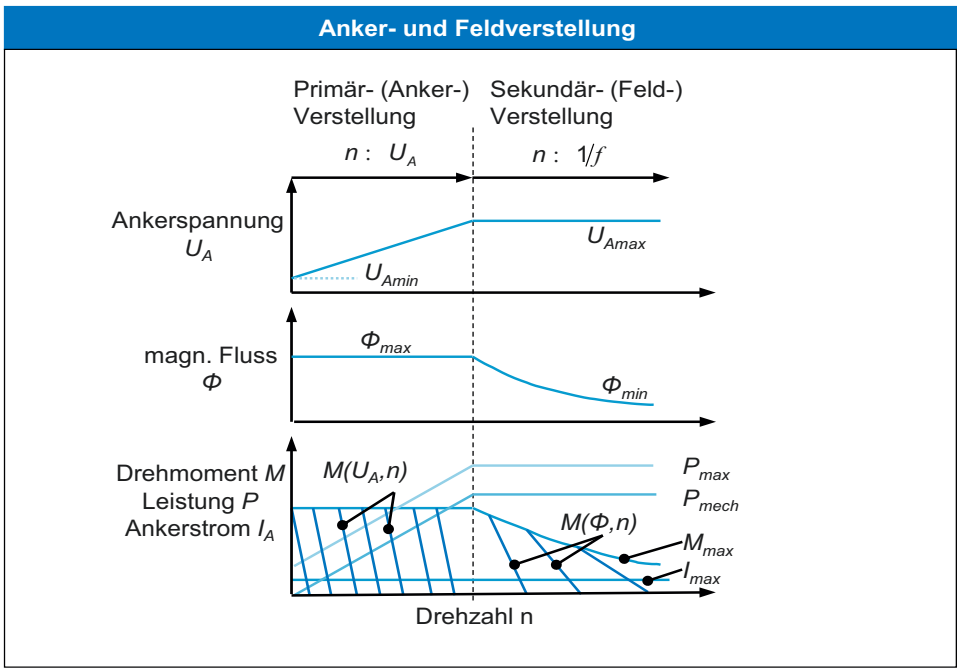
Unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Lastmomentes gilt entsprechend Gleichung (2.9):

$$n = \frac{U_{A\,max}}{k_1 \phi} - \frac{R_A}{k_1 k_2 \phi^2} M \tag{2.22}$$

Im Gegensatz zur Primärverstellung, bei der das Steigungsmaß der Kennlinien

$$-\frac{R_A}{k_1 k_2 \phi_{max}^2}$$

konstant ist, ergibt sich bei der Sekundärverstellung keine parallele Kennlinienschar $M(n)$. Mit abnehmendem Fluss verlaufen die Kennlinien $\frac{1}{\phi^2}$ flacher, d. h. der Motor wird „weicher“, ◘ Bild 2.15 und ◘ Bild 2.16. Das maximal zulässige Dauerbelastungsmoment nimmt mit zunehmender



◘ **Bild 2.16** Primär- und Sekundär-Drehzahlverstellbereich

Übliche Werte

$$\frac{U_{A\,min}}{U_{A\,max}} = \frac{1}{50}$$

$$\frac{\phi_{A\,min}}{\phi_{A\,max}} = \frac{1}{4}$$

Lastkennlinien

$$n = \frac{U_A}{k_1 \phi} - \frac{R_A}{k_1 k_2 \phi} M$$

oder

$$M(n) = \frac{U_A}{R_A} k_2 \phi - \frac{k_1 k_2 \phi^2}{R_A} n$$

Grenzwerte

$$I_{A\,max} = konst$$

$$M_{max} = k_2 \phi I_{A\,max}$$

$$P_{max} = P_{mech,max} + P_{verl,max} = 2\pi n M_{max} + R_A I_{A\,max}^2$$

$$P_{verl,max} = R_A I_{A\,max}^2 = \frac{R_A M_{max}^2}{k_2^2 \phi^2}$$

Drehzahl entsprechend der Verminderung des Flusses ab:

$$M_{max} = k_2 \phi I_{A\,max} \sim \phi \tag{2.23}$$

Entsprechend Gleichung (2.16) gilt für die Leistung:

$$P_{max} = U_{A\,max} I_{A\,max} = k_1 \phi I_{A\,max} n + R_A I^2_{A\,max} \tag{2.24}$$

$$P_{max} = konst \tag{2.25}$$

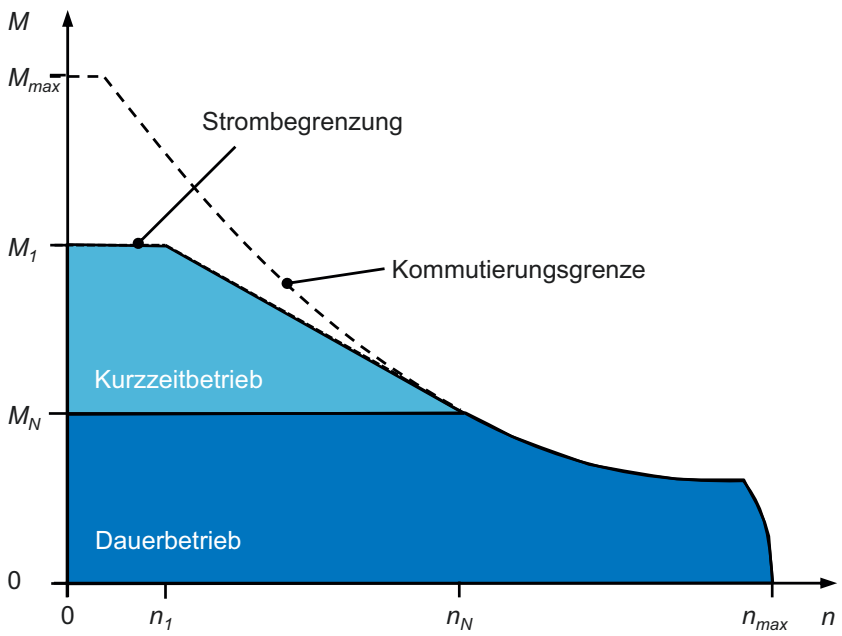
$$P_{verl,max} = konst \tag{2.26}$$

Um die Drehsteifigkeit der Hauptantriebe vor allem im Feldverstellbereich zu verbessern, werden sie heute in vielen Fällen mit einer Drehzahlregelung angeboten. Ein Tachogenerator oder ein inkrementaler Drehgeber misst hierzu die Ist-Drehzahl. Ankerspannung und/oder Erregerstrom werden in ihrer Eigenschaft als Stellgröße so weit verändert, bis die Regelabweichung null ist, d. h. die Ist-Drehzahl der Soll-Drehzahl entspricht. Um die Wirbelstromverlustwärme durch die Stromrichterspeisung gering zu halten, sind die Anker- und Ständerwicklungskerne oft aus isolierten Blechen aufgebaut. Außer der fremderregten Gleichstrommaschine, bei der Anker- und Erregerwicklung getrennt gespeist werden, sind auch andere Schaltungsarten (Nebenschluss, Hauptschlussschaltung) gebräuchlich, die jedoch für den Werkzeugmaschinenbau von geringer Bedeutung sind. Als Vorteile des Gleichstrommotors sind zu nennen: Relativ gute Dynamik, hohe Gleichlaufgüte, geringe Geräuschentwicklung, großer Drehzahlstellbereich und einfache Ansteuerung. Dem gegenüber stehen als Nachteile der Wartungsaufwand der Bürsten, das Bürstenfeuer – weshalb dieser Motor nicht in explosionsgefährdeter Umgebung eingesetzt werden kann – sowie die Drehzahlbegrenzung durch die „mechanische Kommutierung". Hierdurch wird die Dynamik des Motors prinzipbedingt begrenzt, da über die Bürsten und Kollektoren nur ein bestimmter Strom ohne Beschädigung der Kontaktelemente fließen darf.

Aus diesen Gründen begann schon vor Jahren die allmähliche Ablösung des Gleichstrommotors durch den Drehstrommotor. Bei den beiden verwendeten Motorprinzipien Synchron- und Asynchronmaschine treten die oben genannten Probleme aufgrund einer „elektronischen Kommutierung" nicht auf.

Kennlinie und Strombegrenzung

Da die Stromübertragung beim Gleichstrommotor über Bürsten auf den Kollektor erfolgt, existiert bei diesem Motortyp eine natürliche Grenze für den maximal übertragbaren Strom, der gerade noch ohne Beschädigung der Kontaktelemente übertragen werden kann. Der prinzipielle Verlauf dieser sogenannten „Kommutierungsgrenze" ist im Bild 2.17 dargestellt. Der maximal zulässige Kommutierungsstrom ist drehzahlabhängig und nimmt umgekehrt proportional zur Drehzahl ab. Um Beschädigungen



M	Drehmoment	M_{max}	maximales Moment
n	Drehzahl	n_1	Kenndrehzahl aufgrund der Strombegrenzung
M_N	Nennmoment		
M_1	Belastungsmoment bei Strombegrenzung	n_N	Nenndrehzahl
		n_{max}	maximale Drehzahl

Bild 2.17 Motorkennlinie und Verlauf einer drehzahlabhängigen Strombegrenzung für einen Gleichstrommotor

der Kontaktelemente zu vermeiden, wird im Allgemeinen eine drehzahlabhängige Strombegrenzung im Servoverstärker integriert. Dies führt dazu, dass das Verhältnis von maximal verfügbarem Moment zum Nennmoment effektiv kleiner wird. Die Motorkennlinie stellt den Nennbetrieb dar. Alle Ströme oberhalb dieser Linie liegen im Überlastbereich des Motors und dürfen nur kurzzeitig erreicht werden.

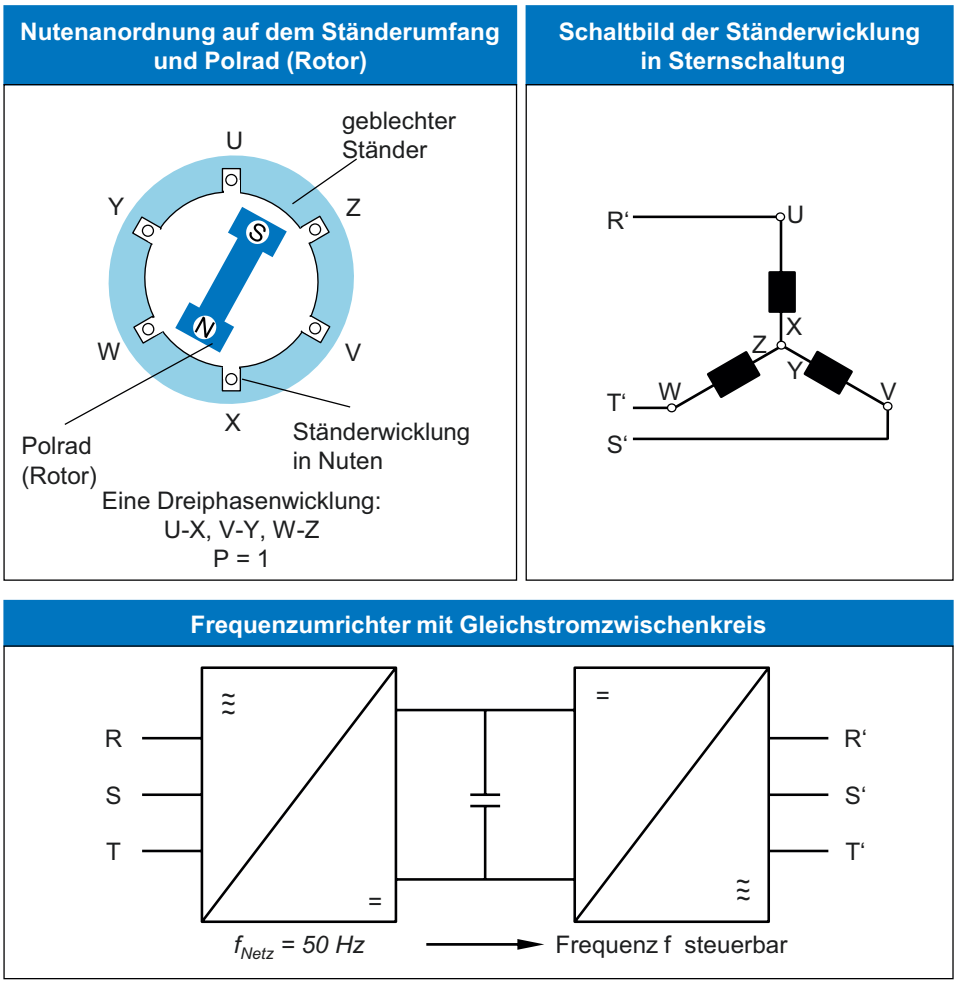
2.2.3 Synchronmotoren

Im Gegensatz zur Gleichstrommaschine wird bei der Synchronmaschine das magnetische Erregerfeld durch die rotierende Komponente, den Läufer, erzeugt. Bei einer Drehung des Läufers mit einer Winkelgeschwindigkeit ω entsteht auch im Luftspalt zwischen Ständer und Läufer ein Drehfeld mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit. Zur Erzeugung eines stationären Drehmomentes muss auch die Ständerwicklung ein Drehfeld erzeugen. Dieses wird durch eine geeignet angeordnete Drehstromwicklung realisiert und ist proportional zur angelegten Frequenz der Speisespannung. Die im Bereich Werkzeugmaschinen und Industrieroboter eingesetzten Synchronmaschinen sind ausnahmslos permanenterregte Synchronmotoren. ◘ Bild 2.18 zeigt hierzu den prinzipiellen Aufbau.

Der Läufer trägt je nach Polpaarzahl mehrere Permanentmagnete, die für ein konstantes Ankerfeld sorgen. Die Spulen im Stator werden entsprechend der Winkelstellung des Rotors (magnetische Flussrichtung durch den Stator) mit Strom in der für die Drehmomentrichtung und -höhe erforderlichen Amplitude beaufschlagt. Entsprechend dem Lorentz-Prinzip entsteht eine Kraft zwischen den Spulen (Stator) und dem Feld (Rotor). Die Kommutierung wird durch die Stromrichtungsänderung im Stator erreicht, ohne dass Bürsten und Kollektoren wie im Gleichstrommotor erforderlich sind. Der Rotor dreht sich mit der Frequenz der Speisespannung (synchrone Drehzahl n_S):

$$n_S = f \tag{2.27}$$

Ist der Läufer mehrpolig (p Polpaare) ausgeführt, verringert sich die synchrone Drehzahl entsprechend:



◘ **Bild 2.18** Drehzahlsteuerung der Synchronmaschine

$$n_S = \frac{f}{p} \tag{2.28}$$

Um bei der Synchronmaschine unterschiedliche Drehzahlen einzustellen, ist eine Frequenzumrichtung des speisenden Netzes erforderlich. In Bild 2.18 ist schematisch der vom Drehstromnetz betriebene Umrichter dargestellt. Die 50-Hz- Netzspannung mit den Phasen R, S, T wird zunächst gleichgerichtet und in einem Energiespeicher (Kondensator, Drossel) im Zwischenkreis gespeichert. Aus der Gleichspannung generiert der nachfolgende Wechselrichter ein Dreiphasensystem R', S', T', dessen Frequenz f einstellbar ist. Die Steuerung des den Ständerwicklungen zugeführten Stroms muss dabei in Abhängigkeit von der Rotorwinkelstellung (Stromrichtung) und dem abverlangten Moment (Stromstärke) vorgenommen werden („elektronische Kommutierung“). Die drei Ständerwicklungen einer Drehstromsynchronmaschine sind wie in Bild 2.18 links oben in den Nuten des Ständers angeordnet. Die Synchronmotoren weisen eine gegenüber dem Gleichstrommotor höhere Dynamik auf, da die Kommutierungsgrenze entfällt und sie somit kurzzeitig auch bei hohen Drehzahlen mit höheren Strömen beaufschlagt werden können. Im Bereich der Werkzeugmaschinen wird der Synchronmotor hauptsächlich als Vorschubantrieb eingesetzt.

Speisungsarten und Funktionsprinzip

Grundsätzlich wird bei Synchronmotoren zwischen der Speisung mit sinusförmigen und blockförmigen Strömen unterschieden Bild 2.19. Der Vorteil der Speisung mit blockförmigen Strömen liegt in der einfacheren Signalverarbeitung und in der Verwendung eines einfachen Gebers zur Lageerfassung des Rotors. Der nur mit drei Sensorelementen ausgestattete Geber erkennt jeweils die Anfangspunkte für die *U*-, *V*- und *W*-Speisung. In Sonderfällen kann auf den Lagegeber vollständig verzichtet werden, falls die Rotorlage aus der induzierten Gegenspannung in den zeitweise nicht bestromten Phasen berechnet wird. Für die Speisung mit sinusförmigen Strömen werden aufwendigere, zyklisch arbeitende Geber zur genauen Erfassung der absoluten Rotorstellung eingesetzt. Allgemein kann die Speisung mit sinusförmigen Strömen eine Dämpfung der Oberwellen bewirken und daher eine hohe Gleichlaufgüte beim Antrieb erzielen. Durch den Fortschritt in der Leistungselektronik und bei absolut arbeitenden Rotorlagegebern wird bei Neuentwicklungen heute nur noch die Sinusansteuerung angewandt.

Im Bild 2.19 sind die beiden Speisungsarten gegenübergestellt. Die oberen drei Diagramme zeigen jeweils die Verläufe von Luftspaltinduktion *B*, Spannung und Strom im Strang *u* für beide Speisungsarten. Die Verläufe in den beiden anderen Wicklungssträngen ergeben sich aus diesem Verlauf durch eine Phasenverschiebung von 120° (Strang *v*)

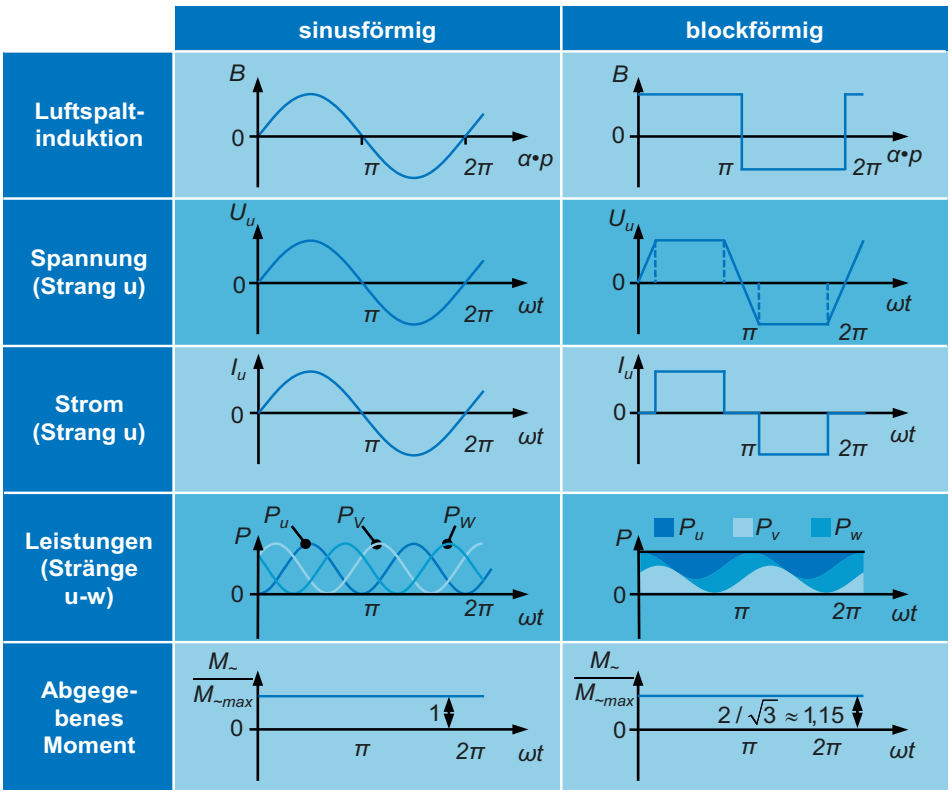


Bild 2.19 Speisungsarten für permanenterregte Synchronmotoren

bzw. 240° (Strang *w*). Darunter wird die Überlagerung der Leistungen in den einzelnen Strängen dargestellt. Sowohl bei der sinusförmigen als auch bei der blockförmigen Speisung ergibt sich insgesamt eine konstante Leistungsabgabe des Motors. Bei der blockförmigen Speisung haben die Blöcke ein Impuls-Pausenverhältnis von 120°: 60° und eine Phasenverschiebung von jeweils 120° gegeneinander, sodass zu jedem Zeitpunkt genau zwei Stränge bestromt sind. Der Motor gibt ein konstantes Moment ab. Der trapezförmige Verlauf der induzierten Spannung folgt aus einer Schrägung der Nuten, die zur Vermeidung von Drehmomentwelligkeiten vorgenommen wird.

Im ◘ Bild 2.20 ist die sinusförmige Speisung des Synchronmotors noch einmal für alle Stränge einzeln dargestellt. Als Beispiel dient ein sechspoliger Motor. Sechspolig ($p = 3$, p: Polpaarzahl des Motors) bedeutet, dass die Speisefrequenz in den Strängen dreimal so hoch ist wie die Motordrehzahl. In Rotorstellung 0° wird Strang *v* in positiver Richtung und Strang *w* in negativer Richtung vom Strom durchflossen, während Strang *u* stromlos ist. In Stellung 30° wird Strang *u* positiv und die Stränge *v* und *w* negativ bestromt. Die in dieser Weise zeitlich geschalteten Stromrichtungen in den Ständerwicklungen erzeugen auf dem magnetisierten Rotor ein gleichsinniges Drehmoment, das den Rotor im Uhrzeigersinn in Bewegung setzt. Die Speisung der Stränge wird der Rotorstellung nachgeführt. Jede Strangspeisung erfolgt bei dem sechspoligen Motor sinusförmig und jeweils um 60° bzw. 120° in der Phase verschoben. Die Verläufe der induzierten Spannung in den einzelnen Strängen bzw. an den Anschlussklemmen sind ebenfalls im ◘ Bild 2.20 dargestellt.

◘ Bild 2.21 zeigt einen Synchronmotor und den Aufbau einer Rotorwelle mit der Polpaarzahl $p = 5$. Jeder Pol ist aus Segmenten in axialer Richtung aufgebaut, die nebeneinander angeordnet sind. Die Segmente setzen sich wiederum aus Plättchen zusammen, die die Krümmung des Rotorumfangs mit einfachen Elementen nachbilden. Als Magnetwerkstoff werden Aluminium-Nickel-Cobalt (AlNiCo), Samarium-Cobalt (SmCo), Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) und Ferrit verwendet. ◘ Bild 2.22 zeigt den typischen Aufbau eines Synchronmotors.

Ein besonderes Problem bei den meisten Synchronmotoren ist es, ein gleichförmiges, von der Rotorlage unabhängiges Drehmoment zu entwickeln. Oberwellen in der Feldkurve und in der Verteilung des Strombelags können zu Pendelmomenten führen, die beim Positioniervorgang des Antriebs störend wirken. Als Maßnahme bietet sich eine Nutschrägung an, die zumeist im Ständer vorgenommen wird. Weiterhin kann durch eine Erhöhung der Polpaarzahl bei der Wicklung eine Beeinflussung der Oberwellen im Strombelag erreicht werden.

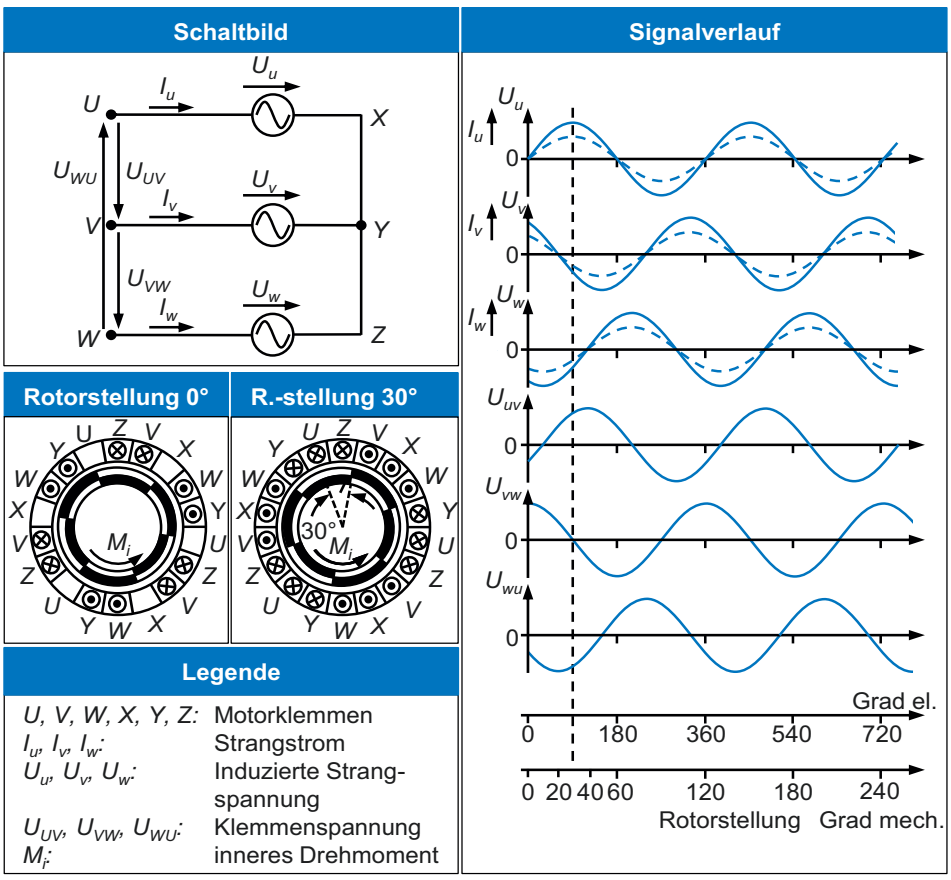


Bild 2.20 Funktionsprinzip und sinusförmige Speisung des permanenterregten Synchronmotors. Nach Bosch Rexroth

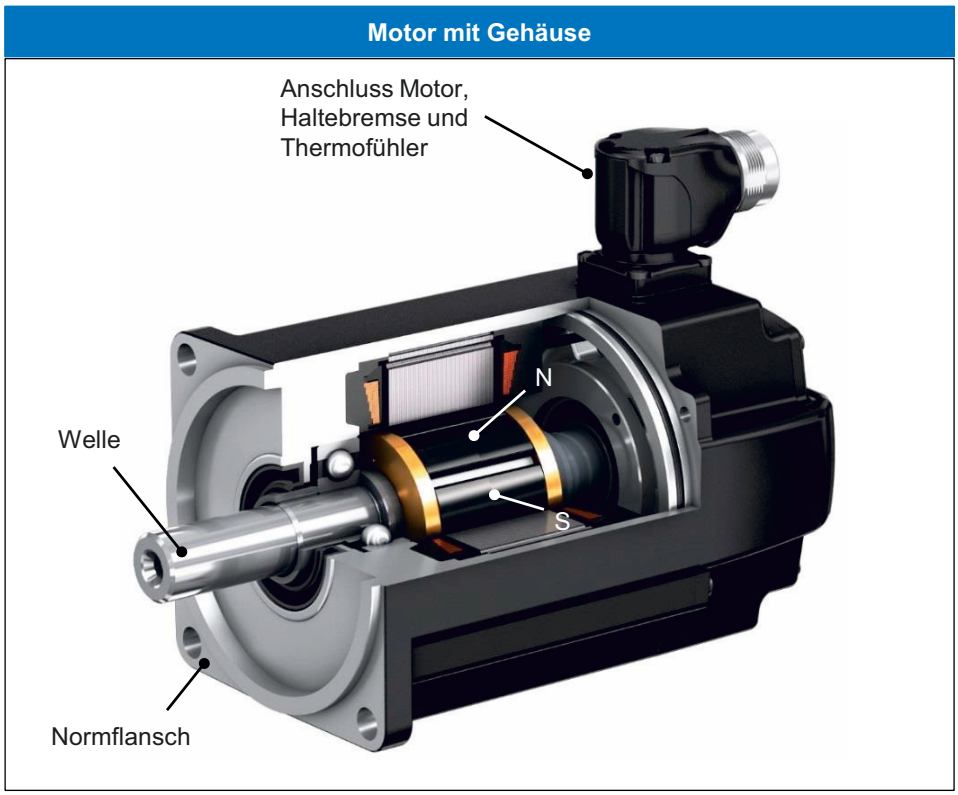


Bild 2.21 Synchronmotor und Rotorwelle mit 5 Polpaaren. Nach Bosch Rexroth

Ersatzschaltbild und Grundgleichungen des Synchronmotors

Im vorherigen Abschnitt wurde bereits das dreiphasige Ständerstromsystem eingeführt (vgl. auch Bild 2.20). Um eine einfachere Berechnung der Ströme und den daraus resultierenden Motormomenten zu ermöglichen wird im Allgemeinen eine Transformation der Ströme bezogen auf ein mit dem Ständerfluss rotierenden Koordinatensystem durchgeführt.

In Bild 2.23 ist die Transformation der Statorströme im Ständer eines Synchronmotors verdeutlicht. Hierbei kann die Umrechnung vom tatsächlichen dreiphasigen Ständerstromsystem (i_u, i_v, i_w) auf ein äquivalentes zweiphasiges System (i_{sa}, i_{sb}) im Koordinatensystem des ruhenden Stators durch eine Transformationsrechnung durchgeführt werden. Die drei Ströme (i_u, i_v, i_w) sind linear abhängig, $i_w = -i_u - i_v$, weswegen T_{32} nur eine 2×2-Matrix ist. In die Umrechnung von (i_{sa}, i_{sb}) auf das rotierende Koordinatensystem des Ständerflusses mit den Strömen (i_{sd}, i_{sq}) geht der sich zeitlich ändernde Winkel $\varphi_{(t)}$ zwischen den Koordinatensystemen ein:

$$\begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{pmatrix} = T_{32} \cdot \begin{pmatrix} i_u \\ i_v \end{pmatrix}, \text{ mit } T_{32} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \sqrt{2} \end{pmatrix} \tag{2.29}$$

$$\begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} = T_{\varphi} \cdot \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{pmatrix}, \text{ mit } T_{\varphi} = \begin{pmatrix} \cos\varphi(t) & \sin\varphi(t) \\ -\sin\varphi(t) & \cos\varphi(t) \end{pmatrix} \tag{2.30}$$

Die Rücktransformation erfolgt mit der jeweiligen Inversen der Transformationsmatrix:

$$\begin{pmatrix} i_u \\ i_v \end{pmatrix} = T_{32}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{pmatrix}, \text{ mit } T_{32}^{-1} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \tag{2.31}$$

$$\begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{pmatrix} = T_{\varphi}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix}, \text{ mit } T_{\varphi}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\varphi(t) & -\sin\varphi(t) \\ \sin\varphi(t) & \cos\varphi(t) \end{pmatrix} \tag{2.32}$$

In Bild 2.24 ist ein Ersatzschaltbild des Synchronmotors dargestellt, wobei der Ständer vereinfacht aus einem elektrischen Widerstand R_{Str} und einer Induktivität L_D besteht und der Rotor mit Permanentmagneten besetzt ist, welche den magnetischen Fluss ψ_{PM} erzeugen. Ausgehend von den Strömen (i_{sd}, i_{sq}) können die dazugehörigen Spannungen für einen Synchronmotor ohne Feldschwächung angegeben werden zu:

$$U_d = -p\omega_M L_D i_{sq} \tag{2.33}$$

und

$$U_q = L_D \frac{di_{sq}}{dt} + R_{Str} i_{sq} + p\omega_M \psi_{PM}. \tag{2.34}$$

Im Falle einer Feldschwächung innerhalb des Synchronmotors, um beispielsweise höhere Drehzahlen zu ermöglichen, ergeben sich die Spannungen zu:

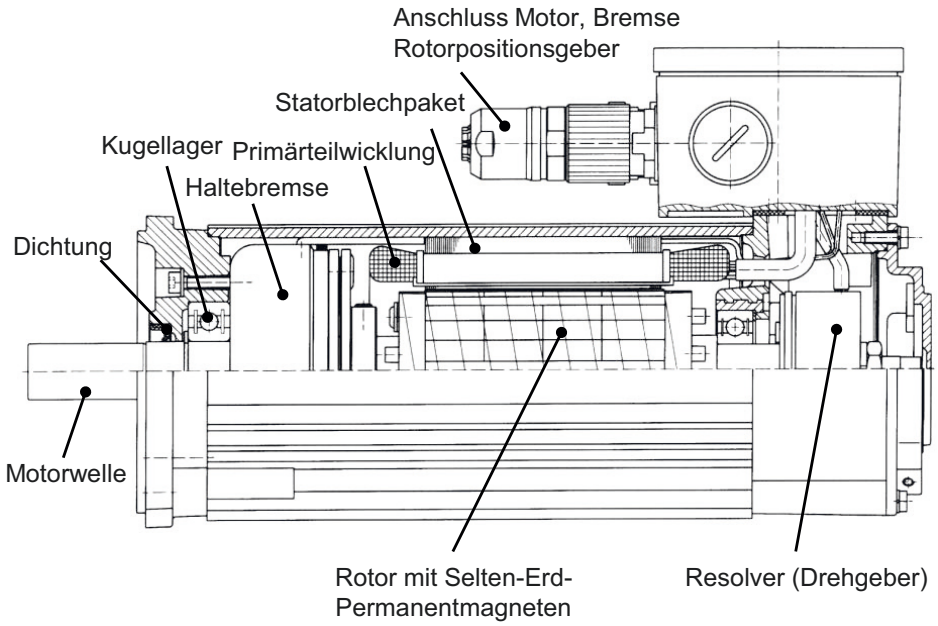


Bild 2.22 Aufbau eines Synchronmotors. Quelle: GEORGII KOBOLD

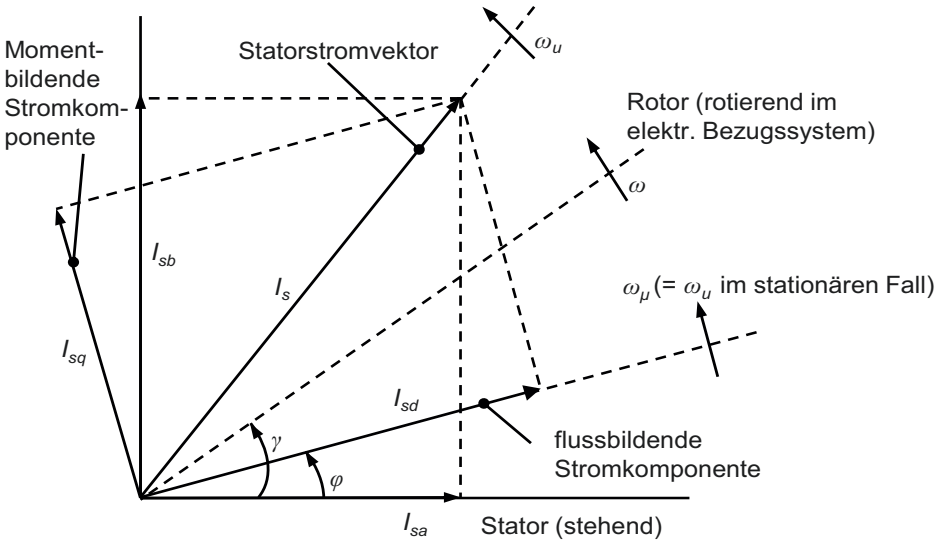


Bild 2.23 Vektordarstellung der Transformation der Statorströme

γ : Winkel zwischen Ständer und Läuferachse (Rotorpositionswinkel)
φ : Winkel zwischen Ständer und Läuferflussachse (Flusskoordinatenwinkel)

Ersatzschaltbild Synchronmotors

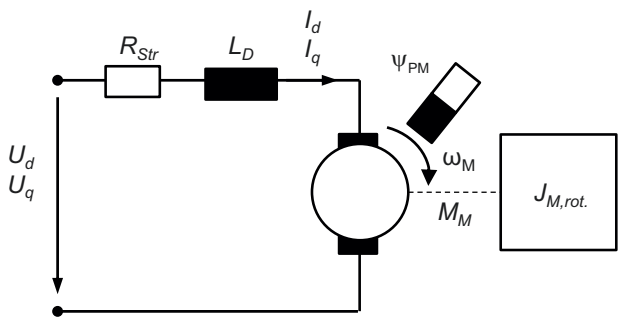


Bild 2.24 Ersatzschaltbild der Synchronmotor. Nach [GROS06]

$$U_d = R_{Str} I_{sd} + L_D \frac{di_{sq}}{dt} - p\omega_M L_D i_{sq} \tag{2.35}$$

und

$$U_q = R_{Str} i_{sd} + L_D \frac{di_{sq}}{dt} + p\omega_M \left(\psi_{PM} + L_D i_{sd}\right) \tag{2.36}$$

Im Falle des Synchronmotors kann eine Feldschwächung nur durch einen negativen flussbildenden Strom i_{sd} realisiert werden, welcher die Spannung U_q verringert. Hiermit wirkt der durch den flussbildenden Strom i_{sd} induzierte magnetische Fluss dem magnetischen Fluss der Permanentmagneten auf dem Rotor entgegen, woraus wiederum ein schwächeres magnetisches Feld zwischen Stator und Rotor resultiert. Sowohl für den Fall mit Flussabsenkung wie auch ohne Flussabsenkung berechnet sich das Motormoment für L_q=L_d aus dem momentbildenden Strom i_{sq} sowie der Polpaarzahl p und dem magnetischen Fluss.

$$M_M = 3p\psi_{PM} i_{sq} \tag{2.37}$$

Kennlinie

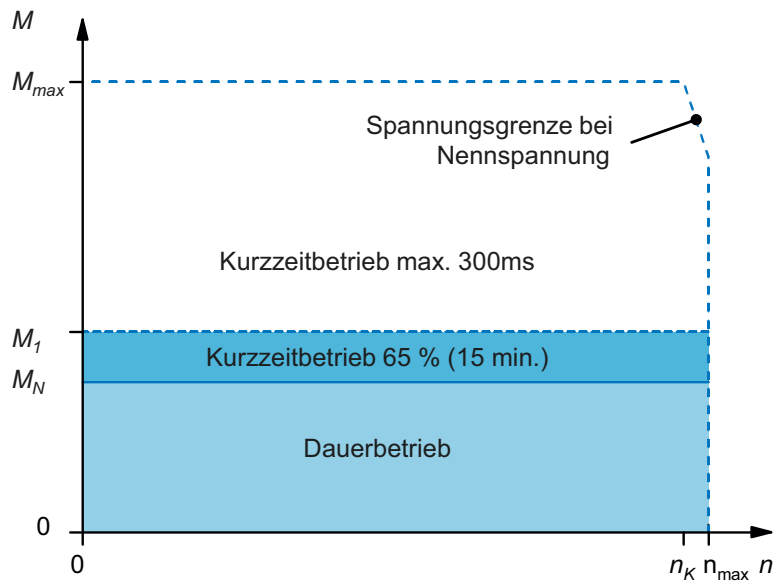
Bild 2.25 zeigt die typische Belastungskurve und die Betriebsbereiche eines Synchronmotors. Eine Kommutierungsgrenze wie bei Gleichstrommotoren ist hier nicht gegeben. Die Leistung wird vielmehr durch den eingesetzten Servoverstärker beschränkt. Ein Feldschwächbetrieb ist bei der üblichen Ausführung der Synchronservomotoren als permanenterregte Maschine nicht vorgesehen.

2.2.4 Asynchronmotoren

Der Asynchronmotor ist hinsichtlich Einfachheit und Robustheit allen anderen Motoren überlegen. Allgemein weist auch der Asynchronmotor eine hohe Überlastbarkeit auf. Die mit speziellen Regelverfahren erreichbare Dynamik ist mit der von Gleichstromantrieben erzielten vergleichbar. Einen Asynchronmotor der Kurzschlussläufer-Bauart, der sich äußerlich kaum von den vorher beschriebenen Servomotorenarten unterscheidet, zeigt Bild 2.26. Ebenso wie die Synchronmaschine ist die Asynchronmaschine eine Drehfeldmaschine, da das Feld nicht still steht wie bei der Gleichstrommaschine, sondern rotiert. Der Ständer der Asynchronmaschine ist wie bei der Synchronmaschine aufgebaut. Eine Drehstromwicklung ist über den Umfang verteilt (Bild 2.27).

Der Rotor trägt jedoch im Gegensatz zum Synchronmotor eine Drehstromwicklung. Diese ist entweder kurzgeschlossen (Kurzschluss- oder Käfigläufer) oder wird über drei Schleifringe und Schleifbürsten nach außen geführt (Schleifringläufer). Im Werkzeugmaschinenbau wird ausschließlich die Bauform mit einem Kurzschlussläufer einge-

Bild 2.25 Betriebsbereiche eines Synchronmotors



M	Drehmoment	M_{max}	Maximales Moment
n	Drehzahl	n_k	Knickdrehzahl
M_N	Nennmoment	n_{max}	maximale Drehzahl
M_1	Belastungsmoment für den Kurzzeitbetrieb		

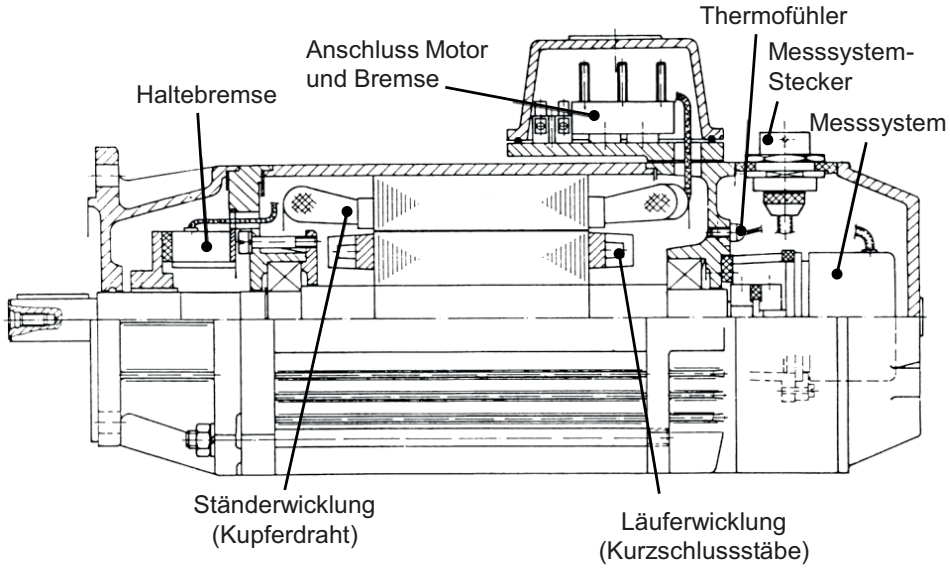


Bild 2.26 Aufbau eines Asynchronmotors der Kurzschlussläufer-Bauart. Nach ABB

setzt. Der für das Rotorfeld erforderliche Rotorstrom wird nach dem Transformatorprinzip über den Stator in den Rotor induziert. Hierzu ist funktionsbedingt eine Drehzahldifferenz (Schlupf) zwischen dem Statordrehfeld und der Rotordrehzahl notwendig. Der Motor zeichnet sich durch einen einfachen und robusten Aufbau aus und ist daher sehr störunanfällig und nahezu wartungsfrei. Eine Drehzahlverstellung wird bei solchen Motoren, die direkt an das öffentliche 50-Hz-Netz angeschlossen sind, durch nachgeschaltete Getriebe erreicht.

Heute wird dieser Motortyp drehzahlverstellbar ausgeführt. Hierzu ist wie beim Synchronmotor ein Drehstromnetzfrequenzwandler erforderlich. Die Funktionsweise und der Aufbau des Motors werden im Folgenden kurz erläutert.

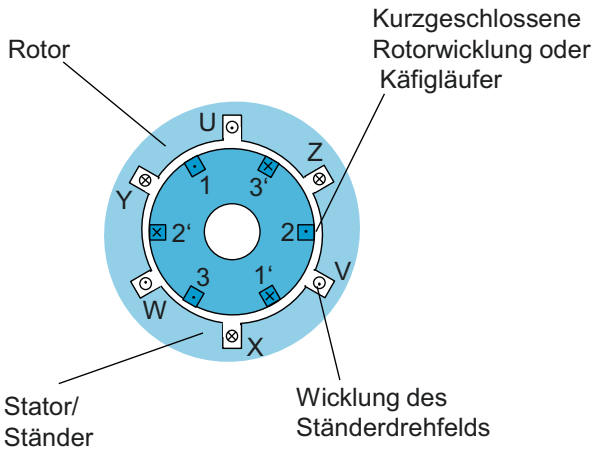


Bild 2.27 Aufbau der Asynchronmaschine

Das im Ständer umlaufende Drehfeld induziert in den Leitern des Läufers eine Spannung. Diese erzeugt einen Strom, dessen Eigenmagnetfeld zusammen mit dem Ständerfeld ein Drehmoment auf den Rotor bewirkt. Der induzierte Strom ist geringer, je kleiner die Differenz (Schlupf) zwischen Rotordrehzahl und der Drehzahl des Ständerfeldes ist. Der Läuferkörper besteht aus geschichteten, isolierten Eisenblechen, um Wirbelstrom- bzw. Ummagnetisierungsverluste gering zu halten. Bei der üblicherweise eingesetzten Asynchronmaschine mit Kurzschlussläufer ist die Läuferwicklung durch Leitungsstäbe mit relativ großem Querschnitt realisiert.

Bild 2.28 zeigt die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie sowie die Strom- und eine repräsentative Lastkennlinie einer Asynchronmaschine für einen Motor mit konstanter Nenndrehzahl (Netzfrequenz). Der bevorzugte Betriebsbereich dieses Motors liegt kurz unterhalb der Synchrondrehzahl. Hier weist der Motor die für einen Hauptantrieb geforderte hohe Drehzahlsteifigkeit unter Last auf. Das Anfahrmoment ist gering. Bis zum Erreichen der Kippdrehzahl erzeugt der Motor ein mit steigender Drehzahl anwachsendes Moment. Die synchrone Drehzahl n_S, die der Drehzahl des umlaufenden Ständerfeldes entspricht, wird nur im unbelasteten Zustand nahezu erreicht. Mit zunehmender Belastung wird der Schlupf

$$s = \frac{n_S - n}{n_S}, \tag{2.38}$$

d. h. die relative Differenz zwischen synchroner Drehzahl und Istdrehzahl, größer. Im Nennbetrieb beträgt der Schlupf $s_n = 3$ bis 5%. Aus Gleichung (2.38) ergibt sich die Nenndrehzahl des Motors ($f = 50$ Hz) bei einem Schlupf

Bild 2.28 Drehmoment- und Läuferkennlinie der Asynchronmaschine

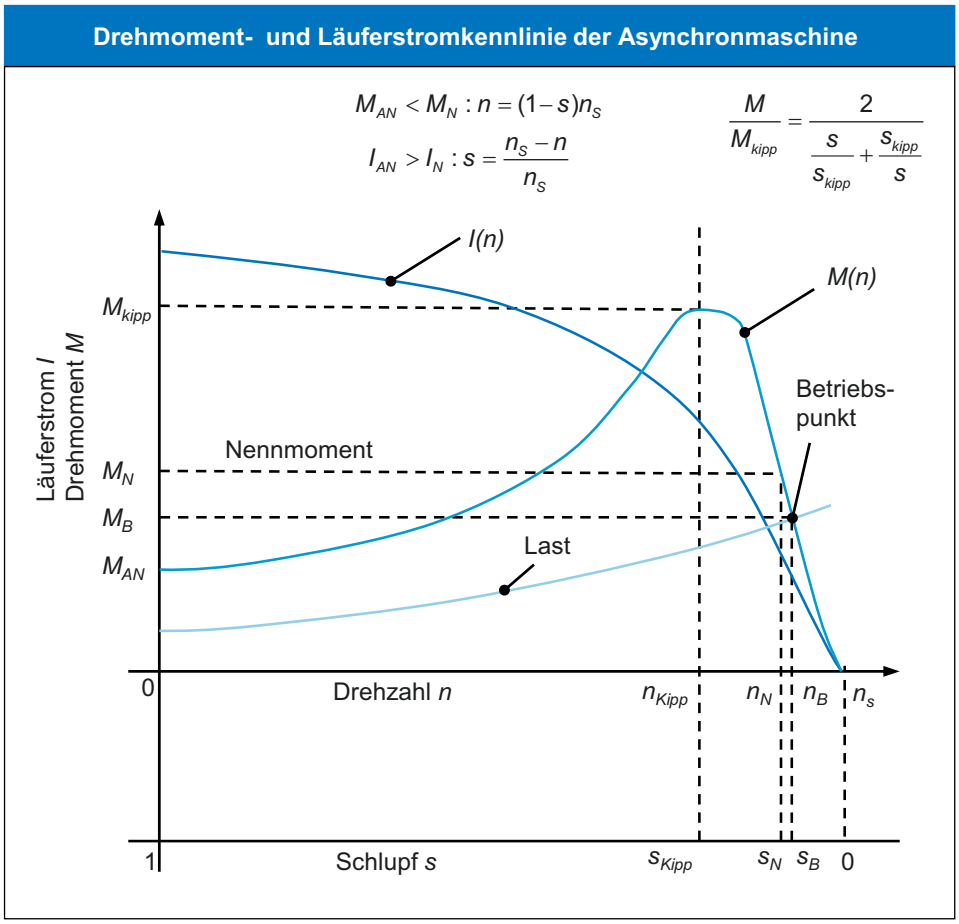
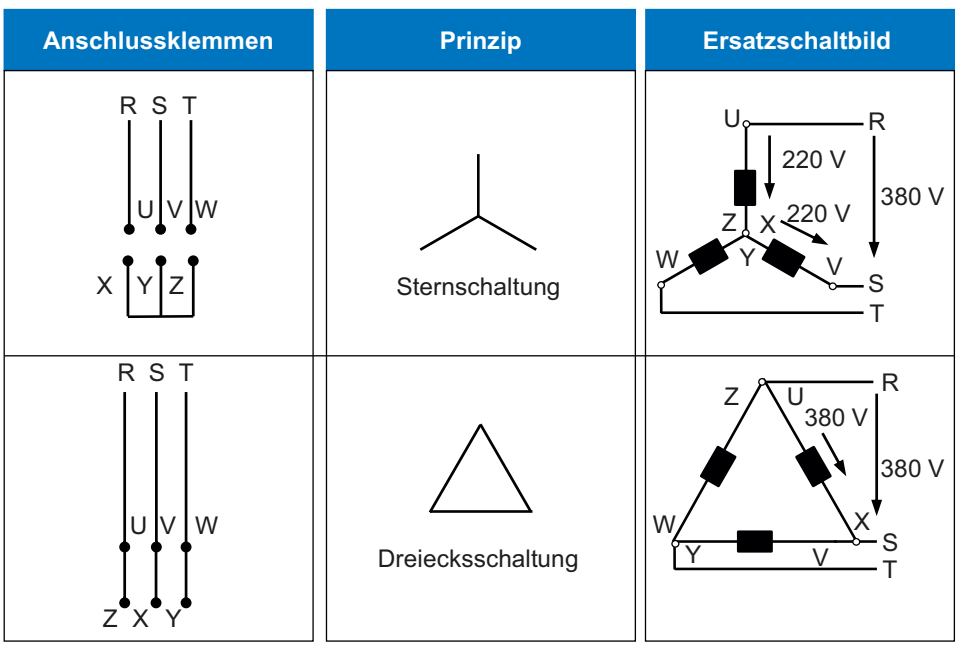


Bild 2.29 Stern-Dreieck-Umschaltung der Ständerwicklung



von 3 % zu 2910, 1 455 oder 7 27,5 min^{-1}, je nach Polpaarzahl des Läufers, Gleichung (2.28). Nachteilig ist außer dem geringen Anfahrmoment auch der hohe Anfahrstrom im Läufer, der das Fünffache des Nennstroms erreichen kann. Die Drehmomentenkennlinie bezogen auf das Kippmoment M_{kipp} ist in Abhängigkeit des Schlupfes s und des Schlupfes beim Kippmoment S_{kipp} wie folgt darstellbar (Kloßsche Formel):

$$\frac{M}{M_{kipp}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{kipp}} + \frac{s_{kipp}}{s}} \tag{2.39}$$

Bei nicht drehzahlgeregelten, d. h. vom 50-Hz-Fabriknetz gespeisten Motoren besteht die Möglichkeit zur Reduzierung des Anfahrstromes durch eine Stern-Dreieck-Umschaltung des Ständerfeldes (Bild 2.29).

Beim Sternbetrieb in der Anlaufphase liegen die Ständerwicklungen an 220 V. Hierdurch erreicht der Strom nur etwa ein Drittel des Wertes gegenüber dem Dreieckbetrieb. Allerdings sinkt das Anfahrmoment um den gleichen Betrag, sodass diese Schaltung nur für den Antrieb leichtanlaufender Lasten ohne nennenswertes Losreißmoment bzw. Reibmoment geeignet ist. Nach dem Hochlauf wird der Motor in den Dreieckbetrieb geschaltet.

Grundsätzlich kann die Asynchronmaschine in drei Betriebsarten arbeiten. Unterschieden wird hierbei zwischen Bremse, Motor und Generator. Bild 2.30 zeigt die drei Betriebsarten sowie den entsprechenden Verlauf der Drehmomentkennlinie. Wichtig für den Betrieb der Asynchronmaschine ist die Kenntnis über den Bereich, in dem die Maschine stabil arbeitet. Als eine allgemeine Bedingung gilt:

$$\frac{dM_M}{dn} < \frac{dM_{Last}}{dn} \tag{2.40}$$

Diese Kombination erfüllt die Anforderungen an ein stabiles Gleichgewicht. Fällt die Motordrehzahl durch eine Schwankung ab, wird Motormoment zur Beschleunigung frei und umgekehrt bremst ein entstehendes Momentendefizit den Motor ab, falls er zu schnell dreht.

Unter der Annahme einer konstanten Last ergibt sich für die Asynchronmaschine die Stabilitätsbedingung:

$$\frac{dM_M}{dn} < 0 \Rightarrow -s_{kipp} < s < s_{kipp} \tag{2.41}$$

Daraus folgt, dass die Asynchronmaschine nur im Bereich zwischen Kippdrehzahl und Leerlaufdrehzahl betrieben werden kann. Aus diesen Betrachtungen erklärt sich auch die Bezeichnung Kippmoment. Übersteigt die Belastung im Motorbetrieb diesen Maximalwert, bleibt der Rotor stehen, d. h. er kippt weg.

Die Drehmomentkennlinien des Kurzschlussläufermotors hängen vor allem im unteren Drehzahlbereich von der Querschnittsform der Läuferstäbe ab. Bild 2.31 zeigt häufig verwendete Stabquerschnitte und die dazugehörigen Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien. Die unterschiedlichen Querschnitte eröffnen die Möglichkeit den Betriebsverhältnissen angepasste Drehmomentverläufe zu realisieren. Somit können auch Motoren für Schweranlauf mit einer gewissen Absenkung des Kippmoments umgesetzt werden (hohes Anfahrmoment). Die unterschiedliche Charakteristik ist auf die Stromverdrängung in den Leitern zurückzuführen. Im Anfahrbereich, d. h. bei großem Schlupf, ist die Frequenz der induzierten Läuferspannung hoch. Bei dieser Frequenz führt nur der außenliegende Teil der Querschnittsfläche der Leiter

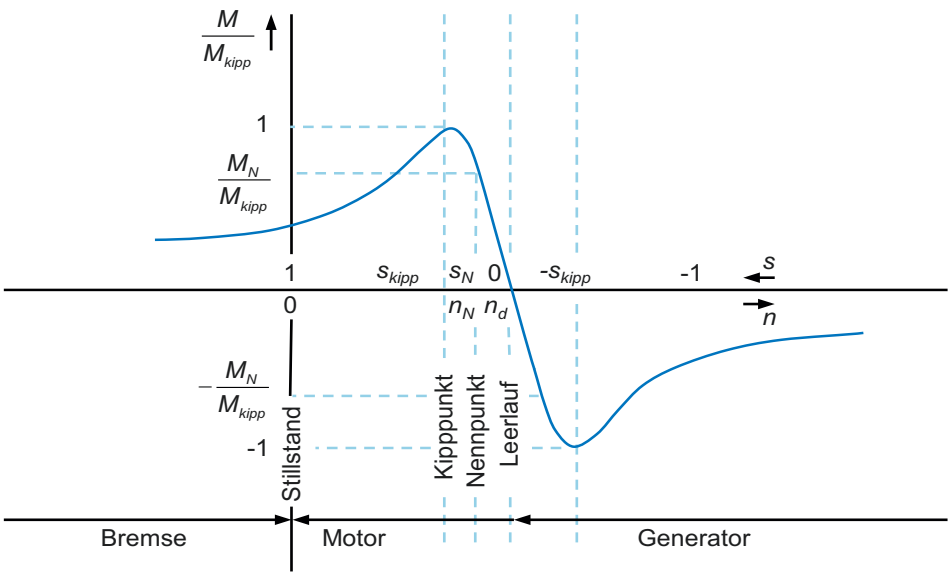
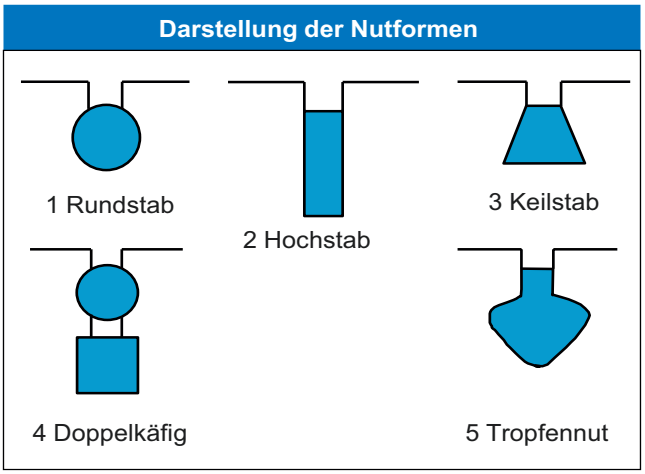


Bild 2.30 Betriebsarten und Drehmomentkennlinie der Asynchronmaschine



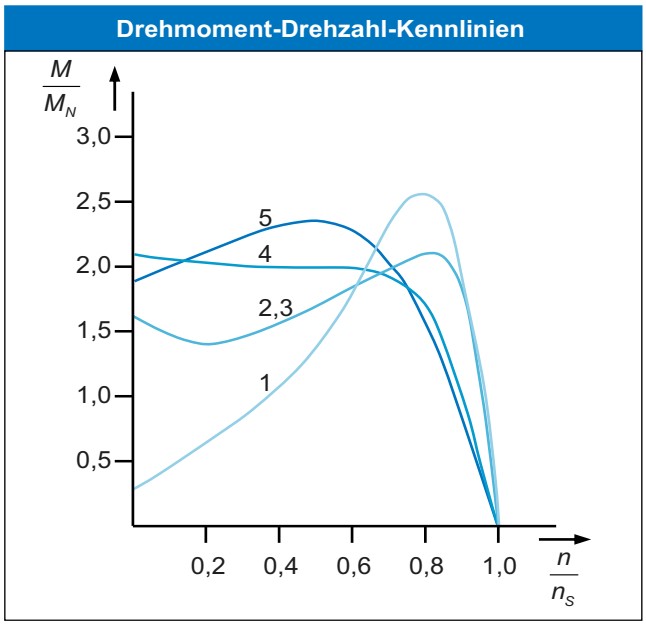


Bild 2.31 Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien für verschiedene Nutformen des Käfigläufers

im Anker Strom. Dies bedeutet einen höheren Ohm'schen Widerstand der Stäbe, was zu einer Anfahrstromreduktion und Drehmomenterhöhung führt. Mit zunehmender Drehzahl, d. h. abnehmender Läuferstromfrequenz, wird der gesamte Stabquerschnitt stromführend, sodass die hohe Drehsteifigkeit im Nennarbeitsbereich garantiert ist.

Bei der Asynchronmaschine ist ein deutlich höherer Aufwand für die Regelung erforderlich als bei der Synchron- und Gleichstrommaschine. Zur genauen und dynamisch hochwertigen Regelung des Drehmoments, d. h. zur Regelung zweier frei veränderlicher Statorströme, muss die Größe und Winkellage des Läufermagnetfeldes erfasst werden. Diese sind bei der Synchronmaschine direkt mit der Rotorlage verknüpft, bei der Asynchronmaschine dagegen muss diese Information aus den Ständerströmen und der Maschinendrehzahl berechnet werden. Außer diesen direkt messbaren Größen gehen in die Berechnung auch die Motorparameter Rotorwiderstand und -induktivität ein. Diese Größen können aufgrund des Einflusses von Temperatur und magnetischer Sättigung nicht als konstant angesehen werden.

Feldorientierte Regelung

Basis der Drehzahlregelung von Asynchronmotoren ist die sogenannte feldorientierte Regelung [SCHÖ09]. Diese beruht auf der bereits beschriebenen Transformation der Ständerströme in ein mit dem magnetischen Fluss rotierendes Koordinatensystems. Die Regelung entkoppelt dabei die nötigen Ströme zum Aufbau der Feldstärke und des Drehmoments, um wie bei der Gleichstrommaschine feldbildenden und momentbildenden Strom unabhängig voneinander zu regeln. Die Regelung wird dabei in zwei unterschiedlichen Koordinatensystemen für die Ströme durchgeführt. Dazu wird das dreiphasige Statorstromsystem bzw. Statorwicklungskoordinatensystem (i_u, i_v, i_w) in das zweiphasige Statorkoordinatensystem (i_{sa}, i_{sb}) umgerechnet. Dieses wird wiederum in ein mit der Frequenz des Läuferflusses rotierendes Feldkoordinatensystem (i_{sd}, i_{sq}) transformiert. Im Bild 2.23 wird die zweiphasige Darstellung der Statorströme im Statorkoordinatensystem und im rotierenden Läuferkoordinatensystem verdeutlicht. In den Feldkoordinaten kann nun folgende Regelungsstrategie verfolgt werden: Der Läuferfluss wird auf einem konstanten Wert gehalten. Das Drehmoment kann dann allein über die momentbildende Querstromkomponente i_{sq} eingestellt werden. Diese unabhängige Regelung ist bei Leistungsstellern hoher Schaltfrequenz möglich, da dann gewährleistet ist, dass der Läuferfluss nur unwesentlich schwankt. Der Wirkungsplan der feldorientierten Regelung ist in Bild 2.32 dargestellt. Rechts von den Transformationsblöcken handelt es sich bei den Strömen um die physikalisch existierenden Phasenströme des Motors (Statorwicklungskoordinaten). Die zumeist auf Pulsweitenmodulation (PWM) basierenden Stromregler arbeiten mit den tatsächlichen Phasenströmen, womit die Möglichkeit zu deren Kontrolle und Begrenzung besteht. Es müssen prinzipiell nur zwei Ströme geregelt werden, da sich der Dritte in einem symmetrischen Drehstromsystem aus den beiden anderen ergibt. Links von den Transformationsblöcken erfolgt die entkoppelte Regelung von Feld, momentbildendem Strom und Drehzahl in Feldkoordinaten. Der Läuferfluss ϕ_r ist proportional zur Längsstromkomponente i_μ im Feldkoordinatensystem und der Hauptinduktivität L_{1h}:

$$\phi_r \sim L_{lh}\left(i_{sd} + T_r \frac{di_{sd}}{dt}\right) = L_{lh} i_\mu \tag{2.42}$$

Der magnetische Fluss ϕ_r wird mit dem Flussregler auf einem konstanten Wert gehalten. Nach der Beziehung

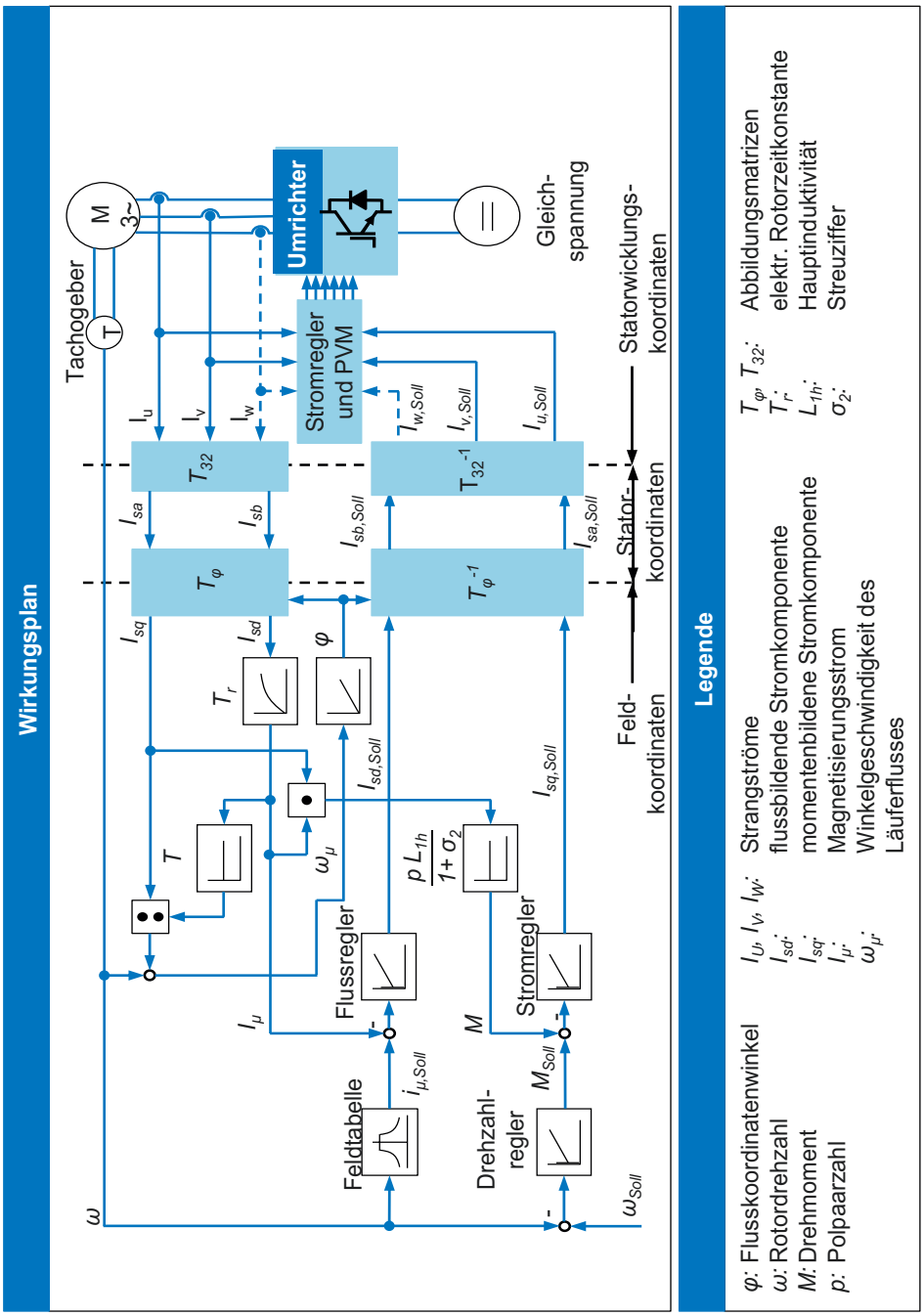


Bild 2.32 Regelung eines Asynchronmotors nach dem Prinzip der feldorientierten Regelung. Nach [HENN99]

$$M = \frac{pL_{1h}}{1+\sigma_2} i_\mu i_{sq} \qquad (2.43)$$

mit σ_2 *Streuziffer*
p *Polzahl*

für das Motormoment kann nun bei konstantem Fluss Φ_r das Drehmoment allein über die Querstromkomponente i_{sq} eingestellt werden. Für die Berechnung des Winkels $\phi(t)$ aus den Ständerströmen in Feldkoordinaten (i_{sd}, i_{sq}) und für die Maschinendrehzahl ω gelten folgende Zusammenhänge:

$$\ddot{o} = \int_0^t (\omega + \omega_R)\, dt$$

$$\text{mit} \quad \omega = \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{Winkelgeschwindigkeit des Rotors} \qquad (2.44)$$

$$\omega_R = \frac{i_q}{T_r \cdot i_\mu} \quad \text{Kreisfrequenz der Läuferströme}$$

T_r elektrische Rotorzeitkonstante

Durch die feldorientierte Regelung verhält sich die Asynchronmaschine ähnlich wie eine Gleichstrommaschine. Ins-

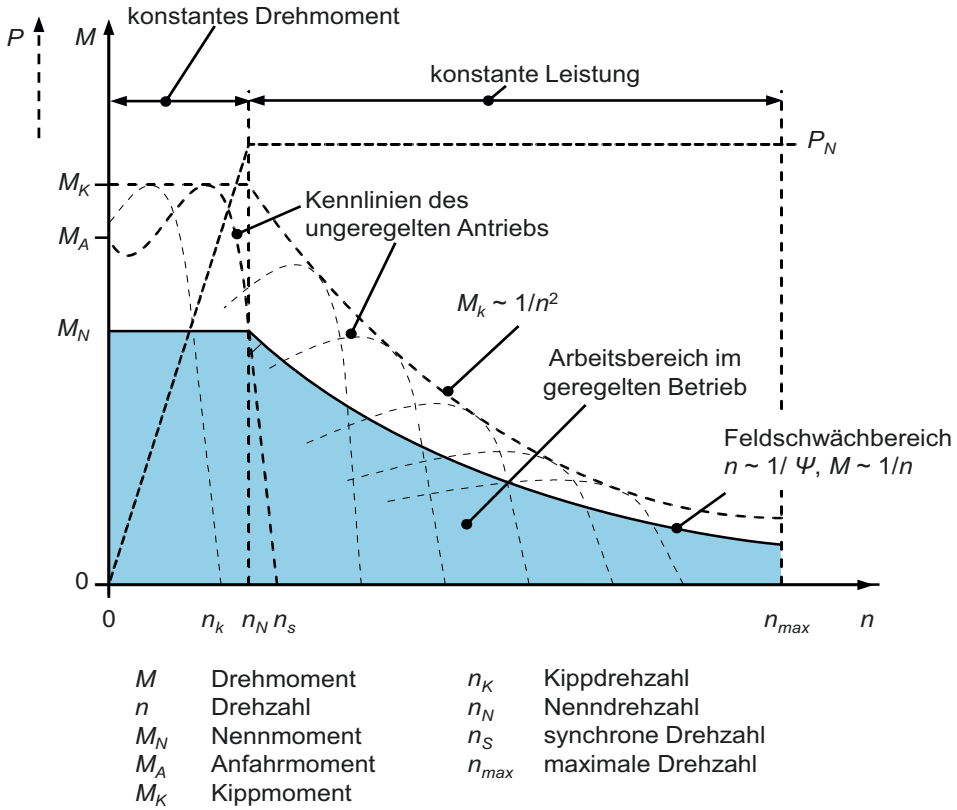


Bild 2.33 Kennlinien und Betriebsbereiche eines Asynchronmotors

besondere wird die Drehzahl-Drehmomentkennlinie zu einer Geraden.

Ein Vorteil bei Anwendung eines Asynchronmotors ist der große Feldschwächbereich. Hier kann die Drehzahl in einem großen Bereich bei konstanter Leistungsabgabe verstellt werden Bild 2.33. Durch eine Speisung mit variabler Frequenz ist weiterhin ein Anfahren des Motors mit Nennschlupf und damit Nennstrom möglich. Diese Eigenschaften kommen den Anforderungen bei Hauptspindelmotoren entgegen.

Energieeffizienz durch Absenkung des Magnetisierungsstroms

Die Darstellung der Flussabsenkung zur Steigerung der Energieeffizienz von Asynchronmotoren in diesem Abschnitt ist an die Darstellung und Forschungsergebnisse aus dem EWOTeK-Projekt angelehnt [o.V.12]. Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts wurden Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen untersucht.

Bauartbedingt benötigen Asynchronmotoren einen Teil des Eingangsstroms zum Aufbau des magnetischen Rotorfeldes, wobei jedoch noch kein Drehmoment auf die Motorwelle ausgeübt wird. Erst bei ausreichender Magnetisierung des Rotors kann ein Drehmoment nach dem Prinzip der Lorenzkraft aufgebaut werden. Die erforderliche Stärke dieser Magnetisierung ist durch die Konstruktion des Motors festgelegt. Die grundlegende Gleichung zur Energieeffizienzsteigerung durch Absenkung des Magnetisierungsstroms bildet der Zusammenhang zwischen dem Drehmoment eines feldorientiert geregelten Asynchronmotors und der flussbildenden Stromkomponente i_d:

$$M_{el} = \frac{pL_h}{1+\sigma_2} i_\mu i_q \tag{2.45}$$

mit: Polpaarzahl p, Hauptinduktivität L_h, Streuziffer σ_2 und Magnetisierungsstrom i_μ.

Die Magnetisierung des Rotors ist verantwortlich für die Stärke des Magnetfelds im Luftspalt zwischen Rotor und Stator. Der für die Magnetisierung erforderliche Magnetisierungsstrom i_μ ergibt sich aus der flussbildenden Stromkomponente i_d zu .

$$T_2 \frac{\partial i_\mu}{\partial t} + i_\mu = i_d \tag{2.46}$$

Mit den Gleichungen (2.45) und (2.46) sind zwei entscheidende Zusammenhänge dargestellt:

Zum einen ist das Drehmoment einer Asynchronmaschine direkt proportional zum momentbildenden Strom i_d und dem Magnetisierungsstrom i_μ. Daraus folgt, dass eine

Verringerung des Magnetisierungsstroms das maximale Drehmoment reduziert. Der momentbildende Strom i_q, kann mit kurzer Verzögerungszeit eingeprägt werden, womit eine hochdynamische Regelung des Drehmoments möglich ist. Aus Gleichung (2.46) ist das PT_1-Verhalten des Magnetisierungsstroms ersichtlich, welcher nur von der flussbildenden Stromkomponente i_d und der Läuferzeitkonstante des Motors T_2 abhängig ist. Übliche Werte der Läuferzeitkonstante sind zwischen 150 und 250 ms, wobei ein Zusammenhang mit der Rotorinduktivität und -widerstand gegeben ist durch Gleichung (2.47).

$$T_2 = \frac{(1+\sigma_2)L_h}{R_R^{'}} = \frac{L_2^{'}}{R_R^{'}} = \frac{L_2}{R_R} \tag{2.47}$$

L'_2 und R'_R geben dabei die Rotorinduktivität und –widerstand an. Die beiden Größen sind auf Statorwindungszahl umgerechnete Rotorgrößen.

Bei einer Anwendung in Werkzeugmaschinen ist jedoch oft nur ein Drehmoment unterhalb des Nenndrehmoments erforderlich, wodurch ein Energieeinsparpotenzial im Absenken der Magnetisierung des Rotors besteht. Ein lastunabhängiges Absenken der Magnetisierung würde jedoch zu einer Steigerung der Span-zu-Span-Zeit führen, da die Hauptspindel mit maximalem Drehmoment abgebremst und nach dem Wechsel wieder beschleunigt wird. Steht dabei das maximale Drehmoment aufgrund einer geringen Magnetisierung nicht zur Verfügung, verlängert sich das Abbremsen und Beschleunigen, was in einer allgemein längeren Zeit für den Werkzeugwechsel resultiert. Ein weiterer Anwendungsfall ist der Beginn des Materialeingriffs durch das Werkzeug. Insbesondere in diesem Fall ist ein deutlicher Einbruch der Spindeldrehzahl zu vermeiden, weshalb ein hohes Drehmoment bereitgestellt werden muss, um dem zusätzlichen mechanischen Lastmoment entgegen zu wirken.

Wichtiger Aspekt bei einem Eingriff in die Regelungsstruktur ist, dass die zusätzlich benötigte Rechenleistung zur Bestimmung der lastabhängigen Rotormagnetisierung kein Überschreiten der maximalen Rechenzeit im Stromreglertakt hervorruft. Im Folgenden wird dazu eine Möglichkeit hergeleitet den Magnetisierungsstrom an die gegebenen Lastverhältnisse anzupassen. Mit dem Ziel der Energieeffizienz ist die aufgenommene Leistung einer Asynchronmaschine der Ausgangpunkt der Herleitung.

Die aufgenommene Leistung einer Asynchronmaschine berechnet sich nach [HAME06] zu:

$$P_{auf} = P_V + P_{FE} + \frac{\partial W_M}{\partial t} + P_{mech} \tag{2.48}$$

wobei P_{FE} die Eisenverluste bestehend aus Wirbelstrom- und Hystereseverluste und $\partial W_M/\partial_t$ die Änderung der magnetischen Energie im Motor angeben. Die mechanische Leistung P_{mech} berechnet sich aus dem Motormoment mit:

$$P_{mech} = 2\pi \cdot n \cdot M_{el} \tag{2.49}$$

Entscheidend für eine Steigerung der Energieeffizienz durch Absenken des Magnetisierungsstroms, sind die Kupferverluste P_v aufgrund ohmscher Widerstände:

$$P_V = R_S\left(i_d^2 + i_q^2\right) + \frac{i_q^2 L_h^2}{T_2^2 R_R^{'}} \tag{2.50}$$

Aus den Gleichungen (2.45), (2.47) und (2.46) kann für den statischen Fall der optimale Magnetisierungsstrom abhängig des Drehmoments berechnet werden.

$$i_q = \frac{M_{el} T_2 R_R^{'}}{p L_h^2 i_d} \tag{2.51}$$

Wird Gleichung (2.50) in Gleichung (2.51) eingesetzt so kann die Verlustleistung bei gegebenem Motorfluss bestimmt werden.

$$P_V = \frac{R_S\left(i_d^4 p^2 L_h^4 + M_{el}^2 T_2^2 R_2^{'2}\right) + M_{el}^2 R_R^{'} L_h^2}{p^2 L_h^4 i_d^2} \tag{2.52}$$

Ein optimaler Magnetisierungsstrom liegt bei einem Minimum der Verlustleistung in Abhängigkeit der flussbildenden Stromkomponente vor.

$$\frac{\partial P_V}{\partial i_d} = 0 \Rightarrow i_\mu = \sqrt{\frac{|M_{el}|}{p}} \cdot \frac{1}{L_h} \cdot \sqrt[4]{\frac{R_R^{'} L_h^2 + L_2^2 R_S}{R_S}} \tag{2.53}$$

Gleichung (2.53) erlaubt somit zur Laufzeit die Berechnung des stationär günstigsten Magnetisierungsstroms i_μ in Abhängigkeit bekannter Motorgrößen und als Funktion des Motorsollmoments M_{soll}.

2.2.5 Auslegung und Berechnung elektrischer Antriebe

Nachdem bisher die statischen Kennlinien von Motoren betrachtet wurden, die sich bei Vorgabe der Einstellgrößen nach der Einschwingzeit im stationären Betrieb ergeben, soll nun der zeitliche Drehzahlhochlauf eines belasteten Antriebs vom Einschaltaugenblick an untersucht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Maximalstrom zum Schutz des Motors und der Leistungsverstärker begrenzt wird (üblicherweise ist I_{max} 2 bis 3 I_N). Diese Strombegrenzung ist vor allem bei großen Drehzahländerungen – wie Hochlauf von Null auf Nenndrehzahl – wirksam. Bei kleinen Drehzahländerun-

gen, die kleine Stromänderungen erfordern, ist die Strombegrenzung nicht wirksam. Im Folgenden werden beide Fälle am Beispiel der Gleichstrommaschine dargestellt. Außerdem wird die Ermittlung des Hochlaufverhaltens bei nichtlinearer Motor- und Lastkennlinie ohne Strombegrenzung für einen Gleichstrommotorantrieb sowie der Hochlauf für einen Asynchronmotor beschrieben.

2.2.5.1 Hochlauf ohne Strombegrenzung

Die Ableitung geschlossener Lösungsgleichungen für den Hochlauf ist nur für einfache, lineare Motor- und Lastkennlinien sinnvoll. Bei komplexen, nichtlinearen Motor- und Lastverläufen bieten sich numerische Lösungen an. Im folgenden Beispiel treibt ein fremderregter Gleichstrommotor (Bild 2.34) eine Last mit der Kennlinie $M_L = M_{L0} + c\omega$ an. In dem betrachteten Beispiel soll sich die Ankerspannung sprunghaft von null auf den Wert U_{A1} ändern. Das auf die

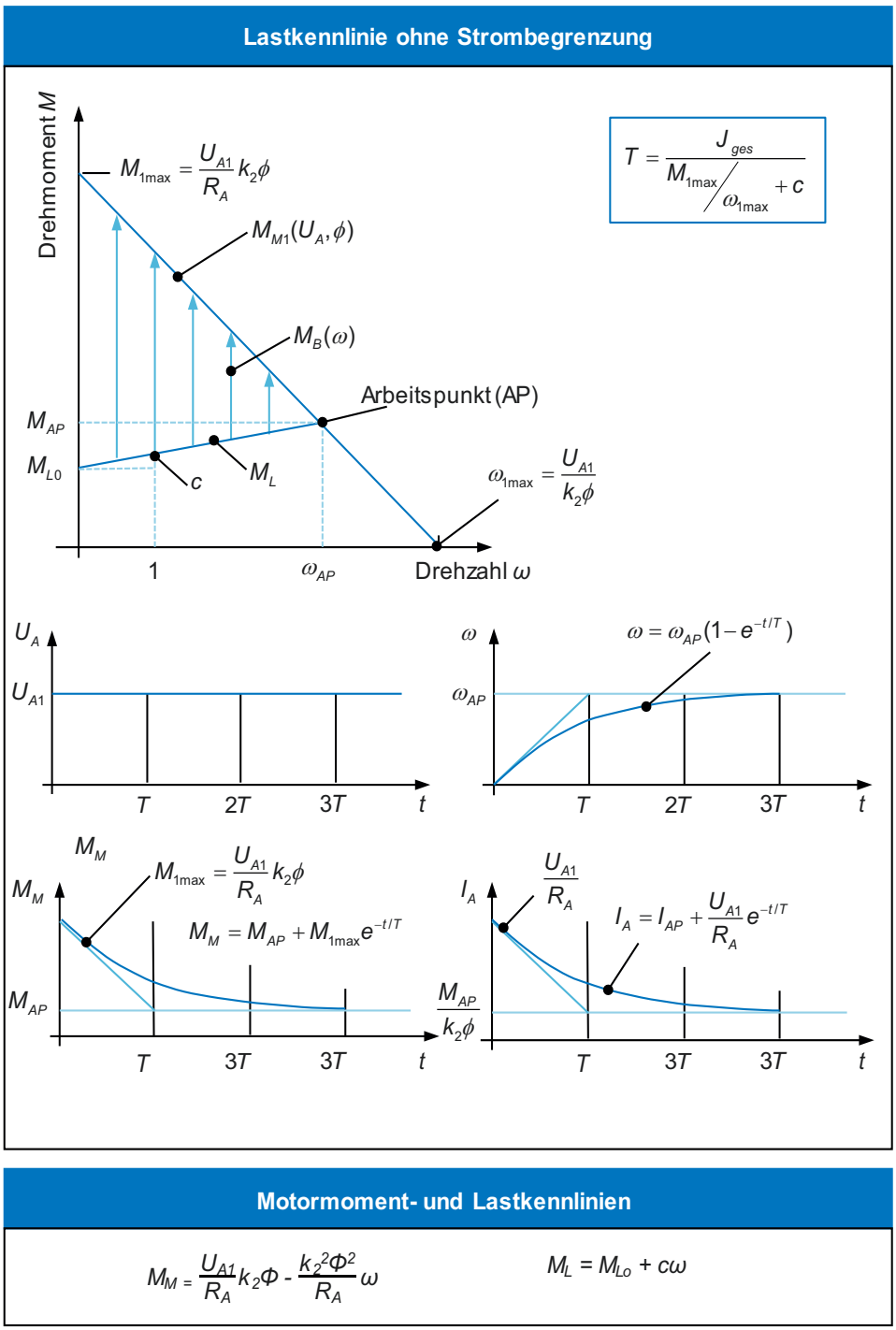


Bild 2.34 Hochlauf eines Gleichstromantriebs mit linearer Lastkennlinie ohne Strombegrenzung

Motorwelle bezogene Gesamtträgheitsmoment ist mit J_{ges} gegeben.

Nach der Bewegungsgleichung für die Rotation gilt:

$$M_B(\omega) = M_M(\omega) - M_L(\omega) = J_{ges}\dot{\omega} \tag{2.54}$$

mit: M_B als Beschleunigungsmoment und

$$M_L(\omega) = M_{L0} + c\omega \quad \text{sowie} \quad \omega = 2\pi\frac{n}{60} \tag{2.55}$$

Aus Gleichung (6.2) und Gleichung (6.3) folgt:

$$M_M(\omega) = \frac{U_{A1}}{R_A}k_2\phi - \frac{k_2^2\phi^2}{R_A}\omega \tag{2.56}$$

M_B ist das Beschleunigungsmoment, das der Motor zur Überwindung der Trägheit der bewegten Massen aufbringt. Es ergibt sich die folgende Funktion in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz ω:

$$\begin{aligned} M_B(\omega) &= \left(\frac{U_{A1}}{R_A}k_2\phi - \frac{k_2^2\phi^2}{R_A}\omega\right) - \left(M_{L0} + c\omega\right) = J_{ges}\dot{\omega} \\ \Rightarrow J_{ges}\dot{\omega} &+ \left(\frac{k_2^2\phi^2}{R_A} + c\right)\omega = \frac{U_{A1}}{R_A}k_2\phi - M_{L0} \end{aligned} \tag{2.57}$$

In allgemeiner Form stellt sich die Differentialgleichung wie folgt dar:

$$T\dot{\omega} + \omega = \omega_{AP} \tag{2.58}$$

mit: ω_{AP}: sich einstellende Drehzahl im Arbeitspunkt.
Weiter gilt:

$$\frac{J_{ges}}{\frac{k_2^2\phi^2}{R_A} + c}\dot{\omega} + \omega = \frac{\frac{U_{A1}}{R_A}k_2\phi - M_{L0}}{\frac{k_2^2\phi^2}{R_A} + c} = \frac{M_{1\max} - M_{L0}}{\frac{M_{1\max}}{\omega_{1\max}} + c} = \omega_{AP} \tag{2.59}$$

mit: $\omega_{1\max} = \frac{U_{A1}}{k_2\phi}$

Hierbei sind $M_{1\max}$ und $\omega_{1\max}$ die Koordinatenschnittwerte der Motorkennlinie. Die Lösung dieser Gleichung lautet:

$$\omega(t) = \omega_{AP}\left(1 - e^{-t/T}\right) \tag{2.60}$$

Durch Koeffizientenvergleich von Gleichung (2.58) und Gleichung (2.59) ergeben sich die Hochlaufzeitkonstante T und die Kreisfrequenz des stationären Arbeitspunktes ω_{AP}:

$$T = \frac{J_{ges}}{\frac{k_2^2\phi^2}{R_A} + c} = \frac{J_{ges}}{\frac{M_{1\max}}{\omega_{1\max}} + c} \tag{2.61}$$

Die Hochlaufkurve sowie der zeitliche Verlauf von Ankerspannung (U_A), Ankerstrom (I_A) und Motormoment (M_M) zeigt der rechte Teil von Bild 2.34. Im Einschaltaugenblick ist die Drehzahl null. Daraus resultiert der Einschaltstrom zu:

$$I_{A\max} = \frac{U_{A1}}{R_A} > I_{\max,zul} \tag{2.62}$$

der im Allgemeinen viel größer als der maximal zulässige Strom ist.

2.2.5.2 Hochlauf mit Strombegrenzung

Zum Schutz des Motors vor Überlastung, insbesondere bei hohen Drehzahlsprüngen, z. B. beim Anlauf, besitzen die Motorverstärker eine elektronische Strombegrenzung. Das Antriebsverhalten wird hierdurch zwangsläufig unstetig. Bei dem bisher behandelten Beispiel (Bild 2.34) soll der maximale Motorstrom auf

$$I_{max,zul} = 2I_N \tag{2.62}$$

begrenzt werden, wobei der Nennstrom I_N eine Motorkonstante darstellt, die der Motor dauernd, ohne thermische Schädigung ertragen kann. Es bietet sich an, den Berechnungsgang für den Hochlauf in zwei Abschnitte zu unterteilen:

- *1. Abschnitt:* Hochlaufphase mit Strombegrenzung, d. h. die Zeit des Hochlaufs, in der der Motor einen größeren Strom als $2I_N$ aufnehmen würde,
- *2. Abschnitt:* Freigabe der Strombegrenzung ab der Drehzahl, bei welcher der Motor von sich aus einen kleineren Strom als $2I_N$ aufnimmt.

Der linke obere Teil von Bild 2.35 zeigt anhand der statischen Motormoment- und Lastmomentkennlinie den unstetigen Verlauf des Beschleunigungsmomentes. Das Motormoment ist bis zum Umschaltpunkt bei der Drehzahl ω_{UP} auf

$$M_{M\max} = 2M_N = 2k_2\phi I_N = konst \tag{2.64}$$

begrenzt. Über das Momentengleichgewicht für die Strombegrenzungsphase (SB) mit

$$M_B(\omega) = M_{M\max} - (M_{L0} + c\omega_{SB}) = J_{ges}\dot{\omega}_{SB} \tag{2.65}$$

ergeben sich die Differentialgleichungen für die Bewegung:

$$\frac{J_{ges}}{c}\dot{\omega}_{SB} + \omega_{SB} = \frac{M_{M\max} - M_{L0}}{c} \tag{2.66}$$

$$T_{SB}\dot{\omega}_{SB} + \omega_{SB} = \omega_{SB0} \tag{2.67}$$

mit:

$$T_{SB} = \frac{J_{ges}}{c} \tag{2.68}$$

$$\omega_{SB0} = \frac{M_{M\max} - M_{L0}}{c} > \omega_{AP} \tag{2.69}$$

mit der Lösung für den Hochlauf

$$\omega_{SB}(t) = \omega_{SB0}\left(1 - e^{-t/T_{SB}}\right) \tag{2.70}$$

wobei ω_{SB0} eine theoretische Arbeitsdrehzahl darstellt, die sich einstellen würde, wenn $M_{Mmax} = 2I_N$ über einen unendlichen Drehzahlbereich wirksam wäre (Bild 2.35).

Die Umschaltdrehzahl ω_{UP}, bei der der Motorstrom unter Einwirkung der Ankerspannung U_{A1} unter $2I_N$ abgefallen ist, berechnet sich aus den statischen Kennlinien zu:

$$\omega_{UP} = \omega_{1\,\max}\left(1 - \frac{M_{M\,\max}}{M_{1\,\max}}\right) \tag{2.71}$$

mit dem Maximalmoment bei Strombegrenzung M_{Mmax} und dem Maximalmoment $M_{1\max}$ ohne Strombegrenzung bei $n = 0$. Die Zeit des Hochlaufs bis zum Zeitpunkt $t = T_{UP}$ erhält man aus Gleichung (2.70):

$$T_{UP} = -T_{SB} \ln\left(1 - \frac{\omega_{UP}}{\omega_{SB0}}\right) \tag{2.72}$$

In der Strombegrenzungsphase muss die Ankerspannung zwangsläufig zurückgenommen werden. Im Stillstand des Motors, d. h. zum Startzeitpunkt des Hochlaufs, wird die

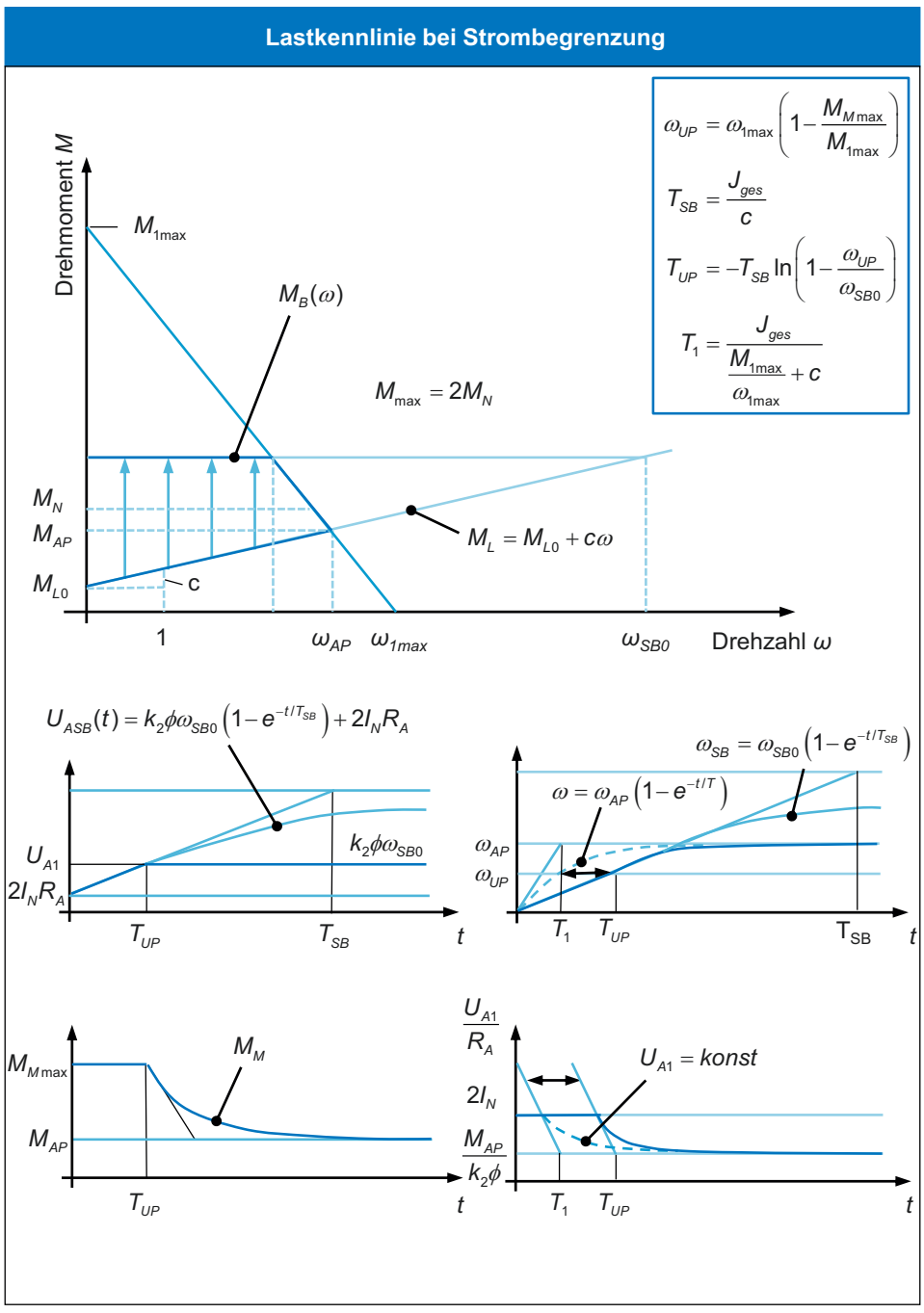


Bild 2.35 Hochlauf eines Gleichstromantriebs mit linearer Lastkennlinie

Spannung durch den Ankerwiderstand und die Stromgrenze $2I_N$ vorgegeben:

$$U_A(t=0) = 2I_N R_A \tag{2.73}$$

Mit zunehmender Motordrehzahl ω hat die Ankerspannung $U_A(t)$ zusätzlich die elektromotorische Gegenspannung des Motors zu überwinden. Sie läuft daher nach der Gesetzmäßigkeit von Gleichung (2.2) und Gleichung (2.70) mit

$$U_A(t) = k_2 \phi \omega(t) + 2I_N R_A \tag{2.74}$$

$$U_A(t) = k_2 \phi \omega_{SB0}\left(1 - e^{-t/T_{SB}}\right) + 2I_N R_A \tag{2.75}$$

hoch, bis der Wert $U_{A(t)} = U_{A1}$ erreicht ist, der ohne Strombegrenzung von Anfang an eingestellt worden wäre ▫ Bild 2.34. In der zweiten Phase, d. h. für $\omega_{UP} \leq \omega$, gelten die vorher abgeleiteten Beziehungen ohne Strombegrenzung. Aus diesem Grund sind die entsprechenden Kennlinien analog zu ▫ Bild 2.34 ebenfalls in ▫ Bild 2.35 eingetragen worden. Den Verlauf der Kennlinien für den zweiten Teil der Hochlaufphase erhält man durch Parallelverschiebung dieser Kurven entlang der Zeitachse durch den Punkt bei $t = T_{UP}$, wie es durch die Pfeile in ▫ Bild 2.35 für permanenterregte Synchronmotorenangedeutet ist. Für den Fall, dass die Lastmomentenkennlinie $M_L = M_{L0} = konst$ ist und keinen drehzahlabhängigen Term „c" aufweist, vereinfacht sich Gleichung (2.65) zu:

$$M_B(\omega) = M_{M\max} - M_{L0} = J_{ges}\dot{\omega}_{SB} = konst \tag{2.76}$$

Das bedeutet, dass in der Strombegrenzungsphase ein konstantes Beschleunigungsmoment vorliegt. Der erste Teil der Hochlaufkurve wird zu einer Geraden:

$$\omega_{SB}(t) = \frac{M_{M\max} - M_{L0}}{J_{ges}} t \tag{2.77}$$

für $\omega_{SB} \leq \omega_{UP}$.
Die Beziehung für ω_{UP} laut Gleichung (2.71) bleibt erhalten. Die Zeit bis zum Umschaltpunkt ergibt sich aus Gleichung (2.77) zu

$$T_{UP} = \frac{J_{ges}}{M_{M\max} - M_{L0}} \omega_{UP} \tag{2.78}$$

Die Ankerspannung läuft ebenfalls linear bis $\omega = \omega_{UP}$ bzw. $t = T_{UP}$ hoch:

$$\begin{aligned} U_A(t) &= k2\phi\omega(t) + 2I_N R_A \\ &= k_2\phi\left(\frac{M_{M\max} - M_{L0}}{J_{ges}}\right)t + 2I_N R_A \end{aligned} \tag{2.79}$$

Oberhalb T_{UP} bzw. ω_{UP}, d. h. in der Phase ohne Strombegrenzung, gilt das vorher Beschriebene.

2.2.5.3 Numerische Ermittlung des Hochlaufs bei nichtlinearen und unstetigen Kennlinien

Sind die Kennlinien von Motor und Last nicht linear, so kann zur Ermittlung des Hochlaufs ein Näherungsverfahren angewendet werden, ▫ Bild 2.36.

Innerhalb vorgegebener Winkelgeschwindigkeitsbereiche $\Delta\omega_i$ werden die tatsächlichen Funktionsverläufe $M_M(\omega)$ und $M_L(\omega)$ durch ihre Mittelwerte $\overline{M}_M(\Delta\omega_i)$ bzw. $\overline{M}_L(\Delta\omega_i)$ ersetzt (Treppenkurve). Die Bewegungsgleichung geht für diese Kreisfrequenzintervalle über in die lineare Beziehung:

$$M_B(\Delta\omega_i) = M_M(\Delta\omega_i) - M_L(\Delta\omega_i) = J_{ges}\frac{\Delta\omega_i}{\Delta t_i} \tag{2.80}$$

Hieraus lässt sich jeweils die Zeit Δt_i berechnen, die der Antrieb benötigt, um den Winkelgeschwindigkeitsbereich $\Delta\omega_i$ zu durchlaufen:

$$\Delta t_i = \frac{J_{ges}\Delta\omega_i}{M_B(\Delta\omega_i)} \tag{2.81}$$

Durch Aneinanderreihen der Geradenstücke für die einzelnen $\Delta\omega_i$-Werte mit den ermittelten Zeitabschnitten Δt_i auf der Zeitachse kann die Hochlaufkurve konstruiert werden. Sind die Zeitabschnitte Δt_i hinreichend klein gewählt, so ist die Genauigkeit des Verfahrens durchaus ausreichend.

2.2.5.4 Auswahl von Motoren nach statischen Gesichtspunkten

Hauptantriebe dienen zur Erzeugung der Arbeitsbewegungen in Form von Schnitt bzw. Umformbewegungen relativ zwischen Werkzeugen und Werkstücken. Um optimale Werkzeugstandzeiten und Oberflächenqualitäten am Werkstück zu erreichen, ist eine gezielte Einstellung der Drehzahlen, angepasst an die verschiedenen Werkzeug- bzw. Werkstückdurchmesser und an deren Werkstoffe, unabdingbar. Die zwei wichtigsten statischen Auslegungskriterien, nach denen ein Hauptantrieb für eine bestimmte Maschine dimensioniert wird, sind der Leistungs- und der Drehzahlstellbereich. Die Motorleistung ergibt sich dabei aus dem Produkt der Schnittkraft und der Schnittgeschwindigkeit an der Bearbeitungsstelle. Bei der Auswahl der Motoren werden in den meisten Fällen die Extremwerte der vorkommenden Bearbeitungssituationen, erweitert um einen Sicherheitsfaktor, zu Grunde gelegt. Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads η_{mech} der mechanischen Übertragungslieder und des Motors ergibt sich die geforderte elektrische Motornennleistung zu

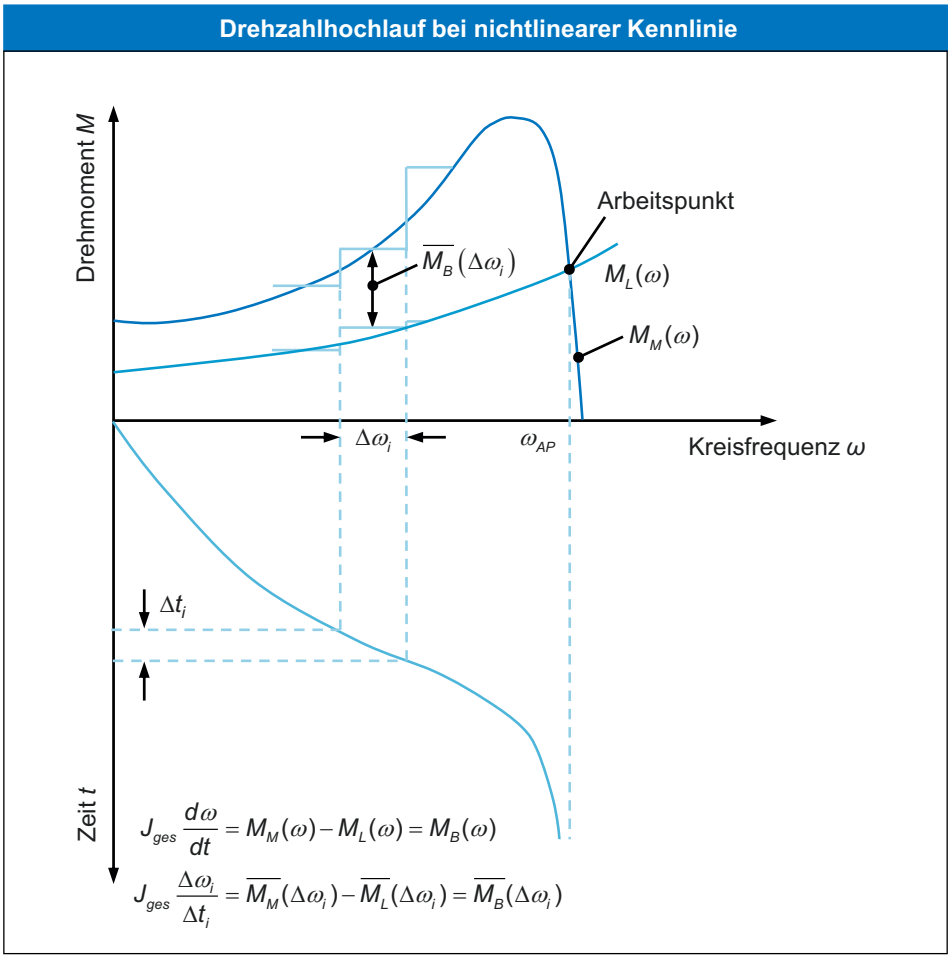


Bild 2.36 Ermittlung des Hochlaufs bei nichtlinearer Motor- und Lastkennlinie

$$P_M = P_{Prozess}\frac{1}{\eta_{mech}} \tag{2.82}$$

In seltenen Fällen wird zur Vermeidung von Motorüberdimensionierungen auch der zeitliche Verlauf der Belastung berücksichtigt. Die für einen Motor angegebene Nennleistung ist im Allgemeinen die Leistung, die ein Motor im Dauerbetrieb abgeben kann, ohne thermisch überlastet zu werden. Die kurzzeitigen Spitzenleistungen dürfen deutlich höher liegen. Leistungen elektrischer Hauptantriebe können daher entsprechend ihrer Betriebsart, d. h. ihres Belastungsprofils nach DIN VDE 0530 [DIN02], ausgewählt werden. Die zeitliche Belastung des Motors muss hierzu natürlich bekannt sein. In Bild 2.37 sind die für Hauptantriebe wichtigsten Betriebsarten dargestellt.

Neben dem Dauerbetrieb (Betriebsart S1), in dem der Motor bei konstanter Belastung einen thermischen Beharrungszustand erreicht, sind der Kurzzeitbetrieb S2 sowie die periodischen Betriebsarten S3 und S6 zu nennen. Im Kurzzeitbetrieb S2 setzt sich das Belastungsprofil aus einer Belastungszeit und einer Abkühlpause zusammen. Innerhalb der Belastungszeit t_B darf die Motortemperatur, ausgehend von der Umgebungstemperatur, den thermischen Beharrungszustand nicht erreichen. Die nachfolgende Abkühlpause muss mindestens so lang sein, dass die Motortemperatur wieder auf die Ausgangstemperatur zurückgehen kann.

Die Belastungszeit t_B wird bei einer Leistungsangabe für die Betriebsart S2 mit angegeben (Beispiel: 40 kW S2 30 min). Auch im Aussetzbetrieb S3 setzt sich das Belastungsprofil aus einer Belastungszeit t_B und einer Stillstandszeit t_{St} zusammen. Hier wird jedoch die Folge von Belastung und Stillstand periodisch wiederholt, wobei die Motortemperatur weder während der Belastungszeit noch während der Stillstandszeit einen thermischen Beharrungszustand erreicht. Kenngrößen für diese Betriebsart sind die Spieldauer t_S, unter der man die Summe aus einer Belastungszeit t_B und nachfolgender Stillstandszeit t_{St} versteht, sowie die relative Einschaltdauer t_r, die das Verhältnis von t_B zu t_S in Prozent angibt.

Die Leistungsangabe eines Motors mit 30 kW S3 40 % 15 min bedeutet also, dass dieser Motor periodisch mit 30 kW belastet werden kann, wenn die Belastungszeit jeweils 6 min und die darauffolgende Stillstandszeit 9 min dauert. Bei Leistungsangaben ohne Angabe der Spieldauer beträgt diese ver-

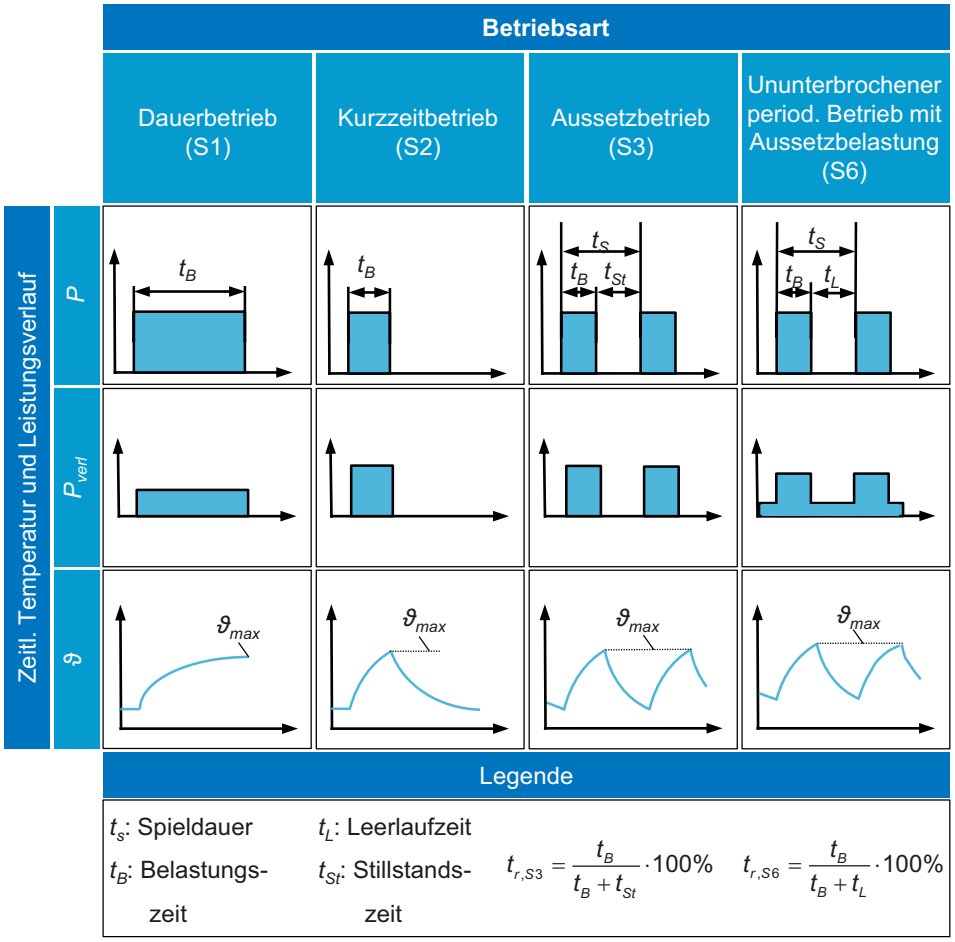


Bild 2.37 Betriebsarten nach DIN VDE 0530

einbarungsgemäß 10 min. Bei der Betriebsart S6 (ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung) setzt sich das Belastungsprofil aus periodisch abwechselnder Belastung und Leerlauf zusammen. Leistungsangaben erfolgen analog zur Betriebsart S3.

2.2.6 Bauarten basierend auf Gleichstrom- und Drehstromservoantriebe

Bis vor einigen Jahren wurden als Servoantriebe fast ausschließlich Gleichstrommotoren eingesetzt. Dies lag an der einfachen und kostengünstigen Speise- und Regelungsmöglichkeit durch Regelung nur eines Stromes. Bei Drehstromantrieben müssen dagegen drei Strangströme in Abhängigkeit vom umlaufenden Läuferfeld geregelt werden, um das gewünschte Drehmoment einzustellen. Für diese komplexere Regelung ist außerdem die Messung der Ständerströme und der Rotorlage erforderlich. Seit mit modernen Leistungshalbleitern und der Weiterentwicklung der Mikroelektronik die Realisierung komplexer Regelungs- und Umrichtermodule preiswert möglich ist, ist der Gleichstromservomotor aufgrund der prinzipiellen Unterlegenheit seiner Antriebseigenschaften größtenteils durch Drehstromantriebe abgelöst worden [ISER99] .

Der entscheidende Nachteil des Gleichstrommotors ist der Kommutator. Er ist verschleißbehaftet und begrenzt die Motordynamik. Außerdem ist wegen der Einbrenngefahr der Bürsten im Stillstand nur eine vergleichsweise geringe Drehmomentabgabe möglich. Die für Servoantriebe eingesetzten Drehstrommotoren kommen ohne Schleifkontakte zwischen Stator und Rotor aus und sind daher wartungsfrei. Wesentlicher Vorteil des Synchronmotors gegenüber dem Asynchronmotor ist die wesentlich einfachere Regelbarkeit. Dagegen kann die Asynchronmaschine durch Feldschwächung in einem weiten Drehzahlbereich betrieben werden. Bei der Synchronmaschine ist diese Betriebsart in der permanentmagneterregten Standardbauform nicht möglich. Bei der Synchronmaschine kommt es aufgrund der Permanenterregung zu keiner nennenswerten Läufererwärmung, wohingegen beim Gleichstrom- und beim Asynchronmotor dort mit erheblicher Erwärmung zu rechnen ist.

Dynamisch sind Asynchron- und Synchronantriebe nahezu gleichwertig und sind Gleichstromantrieben überlegen. Außer der Verbesserung der Regelung zielen weitere Entwicklungen bei allen Motorarten auf eine höhere Integra-

tionsdichte und in Verbindung mit den Antriebsverstärkern auf komfortablere Bedien- und Diagnosemöglichkeiten sowie auf eine verstärkte Vernetzung und Kopplung mehrerer Antriebe.

2.2.6.1 Schrittmotoren

Das charakteristische Verhalten der Schrittmotoren ist das Drehen der Motorwelle in diskreten Schritten. Vom Prinzip her ist der Schrittmotor ein Synchronmotor, dessen Ständerwicklungen durch einen rechteckförmigen Stromverlauf im zyklischen Wechsel gespeist werden. Dadurch bildet sich ein Magnetfeld aus, dessen Orientierung beim Umschalten der Ständerströme springt. Der Rotor folgt diesem Feld in seine neue Lage und führt somit einen diskreten Winkelschritt aus.

Schrittmotoren ermöglichen ein schnelles und schrittgenaues Positionieren ohne Rückmeldung der Rotorlage, d. h. es ist prinzipiell kein Regelkreis mit aufwendigem Messsystem erforderlich. Wird der Motor als Positionierantrieb verwendet, soll der Schrittwinkel möglichst klein werden. Die Anzahl der Schritte pro Umdrehung lässt sich durch ein vorgeschaltetes Getriebe an die Anforderungen anpassen.

Nachteilig ist das unkontrollierbare Außerschrittfallen bei zu hoher Belastung und die Neigung zu Schwingungen beim Betrieb im Bereich der Eigenfrequenzen. Günstig ist neben der einfachen Ansteuerung bei hoher Positioniergenauigkeit die Robustheit und Wartungsfreiheit.

Bauarten von Schrittmotoren

Der lamellierte Stator der Schrittmotoren hat ausgeprägte, meist gezahnte Ständerpole und konzentrierte Erregerwicklungen. Die Zahnung der Polenden in Längsrichtung dient der Verkleinerung des Schrittwinkels. Die unterschiedlichen Bauarten unterscheiden sich vor allem durch verschiedenartige Ausbildung der Rotoren (Läufer).

Reluktanzschrittmotoren besitzen einen unerregten Läufer mit Zahnstruktur. Die Ausbildung des Drehmoments wird durch in Umfangsrichtung unterschiedliche magnetische Leitfähigkeit des Läufers ermöglicht [ISER99].

Permanentmagnetisch erregte Schrittmotoren entsprechen der konventionellen Vollpolsynchronmaschine mit Permanenterregung. Der Rotor stellt sich in Koinzidenz mit der erregten Ständerwicklung ein. Diese Motoren entwickeln beim Abschalten der Erregung ein Selbsthaltemoment, d. h. der nichterregte Motor kann statisch belastet werden, ohne eine Drehung hervorzurufen.

Zur Erzielung großer Auflösungen und hoher Drehmomente lassen sich die Vorteile des Reluktanz- und des permanenterregten Motors im sogenannten Hybridmotor kombinieren. Der Rotor besteht hier aus einem in axialer Richtung magnetisierten Permanentmagneten, an dessen Enden zwei gezahnte Scheiben aus Weicheisen angefügt werden. Der magnetische Kreis des Motors wird über den Stator geschlossen und es ergibt sich eine Konzentration des Feldes in den Zähnen. Werden die beiden Zahnscheiben um eine halbe Zahnteilung gegeneinander versetzt montiert, ergibt sich über den Umfang gesehen ein feines Raster von Nord- und Südpolen. Durch eine Zahnung der Statorpole wird das Luftspaltfeld auf die Bereiche konzentriert, in denen sich Stator- und Rotorzähne gegenüberstehen. Übliche Polpaarzahlen p liegen hier im Bereich zwischen 25 und 125.

Durch eine Zahnung der Statorpole lässt sich im Stator ebenfalls eine hohe Polpaarzahl erreichen. Die Schrittzahl ist nicht nur der Polpaarzahl p, sondern auch der Strangzahl (Anzahl der elektrisch unabhängigen Phasen) proportional. Aus diesem Grund werden Hybrid-Schrittmotoren mit mehr als zwei Strängen hergestellt, obwohl dazu ein Mehraufwand an Steuerelektronik erforderlich ist.

Betriebsarten von Schrittmotoren

Je nach Bestromung der Ständerwicklungen unterscheidet man die Betriebsarten Vollschritt-, Halbschritt- und Mikroschrittbetrieb. In Bild 2.38 sind der prinzipielle Aufbau einer Ansteuerung eines Drei-Phasen-Schrittmotors sowie die schrittweise Weiterschaltung im Halbschrittbetrieb für den permanenterregten Schrittmotor dargestellt.

Beim Vollschrittbetrieb werden mehrere benachbarte Wicklungen bestromt, da sich so ein höherer resultierender Feldvektor als bei der Bestromung einer einzelnen Wicklung ergibt. Im Schrittmotormodell bilden sich zum Zeitpunkt t_1 im Ständer zwei Südpole und ein Nordpol aus, der Läufer stellt sich in die dargestellte Rastlage ein. Man erreicht hier einen Vollschrittbetrieb, wenn im Bestromungsdiagramm in Bild 2.38 nur die ungeradzahligen Schrittfolgen gewählt werden. Durch Umpolung der Spannung U_B zum Zeitpunkt t_3 führt der Läufer den ersten Schritt mit dem Schrittwinkel 60° aus. Durch erneutes Umpolen werden weitere Schritte gesteuert. Linksdrehung wird durch umgekehrten Ablauf der Ansteuerung erreicht. Beim Halbschrittbetrieb wird zwischen den Vollschritten ein weiterer Schritt eingefügt. Es wird jeweils eine Wicklung abgeschaltet, wodurch sich der Läufer direkt auf die Pole der bestromten Wicklung einstellt und somit Halbschritte ausführt [SCHÖ13].

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Erregung einer Phase stufenweise zu verringern bei gleichzeitiger Erhöhung der Erregung in der zweiten Phase. Der Vollschritt wird hier in theoretisch beliebig viele Einzelschritte unterteilt. Diese Betriebsart wird Mikroschrittbetrieb genannt, wodurch selbst mit einer kleinen Polpaarzahl eine hohe Winkelauflösung erreicht werden kann. Die Anzahl der Zwischenschritte ist in der Praxis durch die Winkelfehler begrenzt, die durch die Belastung, das Haftreibungsband und durch nicht exakte Steuerung der Phasenströme verursacht werden.

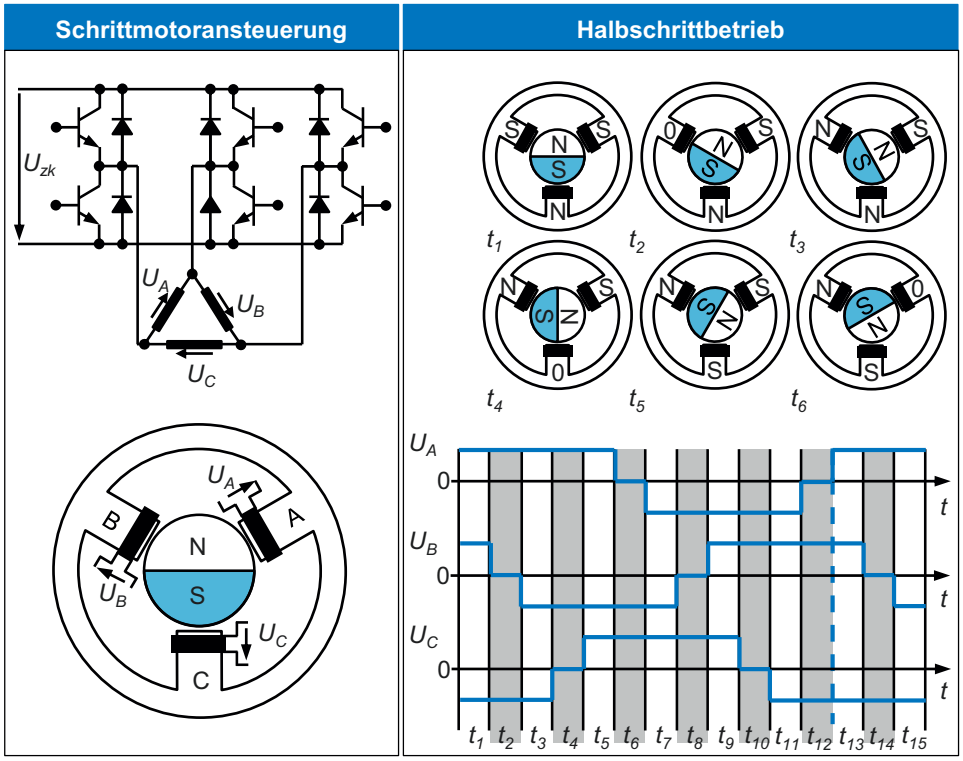
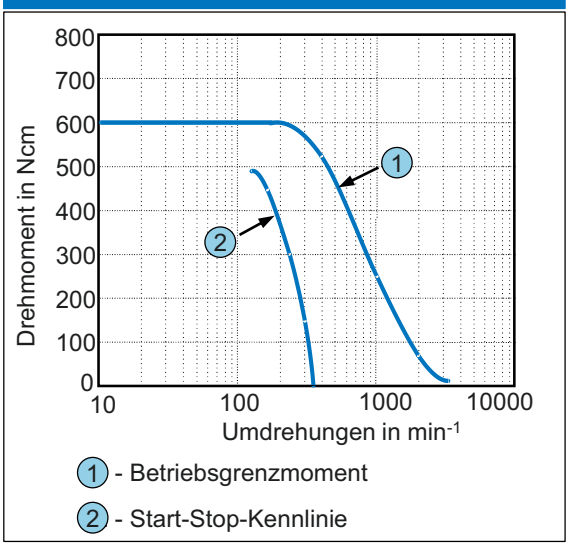


Bild 2.38 Funktionsprinzip und Betriebsarten eines Drei-Phasen-Schrittmotors. Nach Schneider Electric

Kenngröße	Wert
Schrittwinkel [°]	0,36
Anlaufdrehmoment [Nm]	6,80
max. Drehmoment [Nm]	6,00
Haltemoment, erregt [Nm]	6,78
Rotorträgheitsmoment [kgm²]	3,3 ·10⁻⁴
Schritte / Umdrehung	1000
Leistungsklasse [W]	350
max. Schrittfrequenz [kHz]	60
max. Drehzahl [s⁻¹]	120
max. Start-Stopp-Frequenz [kHz]	5,3
Nennstrom / Zuleitung [A]	2,3
Widerstand /Wicklung [Ω]	6,5
Gewicht [kg] ca.	4,2

Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie



Beschleunigungs- und Abbremsverhalten

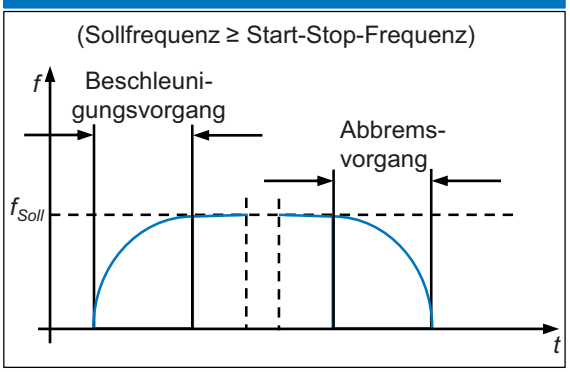


Bild 2.39 Technische Daten eines Fünf-Phasen-Schrittmotors. Nach Schneider Electric

Schrittmotoren werden vereinzelt auch wie eine elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine in einem geschlossenen Regelkreis betrieben. Dazu werden diese mit einem inkrementellen Geber (Encoder) ausstattet. Durch Regelung der Ständerströme kann der sonst bei der Ausführung eines Winkelschrittes unkontrolliert stattfindende Ausgleichsvorgang ausgeregelt werden. Dadurch ist ein zeitoptimaler Positioniervorgang möglich, da das unkontrollierte Außerschrittfallen des Schrittmotors bei zu schneller Schrittabfolge verhindert wird.

Beispiele und Kenngrößen

Die technischen Daten eines Schrittmotors sowie die Drehmoment-Drehzahlabhängigkeit zeigt Bild 2.39. Bei Betrieb mit höheren Schrittfrequenzen ist das maximale Drehmoment, mit dem der Schrittmotor belastet werden darf, kleiner als das Haltemoment. Das rührt daher, dass sich bei steigender Frequenz die Ströme nicht mehr voll ausbilden können. Ursache hierfür sind im Wesentlichen die Induktivitäten der Wicklungen. Durch Konstantstrombetrieb im Leistungsteil der elektronischen Ansteuerung kann der Abfall der Kennlinie zu höheren Frequenzen hin verschoben werden.

Als Start-/Stoppfrequenz bezeichnet man die sprunghafte Frequenzänderung, mit der ein Schrittmotor ohne Schrittfehler aus dem Stillstand beschleunigt oder abgebremst werden kann. Soll der Motor mit einer höheren Schrittfrequenz betrieben werden, ist die Frequenz nach einer Zeitfunktion bis zur gewünschten Frequenz zu erhöhen. Eine gute Anpassung des Beschleunigungsvorganges an den Verlauf des Betriebsgrenzmomentes lässt sich durch einen exponentiellen Verlauf der Hochlaufkurve erreichen.

2.2.6.2 Linearmotoren

Die Weiterentwicklung der Schneidstoffe für die Metallzerspanung in den letzten Jahren erlaubt die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (HSC: engl. High Speed Cutting) mit Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten, die um Größenordnungen über denen herkömmlicher Prozesse liegen. Zur Erzeugung translatorischer Vorschubbewegungen werden herkömmlicherweise rotatorische Antriebe mit einem mechanischen Umwandlungsgetriebe wie Kugelgewindetrieb, Ritzel-Zahnstange oder Schnecke-Zahnstange kombiniert. Von Nachteil sind hierbei die ungünstigen Eigenschaften der mechanischen Übertragungselemente, wie Spiel, Elastizität, Reibung und die zusätzliche Trägheitsmasse. Sie stellen im Antriebsstrang hinsichtlich Geschwindigkeit, Laststeifigkeit, Verfahrweg und Dynamik den begrenzenden Faktor dar.

Zur Überwindung dieser Nachteile kann bei der Verwendung von Linearmotoren auf mechanische Übertragungselemente verzichtet werden. Der Kraftfluss vom Motor zur abtriebsseitigen Mechanik erfolgt hierbei auf dem kürzesten Weg, sodass Umkehrspiel und Elastizitäten des Antriebsstrangs entfallen. In Verbindung mit digitalen Steuerungen lässt sich mit einem Linearmotor eine hohe Regelgüte mit einem großen K_V-Faktor (vgl. ▶ Kap. 3) erreichen, der auch bei großen Verfahrgeschwindigkeiten einen geringen Schleppfehler und eine hohe Positioniergenauigkeit ermöglicht. Dadurch lassen sich die Forderungen an moderne Vorschubantriebe, wie höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit bei gleicher oder gesteigerter Bahngenauigkeit, hohe statische und dynamische Laststeifigkeit und ein prinzipiell beliebig großer Verfahrweg besser erfüllen. Der Antriebsstrang eines Linearantriebs kann auf diese Weise verschleiß-, spiel- und reibungsfrei ausgeführt werden.

Bauarten von Linearmotoren

Linearmotoren sind lineare Ausführungsformen rotierender Maschinen. Intuitiv können diese als Abwicklung eines bis zur Achse aufgeschnittenen Rotationsmotors vorgestellt werden. Prinzipiell kann ein Linearmotor als Schritt-, Asynchron-, Synchron- oder Gleichstrommotor ausgeführt sein. Die Realisierung eines Gleichstrommotors bietet sich jedoch nicht an, da Kontaktelemente zur Stromübertragung notwendig sind. Die beiden Teilsysteme des Linearmotors werden als Primär- und Sekundärteil bezeichnet. Das Primärteil wird aus dem Stator der entsprechenden rotierenden Maschine abgeleitet. Im Bild 2.40 wird der prinzipielle Aufbau des Asynchron- und des Synchron-Linearmotors gegenübergestellt. Zu erkennen ist der prinzipiell gleiche Aufbau der Primärteile aus einem Blechpaket mit eingelegten Drehstromwicklungen. Das Sekundärteil besteht beim Asynchron-Linearmotor aus einem Kurzschlusskäfig mit Eisenkern, beim Synchron-Linearmotor dagegen trägt es die Permanentmagnete.

Bei der üblichen Bauart eines Synchron-Linearmotors mit eisenbehaftetem Primärteil treten aufgrund der permanentmagnetischen Erregung hohe Anziehungskräfte zwischen Primär- und Sekundärteil auf, die bis zum zehnfachen der Dauervorschubkraft betragen können. Diese Kräfte müssen von der Linearführung aufgenommen werden, was zu Reibung und Verschleiß führen kann. Die Permanentmagnete beim Synchron-Linearmotor sind in ihren Abmaßen zumeist vergleichsweise groß gegenüber dem Luftspalt. Hieraus folgt, dass die Vorschubkraft nicht nur vom Strom, sondern auch vom Vorschubweg abhängig ist. Diese Kraftwelligkeit (Cogging) kann durch eine geschrägte Anordnung der Wicklung bzw. eine Schrägung der Nuten des Eisenkerns oder auch durch schräge Befestigung der Permanentmagnete stark verringert werden. Für die Vorschubrichtung liegt die Kraftwelligkeit in der Größenordnung von 5 % der Vorschubkraft. Die Kraftwelligkeit wirkt sich ebenfalls in Normalenrichtung aus. Weiterhin resultiert aus der genannten Schrägung, dass neben der Vorschubkraft und der Anziehungskraft von einer geringen Querkraft auszugehen ist, falls diese nicht durch einen geeigneten symmetrischen Aufbau entfällt. Zur Ansteuerung des Synchronmotors ist eine Er-

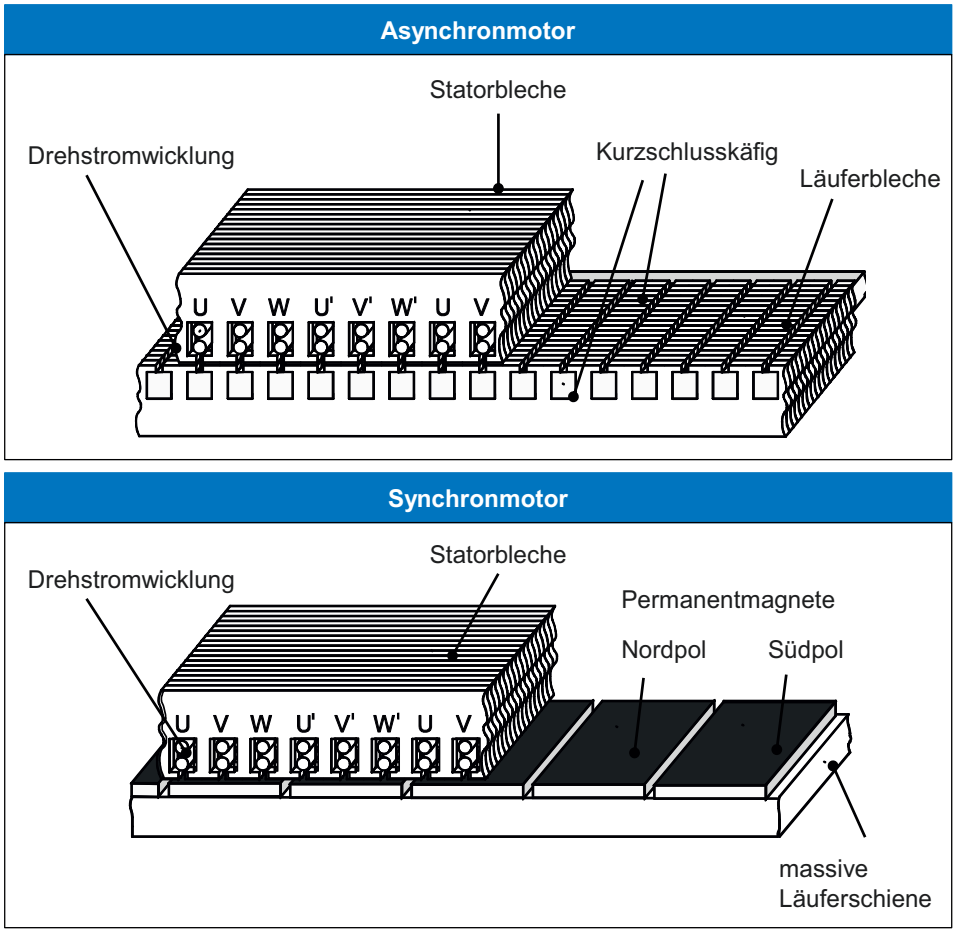


Bild 2.40 Querschnitte des Asynchron- und Synchron-Linearmotors

kennung der Pollage der Permanentmagnete erforderlich. Dies kann durch eine Hall-Sonde oder durch die Verwendung absoluter Wegmesssysteme erfolgen.

Zur Ausführung von Relativbewegungen muss entweder das Primär- oder das Sekundärteil verlängert werden, was zur Lang- bzw. Kurzstatorbauweise führt. Der Langstatormotor weist eine zum Verfahrweg proportional steigende Verlustleistung auf und ist daher nur bei kleinen Verfahrwegen sinnvoll einzusetzen. Für hochdynamische Linearmotoren wird fast ausschließlich die Kurzstatorbauweise verwendet. Hierbei ist das Sekundärteil des Motors verlängert. Da bei dieser Bauart des Linearmotors die Fläche des Sekundärteils proportional mit dem Verfahrweg wächst, sind beim Synchron-Linearmotor viele teure Permanentmagnete zu dessen Aufbau erforderlich.

Neben der Einzelkammanordnung der Primär- und Sekundärteile eines Linearmotors, die in Bild 2.40 gezeigt ist, unterscheidet man weiterhin noch den Doppelkamm-Linearmotor und den Solenoidmotor (Bild 2.41). Der Solenoidmotor ist röhrenförmig aufgebaut und wird auch als Gehäuse-Linearmotor bezeichnet. Aufgrund der fertigungstechnischen und konstruktiven Nachteile hat der Solenoidmotor in der Praxis jedoch nur eine geringe Bedeutung.

Die in Bild 2.40 gezeigte Einzelkammanordnung ist die preisgünstigste und konstruktiv einfachste Lösung und kann für nahezu beliebig große Verfahrwege angewendet werden. Bei der Doppelkammanordnung sind zwei Einzelantriebe symmetrisch derart angeordnet, dass sich die Anziehungskräfte weitestgehend aufheben. Die Anziehungskräfte können als innere Kräfte über das Gehäuse geführt werden. Außerdem kann das Gewicht des Sekundärteils reduziert werden, wodurch erheblich größere Beschleunigungen möglich sind. Die Doppelkammbauweise kommt daher für kurzhubige Bewegungen mit hohen geforderten Beschleunigungen zum Einsatz.

Eine weitere Möglichkeit, die Masse von Synchron-Linearmotoren zu verringern, ist die eisenlose Ausführung des Primärteils. Zwar wird hierdurch die Kraftwirkung reduziert, jedoch können eine hohe Dynamik des Antriebs und damit Reglerbandbreiten bis 100 Hz erreicht werden. Weiterhin wird hierdurch das Cogging vernachlässigbar gering.

Vorteilhaft bei Asynchron-Linearmotoren ist, dass im stromlosen Zustand der Maschine keine Magnetkräfte wirken. Als gewichtiger Nachteil des Asynchron-Linearmotors gegenüber der synchronen Ausführung ist aber die starke Erhitzung der Sekundärteilschiene zu nennen. Große thermoelastische Maschinenstrukturverformungen

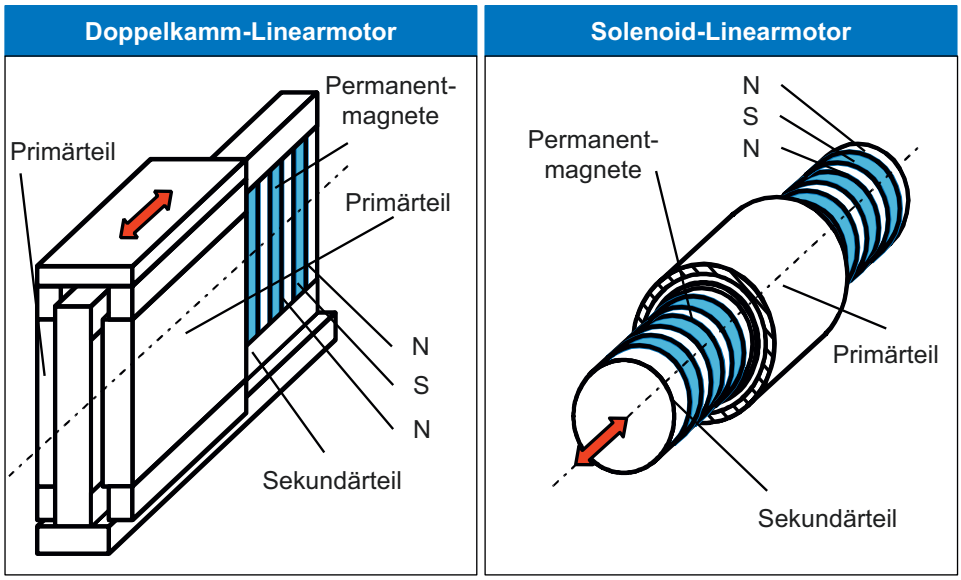


Bild 2.41 Doppelkamm- und Solenoid-Linearmotor

können die Folge sein. Als wesentliche Vorteile des Synchronmotors gegenüber dem Asynchronmotor sind erheblich höhere erreichbare Dauervorschubkräfte, das Fehlen von elektrischen Verlusten im Sekundärteil und die starke Überlastfähigkeit bis zu einem Faktor von 30 : 1 zu nennen. Weiterhin lässt sich mit modernen Synchron-Linearmotoren ein Geschwindigkeitsbereich zwischen 1 µm/s und 10 m/s abdecken. Vorschubkräfte bis ca. 20 kN sind erreichbar und Beschleunigungen von bis zu 10 g möglich. Damit erscheint der Synchronmotor als die geeignetere Bauweise für einen Einsatz als Vorschubantrieb in einer Werkzeugmaschine.

Die Linearmotortechnik bietet eine Reihe von neuen Möglichkeiten für die Maschinenkonstruktion. So kann durch den Einsatz mehrerer Primär- und Sekundärteile je Antriebsachse die Antriebskraft besser in die mechanische Konstruktion eingeleitet und die maximale Vorschubkraft gesteigert werden. Es besteht beispielsweise die Möglichkeit, zwei parallele Sekundärteile zu verwenden, auf denen sich jeweils ein Primärteil bewegt. Die Motoren können mit einem eigenen Messsystem ausgestattet sein und von getrennten Umrichtern gespeist werden oder mit einem gemeinsamen Messsystem an einem einzigen Umrichter betrieben werden. Gantry-Bauformen und neue Kinematiken von Maschinen sind hierdurch realisierbar.

Anforderungen an die Maschinenkonstruktion

Durch die Anwendung von Linearmotoren in Werkzeugmaschinen werden aber auch andere Anforderungen als bislang an das Maschinenkonzept gestellt (Bild 2.42). Da die magnetische Vorschubkraft direkt zwischen dem am Schlitten befestigten Primärteil und dem stationären Sekundärteil entsteht, ist eine Kraftübersetzung nicht möglich. Eine Erhöhung der Vorschubkraft ist zwar durch paralleles Anordnen mehrerer Linearmotoren erzielbar, jedoch muss zum Erreichen hoher Beschleunigungen die bewegte Masse bei gleichzeitig hoher Steifigkeit so klein wie möglich gehalten werden, sodass Leichtbaumaßnahmen sinnvoll sind. Die Tatsache, dass die zur Verfügung stehende Kraft allein vom verwendeten Motor abhängt und das Beschleunigungsvermögen direkt umgekehrt proportional zur linear bewegten Masse ist, ist für den Fall zu beachten, dass mittels eines Linearmotors Werkstücke unterschiedlicher Masse zu bewegen sind. Das geänderte Beschleunigungsverhalten muss auch bei der NC-Programmierung berücksichtigt werden, da die Maschine unter Umständen nicht mehr die geforderten Fertigungsgenauigkeiten aufbringen kann. Des Weiteren ist besonders beim Synchronmotor der permanentmagnetische Zustand des Sekundärteils zu nennen, der sowohl die Montage als auch die Späneabfuhr erschwert.

Um eine Anregung der Maschinenstruktur durch den Antrieb zu vermeiden, müssen die mechanischen Eigenfrequenzen der Struktur über der sogenannten Bandbreite des Antriebs liegen. Die Bandbreite des Antriebs ist die Frequenz einer Auslenkung, bei der die gemessene Wegantwort noch 70 % der Sollantwort beträgt. Da die Bandbreite eines Linearmotors höher liegt als die eines konventionellen elektromechanischen Antriebs, steigen die Anforderungen an die Konstruktion der Struktur erheblich. Des Weiteren sind bei senkrechten Achsen aus Sicherheitsgründen Bremsen oder ein Gewichtsausgleich vorzusehen. Ohne einen Ausgleich wäre zudem ein hoher Konstantanteil der Vorschubkraft zur Überwindung des Gewichts notwendig, wodurch es zu einer starken Erwärmung und zu einem richtungsabhängigen Beschleunigungsverhalten des Linearmotors käme. Als Führungen finden vor allem reibungsarme Profilschienenwälzführungen Verwendung. Zur Erhöhung der Regelgüte ist ein hochauflösender Posi-

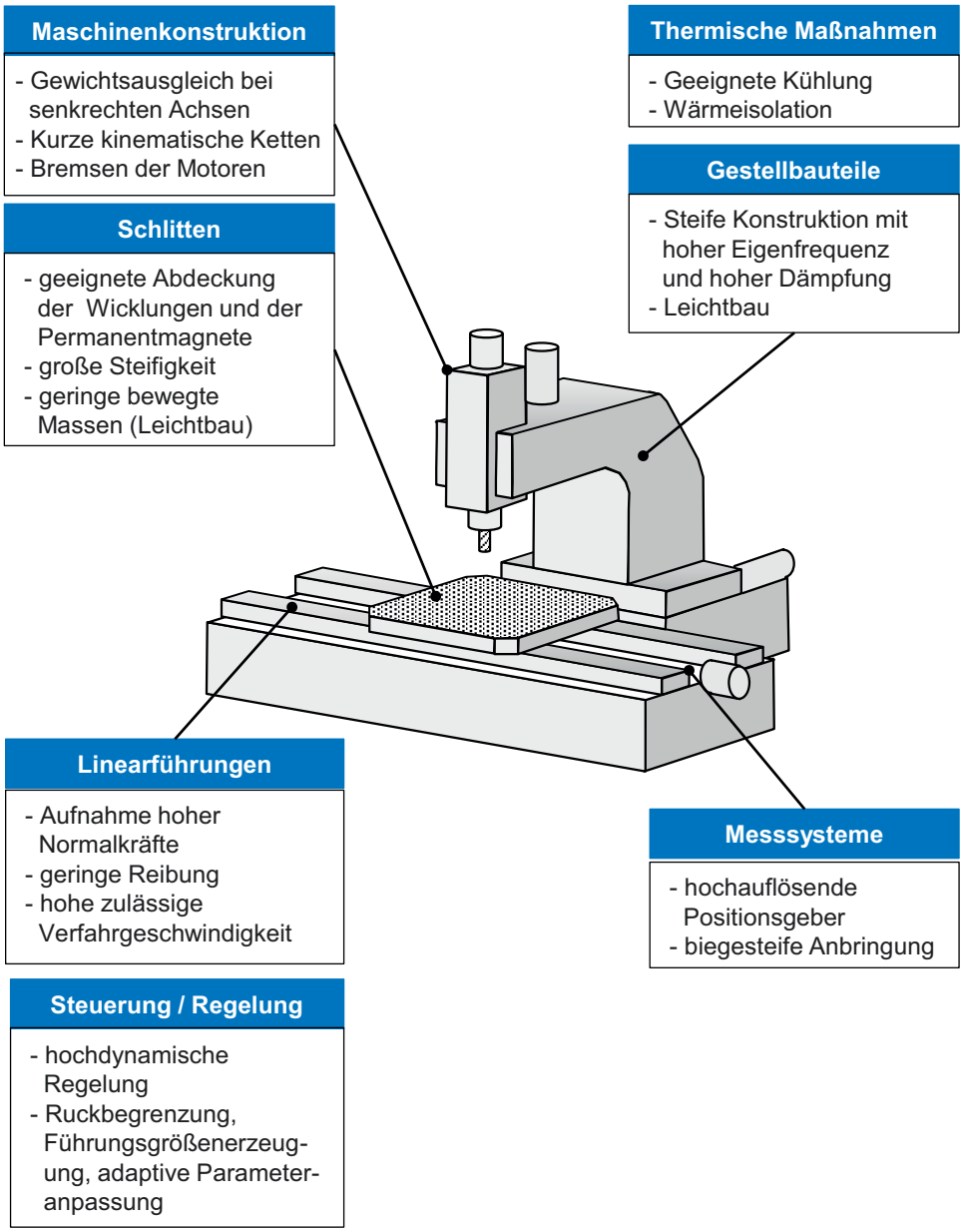


Bild 2.42 Anforderungen an das Maschinenkonzept beim Einsatz von Linearmotoren

tionsgeber in Verbindung mit einer digitalen Regelung notwendig.

Kühlung von Linearmotoren

Ein Nachteil des Linearmotors ist sein geringer Wirkungsgrad bzw. seine hohe Verlustleistung, die zu einer erheblichen Wärmeentwicklung führt. Während bei herkömmlichen Vorschubantrieben eine Verlagerung des wärmeproduzierenden Motors in Randbereiche der Struktur möglich ist, erfolgt bei linearen Direktantrieben die Wärmeentwicklung mitten in der Maschinenstruktur. Daher ist vor allem eine effektive Kühlung der Linearmotoren für deren Einsatz in Werkzeugmaschinen erforderlich. Die Kühlung soll zum Einen die Motorwicklungen selbst kühlen, sodass höhere Dauervorschubkräfte erreicht werden können. Zum anderem muss zur Vermeidung von thermoelastischen Verformungen der Wärmefluss in die umgebende Struktur vermieden werden. Die entstehende Verlustleistung lässt sich z. B. durch eine Flüssigkeitskühlung effektiv abführen. Zusätzlich zu einer Wärmeabfuhr ist bei der Auslegung des Kühlkonzeptes darauf zu achten, dass sich über den Kühler nur ein kleiner Temperaturgradient ausbildet, da es sonst zu Strukturverzerrungen kommt. Dies kann beispielsweise durch eine geeignete Anordnung und Orientierung der Kühlschlangen erfolgen. Außer den aktiven thermischen Maßnahmen kann das thermische Verhalten einer direktangetriebenen Linearachse durch Isolierung des Motorraums positiv beeinflusst werden. Beispielsweise wird durch Einbringen einer Hartgewebeschicht das System thermisch träger, sodass sich Lastschwankungen geringer auswirken. Bild 2.43 zeigt den Querschnitt eines

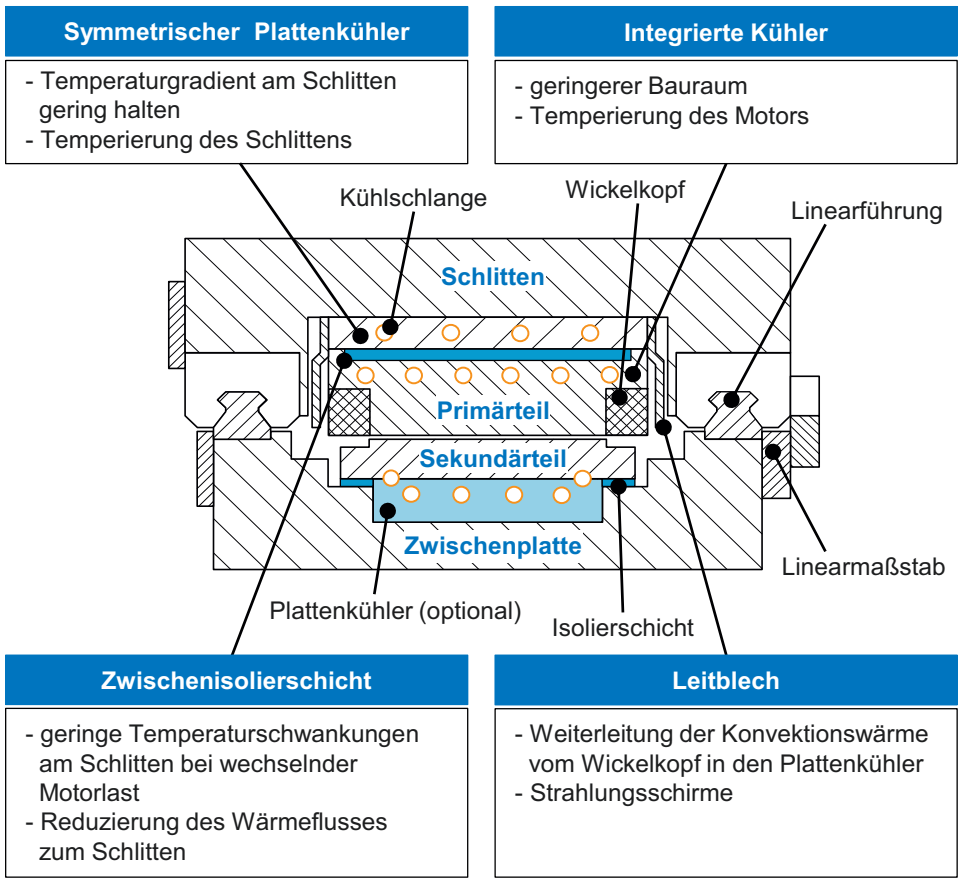


Bild 2.43 Maßnahmen zur Minimierung des Temperatureinflusses eines Linearmotors auf die mechanische Struktur. Nach [Eun99]

thermisch gekapselten Synchron-Linearmotors für anspruchsvolle Einsatzgebiete.

Beispiele

Linearmotoren werden in hochdynamischen Maschinen mit hohen Verfahrgeschwindigkeiten und begrenzten Lastkräften eingesetzt. Anwendungsfelder liegen z. B. in der Laserbearbeitung, im Strahlschneiden und in Pick-and-Place-Automaten. In jüngster Zeit sind auch Werkzeugmaschinen mit Synchron-Linearmotoren verfügbar. Beispielsweise werden in einem Vertikal-Bearbeitungszentrum, das in drei Achsen mit Synchron-Linearmotoren ausgestattet ist, eine Eilganggeschwindigkeit von 2 m/s sowie eine Beschleunigung der Achsen von bis zu 2 g erreicht. In anderen Anwendungen mit Einzelkamm-Linearmotoren werden K_V-Faktoren von mehr als 300 s^{-1} bei einer Messsystemauflösung von bis zu 0,1 µm erreicht. Vorteilhaft werden Linearmotoren auch in Ultrapräzisionsmaschinen eingesetzt. Dort werden bei kleinen Hüben Auflösungen im Nanometerbereich erreicht. Eine typische Anwendung für den Doppelkamm-Linearmotor ist das Unrunddrehen. Bei einer bewegten Masse von ca. 5 kg werden hier bei 6000 Hubbewegungen pro Minute mit $K_V = 2000\,s^{-1}$ und Dauerbeschleunigungen von $110\,m/s^2$ Werkstückgenauigkeiten von ca. 2 µm erreicht.

2.2.7 Strom- und Leistungsmessung an Elektromotoren

Jede Leistung in einer Werkzeugmaschine, sei diese zur Bewegung der Schlitten benötigt oder zur Zerspanung, muss letztlich von einem Antrieb aufgebracht werden. Demzufolge müssen sich Änderungen im Fertigungsprozess auch als Änderungen in der vom Motor aufgenommenen elektrischen Leistung widerspiegeln, wobei nur die Wirkleistung aussagekräftig ist. Diese ist bei Gleichstrommotoren proportional dem Produkt aus Ankerstrom und Ankerspannung. Bei Drehstrommotoren muss zusätzlich noch die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung berücksichtigt werden. Falls am Zwischenkreis der Antriebe nur eine Achse angeschlossen ist oder man die Leistung mehrerer Achsen nur überlagert überwachen will, gibt es auch die Möglichkeit die Leistung durch Messung von Strom und Spannung im Zwischenkreis des Antriebsverstärkers zu bestimmen.

Bei Gleichstrommotoren ist der Betrag des Stroms proportional der Kraft, sodass auch direkt auf die Vorschubkraft bzw. das Drehmoment geschlossen werden kann.

Für die Messung des Motorstromes werden unterschiedliche Prinzipien angewendet. Früher wurde häufig ein sogenannter Shuntwiderstand in die Motorzuleitung

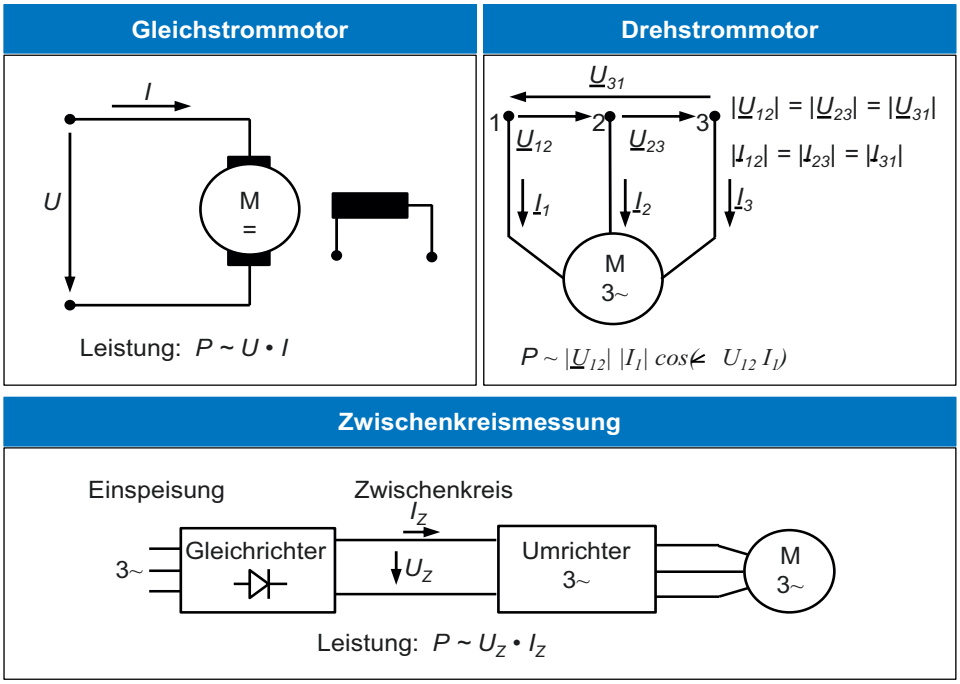


Bild 2.44 Wirkleistungsberechnung bei Gleich- und Wechselstrommotoren

eingefügt. Der Motorstrom erzeugt an dem Widerstand einen proportionalen Spannungsabfall (Bild 2.45). Diese Messanordnung kann sowohl bei Gleichstrom- als auch bei Wechselstrommotoren eingesetzt werden.

Nachteil des Shunts ist die Verlustleistung, die an dem Widerstand abfällt. Zudem ist die abgegriffene Spannung nicht potenzialfrei, was für die weitere Verarbeitung in der nachfolgenden elektrischen Schaltung zusätzlichen Aufwand bedeutet.

Ausschließlich für Wechselstrommessungen ist das Transformatorprinzip geeignet. Die Zuleitung des Motors wird durch einen Ringkern geführt, in dem das tangential

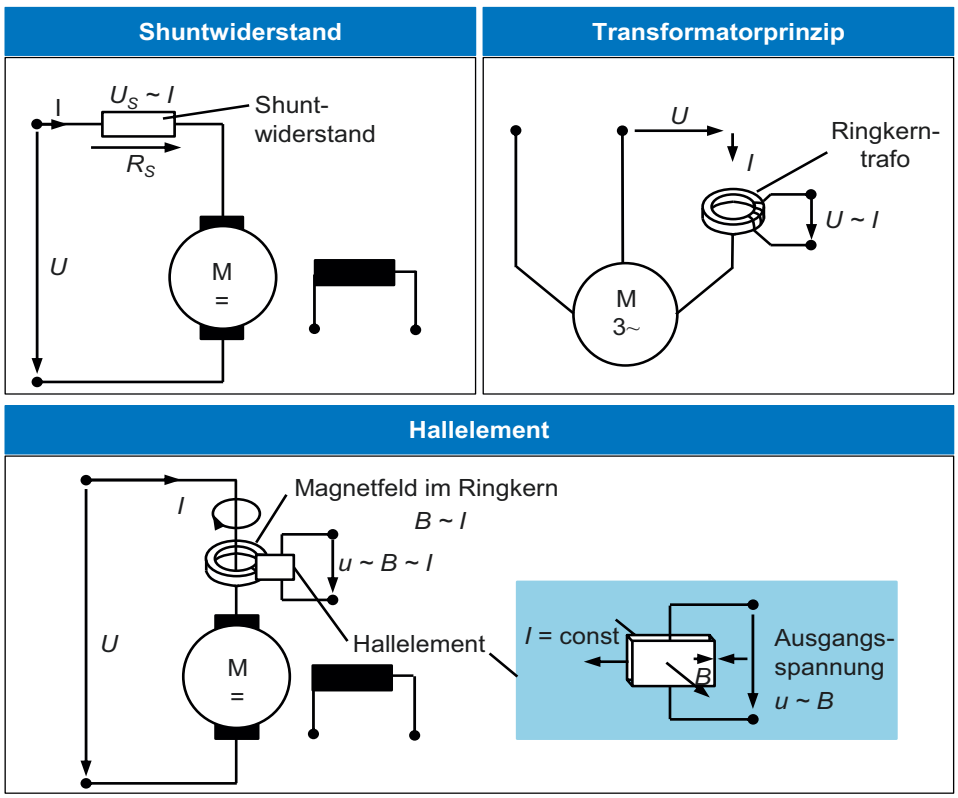


Bild 2.45 Verfahren zur Motorstrommessung

um den Leiter verlaufende, magnetische Wechselfeld gebündelt wird (Bild 2.45). Nach dem Induktionsgesetz erzeugt dieses Feld eine Spannung in der Spule, die um den Kern gewickelt ist. Diese Spannung ist proportional zum Strom durch den entsprechenden Leiter. Bei diesem Messverfahren wird keine zusätzliche Verlustleistung erzeugt. Die an der Sekundärspule abgegriffene Spannung ist potenzialfrei.

Mit Hilfe eines Hallelementes kann das Magnetfeld um einen Leiter der Motorspeiseleitung direkt gemessen werden. Ein Hallelement besteht aus einem Halbleiterchip, der in einer Richtung von einem konstanten Strom durchflossen wird. Durchsetzt ein Magnetfeld das Element, so werden die fließenden Ladungen durch die Lorentz-Kraft von ihrer Bahn abgelenkt. Dadurch baut sich senkrecht zur Strom- und Magnetfeldrichtung eine Spannung auf, die proportional der Stärke der magnetischen Induktion ist.

Zur Motorstrommessung wird das Magnetfeld der Speiseleitung wiederum in einem Ringkern gebündelt. Der Kern wird an einer Stelle aufgeschnitten und in diesen Luftspalt das Hallelement eingefügt (Bild 2.45). Da mit Hallelementen auch die Stärke statischer Magnetfelder gemessen werden kann, lassen sich mit dieser Anordnung auch Gleichströme messen. Dieses Verfahren wird heute zur Strommessung am häufigsten eingesetzt.

Die oben beschriebenen Messanordnungen zur Strom- und Leistungsmessung sind leicht an Maschinen nachzurüsten. Der Leistungs- oder Stromsensor ist deshalb der am weitesten verbreitete Sensor im Bereich der Überwachungssysteme geworden. In Zukunft werden im Bereich dieser Anwendungen anstelle der externen Sensoren immer öfter steuerungsinterne Informationen verwendet werden.

Problematisch ist jedoch bei beiden Systemen, dass dynamische Vorgänge im Fertigungsprozess nicht oder nur stark gedämpft in der Motorleistung feststellbar sind. Die zwischen den Prozessort und den Antriebsmotor geschalteten mechanischen Elemente, z. B. Getriebe, Spindel oder Schlitten ebenso wie der Motor selbst, weisen Leistungsverluste auf und wirken wegen ihrer trägen Massen bei dynamischen Signalen wie ein Tiefpass mit niedriger Grenzfrequenz. Wegen dieser Einflüsse sind geringe prozessabhängige Kraft- und Momentenschwankungen (z. B. beim Schlichten) über die Motorstrommessung nur schwer zu detektieren.

2.3 Positionsmesssysteme für NC-Maschinen

Ein wesentlicher Bestandteil des Lageregelkreises numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen ist die Messeinrichtung, mit der die Ist-Position bewegter Maschinenteile erfasst wird. Beispiele hierfür sind die Wegmessung bei Schlitten und die Bestimmung der Winkellage von Antriebsspindeln oder Drehtischen. Analoge und digitale Messsysteme mit elektronischen Auswerteeinheiten ermöglichen eine genaue und schnelle Erfassung der Maschinenpositionen sowie eine automatische Auswertung der Messergebnisse. Durch Verwendung solcher Messsysteme werden eine hohe Positioniergenauigkeit sowie eine damit verbundene hohe Fertigungsqualität erzielt.

2.3.1 Grundlagen der Weg- und Winkelmessung

Die Begriffe der Messtechnik sind in VDI/VDE 2600 und in DIN 1319 definiert [VDI73; WECK99]. Wichtige Grundbegriffe werden im Folgenden erläutert.

2.3.1.1 Grundbegriffe

Messgröße und Messwert

Die Messgröße ist die physikalische Größe, deren Wert durch die Messung ermittelt wird (z. B. Weg, Winkel). Der Messwert ist der speziell zu ermittelnde Wert der Messgröße. Er wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit angegeben (z. B. 345,125 mm, 10,32°).

Messaufnehmer

Der Messaufnehmer ist das Messgerät, das an seinem Eingang die Messgröße aufnimmt und an seinem Ausgang ein entsprechendes Messsignal ausgibt. Statt der in VDI/VDE 2600 empfohlenen Bezeichnung „Messaufnehmer“ findet man auch häufig die Bezeichnung „Messgeber“.

Messort

Als Messort wird der Ort bezeichnet, an dem sich der Messaufnehmer befindet.

Maßverkörperung

Maßverkörperungen sind die Unterbaugruppen in Messgeräten, die einzelne Werte oder eine Folge von Werten einer Messgröße verkörpern. Maßverkörperungen können z. B. durch periodische mechanische, optische oder elektrische Teilungen gebildet werden [VDI73; DIN71].

2.3.1.2 Messprinzipien und Messverfahren

Unter dem Messprinzip versteht man die charakteristische physikalische Gesetzmäßigkeit, die bei der Messung genutzt wird. Beispielsweise bewirkt eine Helligkeitsschwankung infolge eines bewegten Gitters zwischen Lichtquelle und Photodiode eine Änderung der Beleuchtungsstärke und damit eine Änderung der Ausgangsspannung der Photodioden. Dies kann bei Weg- und Winkelmesseinrichtungen genutzt werden. Das Messverfahren ist die praktische Anwendung des Messprinzips zur Messwerterfassung. Im Fol-

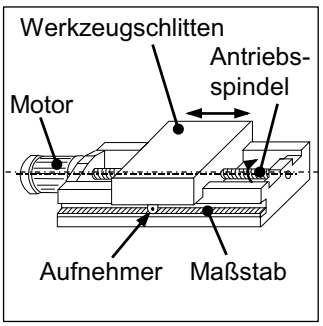
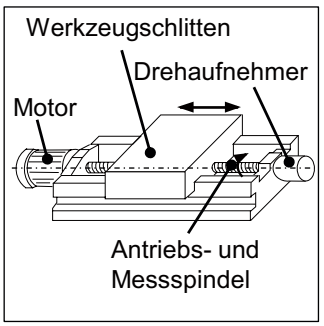
genden werden unterschiedliche Arten bzw. Merkmale der Messwerterfassung anhand einfacher Beispiele erläutert.

Direkte und indirekte Messwerterfassung

Bei der direkten Messwerterfassung gewinnt man den Messwert durch einen unmittelbaren Vergleich zwischen der Messgröße und einer entsprechenden Bezugsgröße. Bei der indirekten Messwerterfassung wird die gesuchte Messgröße in eine andersartige physikalische Größe umgewandelt. Aus dieser wird unter Verwendung physikalischer Zusammenhänge anschließend der Messwert ermittelt.

In ◘ Tab. 2.1 sind die direkte und indirekte Messwerterfassung gegenübergestellt. In der im linken Tabellenteil skizzierten Messanordnung dient der Linearmaßstab als Maßverkörperung. Die Position des Schlittens kann vom Aufnehmer direkt am Maßstab erfasst werden. Eine indirekte Messung liegt vor, wenn die lineare Bewegung des Schlittens über den Umweg der Vorschubspindeldrehung erfasst wird. Ein Winkelschrittaufnehmer an der Vorschubspindel dient zur Aufnahme des Messwerts. Durch den bekannten Zusammenhang zwischen der Drehbewegung der Gewindespindel und der linearen Schlittenbewegung ist die Wegmessung des Schlittens indirekt über die Winkelmessung möglich, ◘ Tab 2.1 rechts. Übertragungsfehler der Mechanik werden jedoch nicht erfasst. Daher lassen sie sich auch nicht über den Lageregelkreis korrigieren.

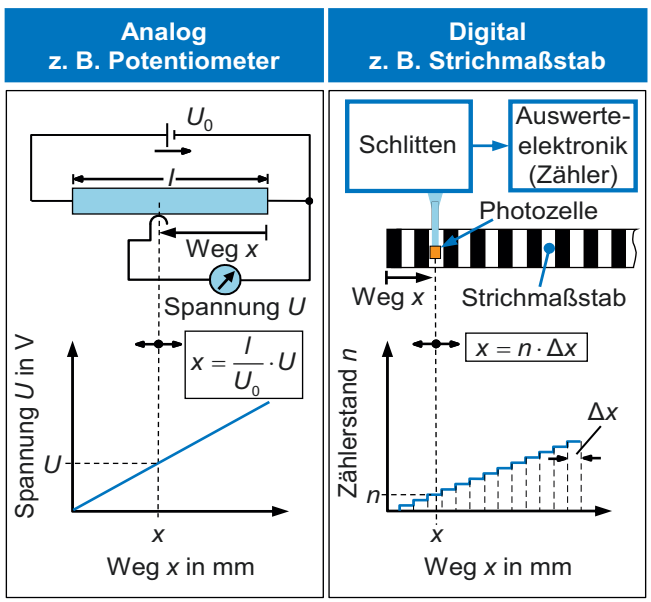
Typische Fehlereinflüsse bei den verschiedenen Messwerterfassungsverfahren sind im unteren Teil der ◘ Tab. 2.1 zusammengefasst [BRAA97; DIN88; WALC74]. Während bei der direkten Messwerterfassung eine mangelhafte Fertigungs- und Einrichtgenauigkeit der Maßstäbe sowie deren thermisches Verhalten das Messergebnis verfälschen können, beeinträchtigen bei der indirekten Messwerterfassung Steigungsfehler, Umkehrspiel, statisch und thermisch bedingte elastische Verformung und Verschleiß der Vorschubspindel zusätzlich die Messgenauigkeit.

Direkte Messwerterfassung (Antriebselement und Wandler getrennt)	Indirekte Messwerterfassung (Antriebselement und Wandler identisch)
Messsystem arbeitet translatorisch und ist unmittelbar mit der Längsbewegung des Maschinenschlittens gekoppelt	Erfassung der Längsbewegung über die Drehbewegung der Arbeitsspindel
	
Fehlereinflüsse	**Fehlereinflüsse**
• Temperatur • Teilungsfehler • Abstands- und Winkelfehler • Fehler an den Stoßstellen der Maßstäbe	• Elastische Verformung der Spindel • Steigungsfehler • Spiel • Verschleiß der Spindel • Fehler des Aufnehmers • Temperatur

◘ **Tabelle 2.1** Prinzipien und Fehlereinflüsse bei der direkten und indirekten Messwerterfassung

Analoge und digitale Messwerterfassung

Die analoge Messwerterfassung ist dadurch gekennzeichnet, dass innerhalb des Messbereichs jedem Wert der Messgröße stetig ein entsprechender Messwert zugeordnet werden kann. Ein Beispiel dafür ist das Schiebepotentiometer, bei dem eine stetige Zuordnung zwischen der Messgröße (Weg x) und der analogen Ausgangsgröße (Spannung U) besteht, ◘ Bild 2.46 links. Bei der digitalen Messwerterfassung wird die zu messende Größe in gleichgroße Inkremente aufgeteilt und der Messwert als deren Vielfaches dargestellt. Das Beispiel aus ◘ Bild 2.46 rechts zeigt die Aufteilung des zu messenden Weges x in gleiche Wegabschnitte (Strichabstand des Maßstabs). Der Messwert wird durch Zählen der einzelnen Wegabschnitte oder durch direktes Ablesen der Stellenwerte gewonnen und kann mit Hilfe einer Auswerteelektronik ausgewertet und angezeigt werden (vgl. ▶ Kap. 2.3.2).



◘ **Bild 2.46** Prinzip der analogen und digitalen Messwerterfassung

Relative und absolute Messwerterfassung

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal im Zusammenhang mit der Messwertbildung ist die Ausführungsart des verwendeten Maßstabs. Die digitale Messung lässt sich wie folgt unterscheiden:

- digital-relative (inkrementale) Messwerterfassung,
- digital-absolute (codierte) Messwerterfassung.

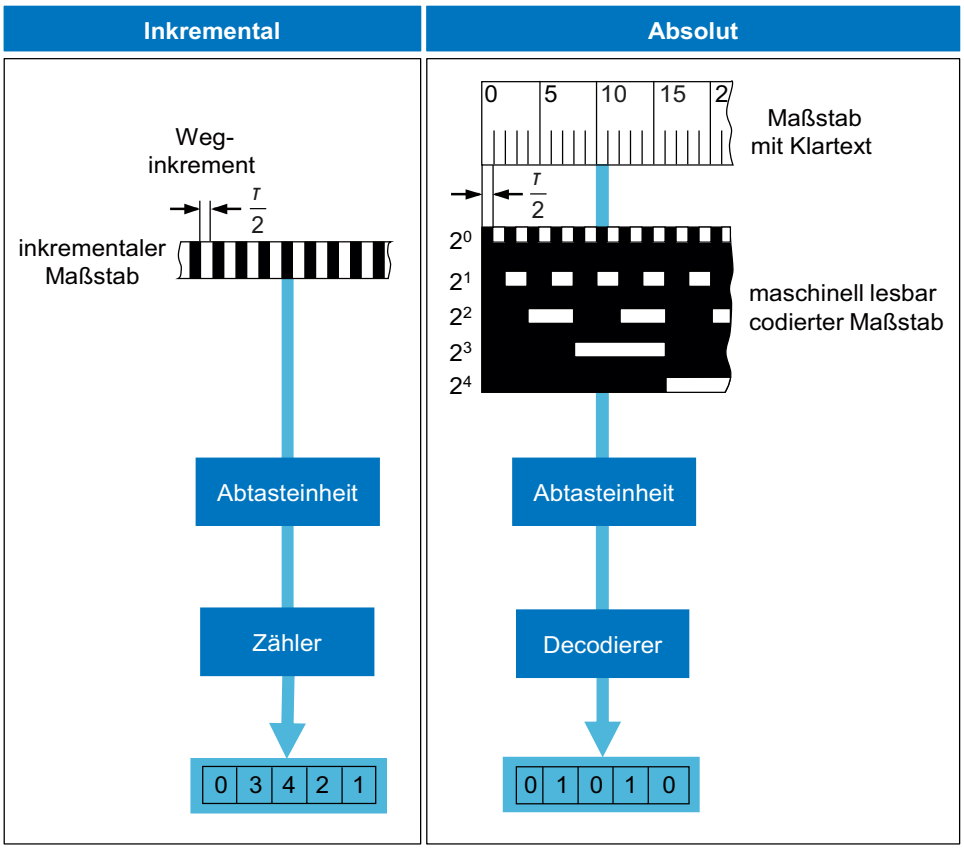
Bei der digital-inkrementalen Messwerterfassung werden die periodischen Messsignale während des Verfahrens einer Wegstrecke gezählt und dann summiert, ◘ Bild 2.47 links. Durch die Bauform des Strichmaßstabs kann bei diesem Messverfahren nicht der absolute Ort des bewegten Maschinenschlittens gemessen werden, sondern nur die relative Lage zum Ort, an dem der Zählvorgang eingeschaltet wird. Man nennt das Verfahren daher das relative oder auch inkrementale Messverfahren. Eine ständige, feste Zuordnung zwischen dem absoluten Ort des Schlittens und dem Messwert charakterisiert die digital-absolute Messwerterfassung. Im Beispiel aus ◘ Bild 2.47 rechts ist jede Position auf dem Maßstab durch die eindeutige Kombination codierter Spuren gekennzeichnet.

Die wichtigsten Vorteile der absoluten gegenüber der relativen bzw. inkrementalen Messwerterfassung sind:

- Jeder Messwert ist auf einen festgelegten Nullpunkt bezogen und direkt ablesbar. Kumulative Messfehler bzw. Kettenmessfehler treten nicht auf.
- Der richtige Messwert bleibt auch nach einer Störung (z. B. Spannungsausfall) ohne besondere Hilfsmaßnahmen erhalten.

Die absolut-digitale Messwerterfassung hat jedoch auch Nachteile. Wird eine hohe Messgenauigkeit über einen größeren Messbereich verlangt, so sind Maßstab und Abtasteinheit bei binär- oder gray-codierten Messgeräten durch die hohe Anzahl erforderlicher Codespuren deutlich aufwendiger konstruiert und erfordern einen größeren Bauraum (vgl. ▶ Kap. 2.3.2.1.2).

Analoge Systeme nach ◘ Bild 2.46 sind absolute Messsysteme. Die Messgenauigkeit rein analoger Messwerterfassung reicht wegen ihrer relativen Auflösung von 10^{-3} bis 10^{-4} bei größeren Messbereichen nicht aus. Unterteilt man jedoch die Messstrecke in viele kleine Abschnitte, so ist das analoge Verfahren als Teil der zyklisch-absoluten Messwertgewinnung sinnvoll einsetzbar. Die zyklisch-absolute Messwertgewinnung vereinigt die Vorteile der analogen (ausreichende Auflösung) und inkrementalen Messtechnik (einfache, störsichere Messwertgewinnung). Das Funktionsprinzip der zyklisch-absoluten Messung zeigt ◘ Bild 2.48. Innerhalb sich wiederholender Periodenlängen τ (Messzyklen) wird der Weg x mit Hilfe eines analogen Systems absolut gemessen. Zusätzlich zählt man die Anzahl N der im Weg x durchlaufenen Zyklen. Mit $h(x^*)$ als analoger Messgröße (z. B. Spannung U), h_0 als Maximalwert der analogen Messgröße und τ



◘ **Bild 2.47** Beispiele für inkrementale und absolute Wegmessung

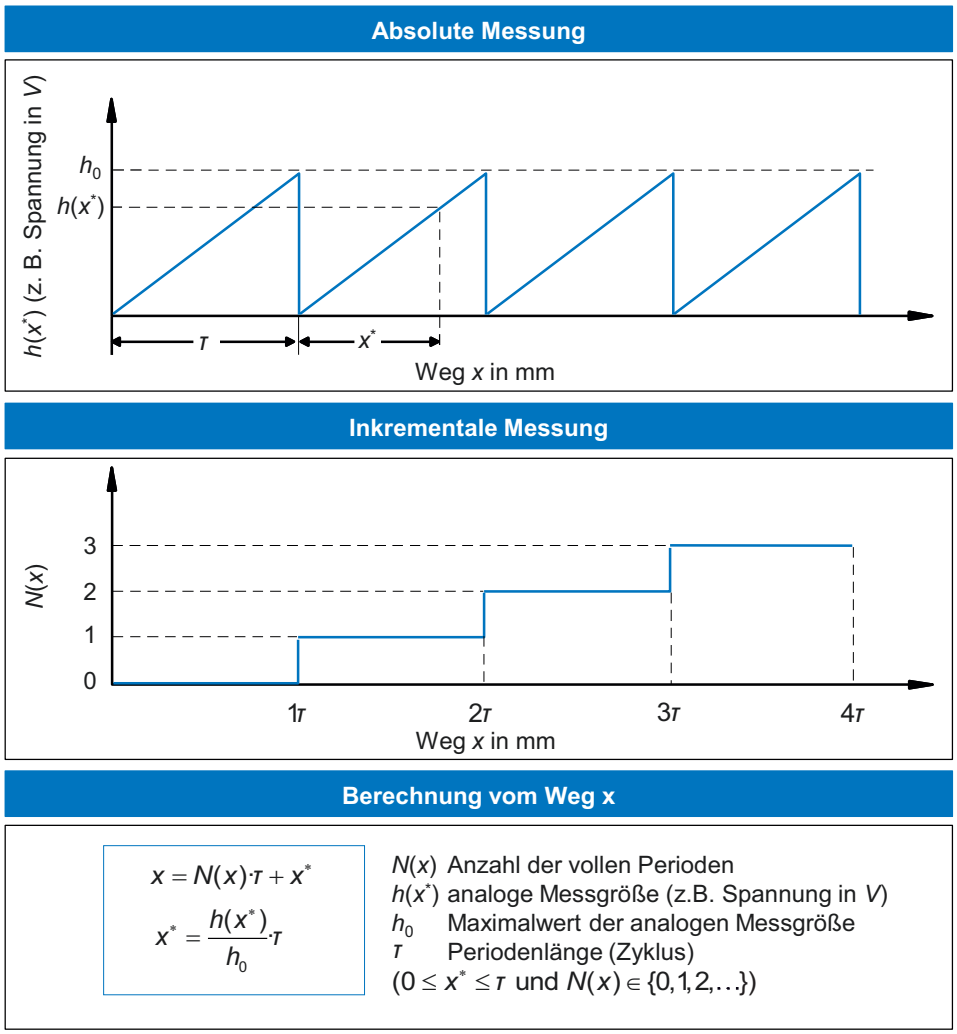


Bild 2.48 Prinzip der zyklisch-absoluten Wegmessung

als Periodenlänge des Messzyklus. Viele eingesetzte Wegmesssysteme arbeiten nach dem zyklisch-absoluten Verfahren, damit die Forderung nach einem hohen Auflösungsvermögen bei großem Verfahrweg erfüllt werden kann. Da die NC-Steuerung der Werkzeugmaschine intern nur digitale Signale verarbeiten kann, ist immer eine Digitalisierung der analogen Messsignale erforderlich.

2.3.2 Messsysteme

2.3.2.1 Photoelektrische Messverfahren

Aufgrund der geforderten hohen Auflösung haben sich heute allgemein Messsysteme mit photoelektrischer Abtastung von Linearmaßstäben bzw. Teilscheiben für rotatorische Systeme durchgesetzt.

Die Hauptbestandteile photoelektrischer Messsysteme sind der Maßstab bzw. die Teilscheibe und die Abtasteinheit. Die Abtastung geschieht entweder nach dem Auflicht- oder nach dem Durchlichtverfahren, Bild 2.49. Beim Auflichtverfahren hat der Maßstab abwechselnd reflektierende und nicht-reflektierende Zonen. Beim Durchlichtverfahren besteht der Maßstab aus transparenten und lichtundurchlässigen Zonen. Die Abtasteinheit besteht aus Lichtquelle (fast ausschließlich LED), Optik, Abtastgitter und Photoempfänger. Bei einer Relativbewegung zwischen Abtasteinheit und Maßstab empfängt der Photoempfänger Licht modulierter Helligkeit. Die Empfängerschaltung wandelt die Lichtintensität in elektrische Signale um, die für die Wegmessung ausgewertet werden können [ERNS98; MILL90].

Digital-inkrementale Messsysteme

Bild 2.50 und Bild 2.51 zeigen den Aufbau von zwei häufig eingesetzten inkrementalen Messsystemen zur Längen- und Winkelmessung. In Bild 2.50 ist ein photoelektrisches Linearmesssystem abgebildet, bei dem die Maßstababtastung nach dem Durchlichtverfahren erfolgt. Bei dem inkrementalen Drehgeber Bild 2.51 handelt es sich ebenfalls um eine Abtastung der Teilscheibe nach dem Durchlichtverfahren. Die Messung geschieht durch photoelektrische Abtastung des Präzisionsglasmaßstabs bzw. der Teilscheibe über Abtastplatte und Photoelemente. Die endliche Ausdehnung

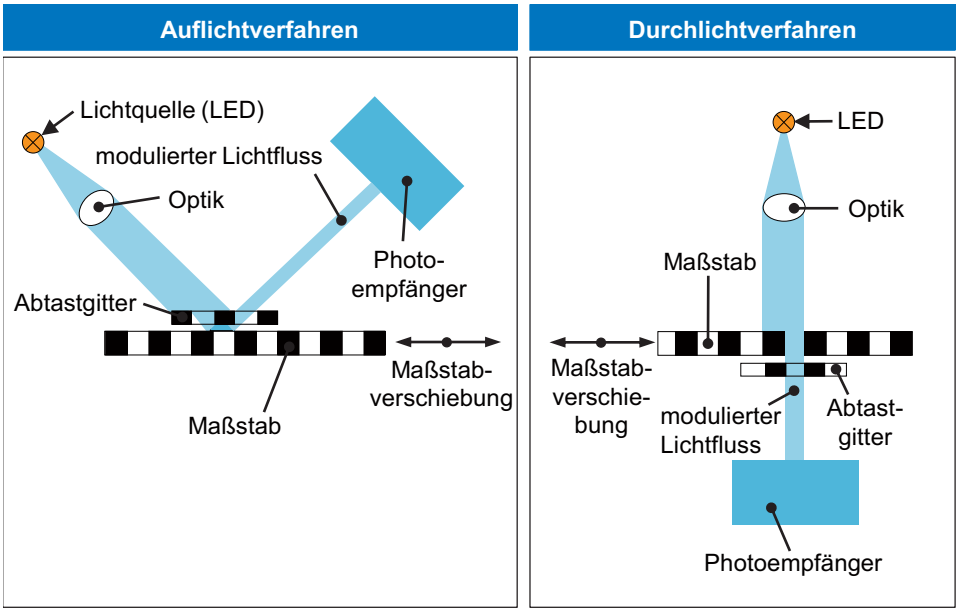


Bild 2.49 Prinzip der photoelektrischen Abtastung bei inkrementalen Verfahren

der aktiven Fläche des Photoelementes überdeckt mehrere Teilstriche der Scheibe, sodass ein Abtastgitter zwischen Lichtquelle und Empfänger angeordnet wird. Bei Bewegung des Maßstabs bzw. Drehung der Geberwelle relativ zur Abtasteinheit werden am Ausgang der Photodioden annähernd sinusförmige Signale erzeugt, die in der Auswerteeinheit in eine Rechtecksignalfolge umgeformt werden.

Zur Erzeugung von richtungsinduzierenden Signalen (vgl. ▶ Kap. 2.3.3.4) sind mindestens zwei Photoelemente erforderlich. Im Linearmesssystem in ◘ Bild 2.50 sind jedoch vier Photoelemente abgebildet (Vierfeld-Abtastung). Die Anordnung von vier um jeweils 90° verschobenen Messelementen ermöglicht eine besondere Auswertung der Messsignale, ◘ Bild 2.52. Das 0°-Signal (I_1) wird im Gegentakt zu dem 180°-Signal (I_2) geschaltet, d. h. die Signale werden voneinander subtrahiert. Ebenso wird mit den Signalen 90° (I_3) und 270° (I_4) verfahren. Dadurch erhält man Sinus- und Cosinussignale, die periodisch um die Nulllinie schwanken. Ein Wechselstrom ohne Gleichstromanteil ist vorteilhaft für die weitere Auswertung, bei der bei jedem Nulldurchgang ein Rechteckimpuls erzeugt wird. Eine Interpolation zur Erhöhung der Auflösung wird nach dem im ▶ Kap. 2.3.3 beschriebenen Verfahren durchgeführt.

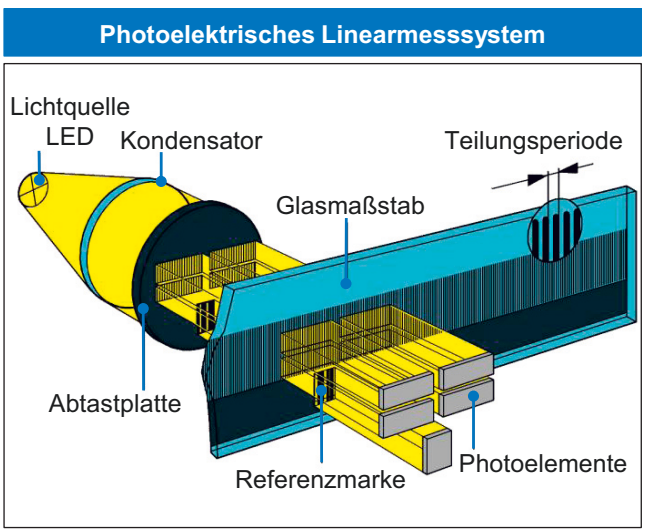


Bild 2.50 Photoelektrisches Linearmesssystem nach dem Durchlichtprinzip. Nach HEIDENHAIN

Die Vierfeld-Abtastung aus ◘ Bild 2.50 ist empfindlich gegenüber Verschmutzungen des Maßstabes, da die Lichtintensitätsschwankungen zu Offset-Fehlern der einzelnen Phasenlagen (0°, 180°, 90° und 270°) und somit zu fehlerhaften Messungen führen. Bei einer Bewegung der Abtasteinheit über eine Maßstabsverschmutzung werden die Photoelemente nacheinander von der Verschmutzung erfasst, sodass die fehlerhafte Messung an vier Positionen auftritt.

Eine Verbesserung bringt die Quasi-Einfeld-Abtastung nach dem Auflichtverfahren, ◘ Bild 2.53 [BRAA00]. Auf dem Maßstab werden reflektierende Stahlmaßbänder mit einer Teilung von z. B. 40 µm verwendet. Die Abtastplatte enthält ein transparentes Abtastgitter mit zwei unterschiedlichen Teilfeldarten. Beide Teilfeldarten besitzen ein zur Maßstabsteilung paralleles Gitter gleicher Teilung, das Amplitudengitter. Parallel zur Bewegungsrichtung besitzen sie ein Beugungsgitter mit zwei unterschiedlichen Gitterteilungen (z. B. 5 µm auf den hellen und 7 µm auf den dunklen Feldern der Abtastplatte in ◘ Bild 2.53 und ◘ Bild 2.49). Die unterschiedlichen Beugungsgitterteilungen auf den Teilabtastfeldern führen zu unterschiedlichen Beugungseigenschaften. Jedes Teilabtastfeld spaltet das Licht in zwei zueinander gegenphasige Teilstrahlenbündel, die auf den Photoelementen gemäß ◘ Bild 2.53 gesammelt werden. Demzufolge stellen die

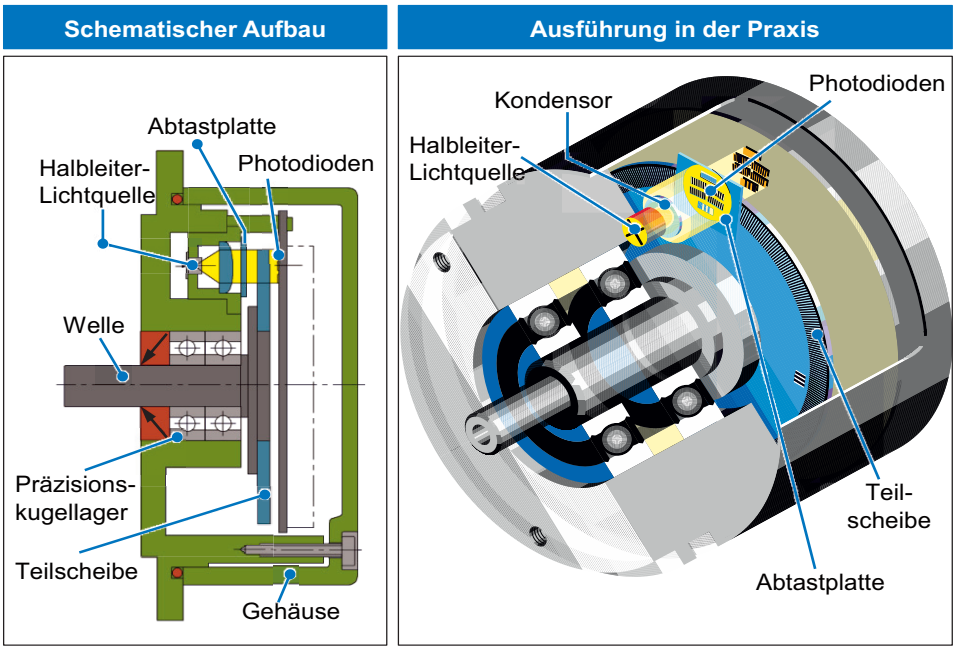


Bild 2.51 Innerer Aufbau eines Drehgebers. Nach HEIDENHAIN

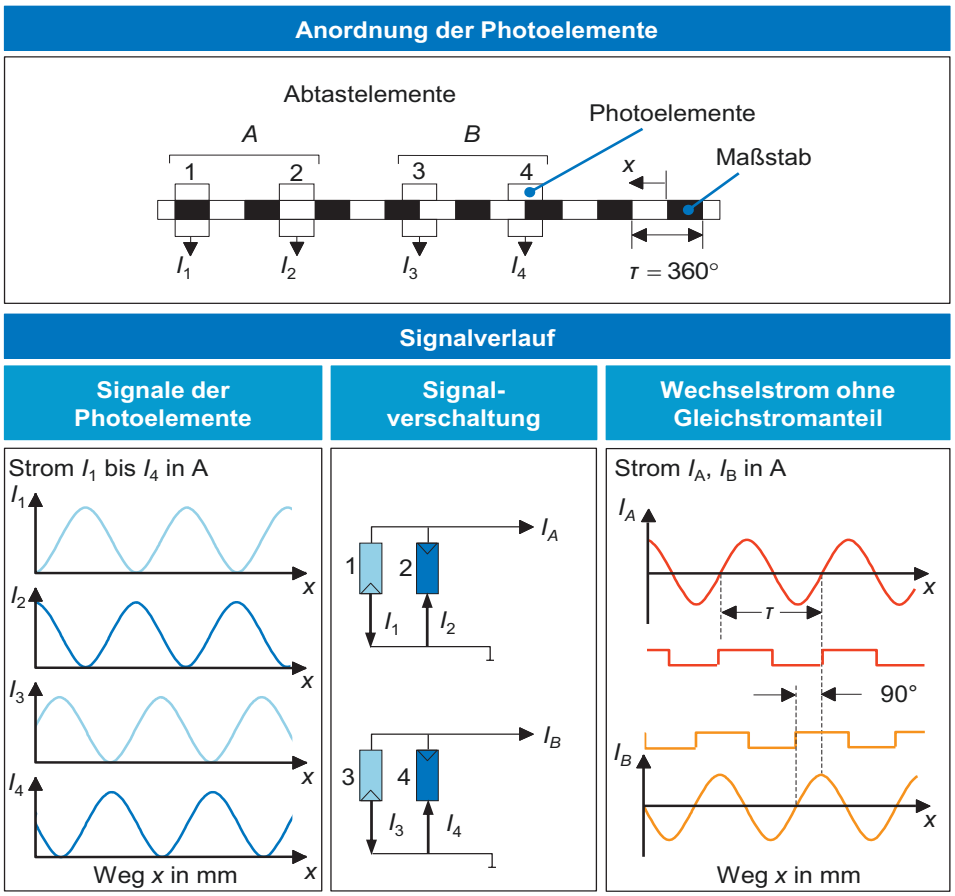


Bild 2.52 Signalverläufe bei der Abtastung eines inkrementalen Maßstabes

Photoelemente Signale mit 0°, 90°, 270° und 180° Phasenverschiebung (von oben nach unten) zur Verfügung. Eine geringfügige Verschmutzung auf dem Stahlmaßstab führt zu einer leichten Intensitätsänderung aller Photoelement-Signale, da nur ein einziges Abtastfeld verwendet wird. Auch bei einer geringen Verschmutzung stehen bei diesem Verfahren somit sinusförmige Ausgangssignale hoher Güte zur Verfügung.

Nachteil aller inkrementalen Verfahren ist, dass sie eine bekannte Startposition benötigen, ab der das Zählen der Inkremente bei Links- und Rechtsfahrt beginnt. Ist diese Refe-

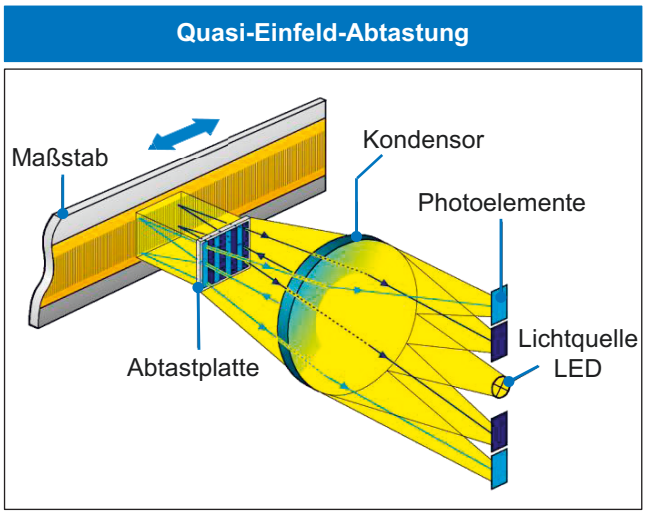


Bild 2.53 Prinzip der Quasi-Einfeld-Abtastung. Nach HEIDENHAIN

renzmarke nur einmal vorhanden, vgl. Bild 2.50, so muss nach dem Einschalten des Messsystems auf diese Startposition referenziert werden.

Auf Linearmaßstäben können daher mehrere Referenzmarken angebracht sein, die zueinander unterschiedliche Abstände haben, Bild 2.54. Nach Überfahren zweier solcher abstandscodierter Referenzmarken wird durch Auszählen der zwischen den Marken liegenden Inkremente von der Auswerteeinheit die absolute Position auf dem Maßstab bestimmt.

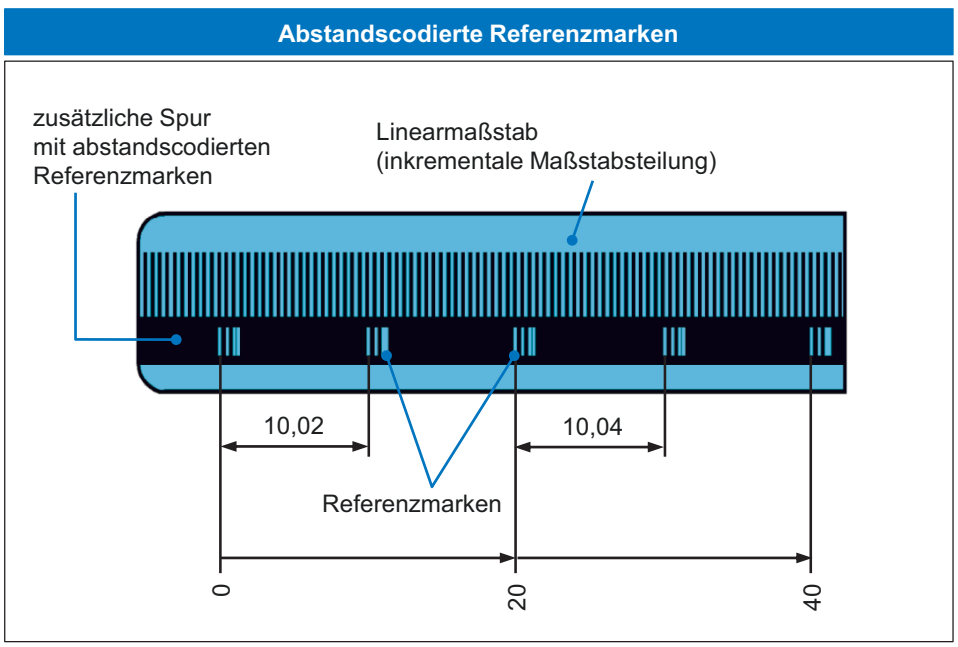
Die Teilungen auf dem Maßstab bzw. der Scheibe zeichnen sich durch höchste Herstellgenauigkeit und absolut scharfe optische Kanten aus. Sie werden durch Aufdampfen einer sehr dünnen, harten, metallischen, teilungsbildenden Schicht im Vakuum oder durch Ritzen von Glas- oder Metallmaßstäben hergestellt. Für die digitale Auflösung einer Weg- bzw. Winkeländerung ist der Abstand bzw. die Anzahl der Teilstriche auf dem Messkörper bestimmend.

Damit das in Bild 2.49 gezeigte Durchlicht- bzw. Auflichtverfahren nach den Gesetzen der Strahlenoptik funktioniert, darf die Teilung eines Maßstabes nicht wesentlich kleiner als 10 µm sein. Um ein höheres Auflösungsvermögen zu erreichen, werden die analogen Ausgangssignale der Photoelemente nach den im ▶ Kap. 2.3.3 beschriebenen Verfahren interpoliert. Da die Signale nur annähernd sinusförmig sind, d. h. sie haben einen überlagerten Anteil an Oberwellen, ist eine Interpolation um mehr als den Faktor 25 nicht sinnvoll. Eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens bis zum Faktor 100 ist möglich, indem man vier Photoelemente zur Abtastung einsetzt (Bild 2.50) und die Signale, wie im ▶ Kap. 2.3.3 beschrieben, auswertet.

Faktoren, die die Messgenauigkeit beeinflussen, sind die Maßstabshalterung und Scheibenlagerung, die Planheit und Geradheit der Maßstäbe bzw. der Scheiben, Ankopplung und Gestaltung der Abtasteinheit sowie die Temperatur. In Verbindung mit mechanischen Übertragungselementen (z. B. Zahnstange-Ritzel, Spindel-Mutter) werden inkrementale Drehgeber auch für Längenmessungen genutzt (vgl. ▶ Kap. 2.3.1.2.1).

Inkrementale Weg- und Winkelmesssysteme werden heute an Werkzeugmaschinen bevorzugt eingesetzt. Als Nachteil inkrementaler Messsysteme wird häufig die Tatsache genannt, dass der Messwert bei Stromausfall verloren geht und bei Auftreten von Störungsimpulsen verfälscht wer-

Bild 2.54 Abstandscodierte Referenzmarken. Nach HEIDENHAIN



den kann. Letzteres tritt bei dem heute vorliegenden, hohen Entwicklungsstand der elektronischen Geräte grundsätzlich nicht mehr auf.

Digital-absolute Messsysteme

Im Gegensatz zu inkrementalen Verfahren wird bei den codierten Messsystemen jedem Wegelement ein eindeutiger Zahlenwert zugeordnet. Bild 2.55 zeigt die schematische Abbildung eines binär-codierten Maßstabes mit fünf Codespuren. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Codierung eines Maßstabintervalls. Bei binär-codierten Maßstäben nimmt die Teilungsbreite einer Spur (Breite eines Feldes der Spur) mit jeder weiteren Spur um den Faktor 2 ab. Ordnet man entsprechend Bild 2.55 jedem hellen Feld den Binärwert „1“ und jedem dunklen Feld den Binärwert „0“ zu, so kann bei einer gleichzeitigen Abtastung aller Spuren an jeder Stelle des Weges x eine Dezimalzahl abgelesen werden. Im dargestellten Beispiel ergeben die gelesenen Binärwerte 10110 das Wegelement 22 (dezimal). Die Anzahl der erforderlichen Spuren N ist von der Länge des Maßstabes x_{ges} und der feinsten Teilungsbreite Δx (Spur $k = 0$) abhängig. Es gilt folgende Gesetzmäßigkeit:

$$x_{ges} = \Delta x \cdot 2^N \; (N = 1, 2, 3, \ldots) \tag{2.83}$$

damit erhält man für eine geforderte Präzision Δx die erforderliche Spurenanzahl N:

$$N = \left\lceil \lg\left(\frac{x_{ges}}{\Delta x}\right) \cdot \frac{1}{\lg 2} \right\rceil \tag{2.84}$$

Die Abtastung des Maßstabs nach dem beschriebenen Verfahren kann allerdings auch zu Fehlern führen. Die tatsächlichen Positionen der Abtastelemente können z. B. aufgrund fertigungstechnischer Präzisionsgrenzen von ihrer Sollposition abweichen. Beim Übergang von einem zum nächsten Wegelement, kann es dann vorkommen, dass einige Abtastelemente noch die alten Werte und einige die neuen Werte lesen. So kann beispielsweise an der Übergangsstelle zwischen den Wegelementen 23 und 24 durch einen leichten Versatz der Abtastelemente der Spur $k = 3$ und 4 statt des richtigen Wertes 10111 ≙ 23 oder 11000 ≙ 24 der falsche Wert 11111 ≙ 31 gelesen werden. Diese Messfehler sind besonders gravierend, wenn höherwertige Spuren falsch abgetastet werden. Solche Fehlinterpretationen sind durch folgende Maßnahmen vermeidbar:

- Abtastung jeder Spur (mit Ausnahme der feinsten) eines dualcodierten Maßstabs mit zwei Abtastköpfen im Abstand $2^k \cdot \tau/4$ (Bild 2.56). Das Prinzip besteht darin, dass jeweils beim Lesen des Wertes „0“ in der niederwertigen Spur der Wert des voreilenden Abtasters in der nächst höherwertigen Spur Gültigkeit hat. Wird der Wert „1“ gelesen, so hat der nacheilende Abtaster der höherwertigen Spur Gültigkeit. Auf diese Weise lässt sich der Messwert eindeutig ablesen. Wegen der Anordnung der Abtastköpfe nennt man diesen Vorgang „V-Abtastung“ [DIN88; MILL90]. Die hohe Anzahl der benötigten Abtastköpfe verursacht bei dieser Lösung jedoch hohe Kosten.
- Codierung des Maßstabs nach dem sogenannten Gray-Code (vgl. ▶ Kap. 9, „Grundlagen der Informationsverarbeitung“). Während des Übergangs von einem Wert zum anderen tritt bei dieser Codierung eine Änderung des Binärzustands nur in einer Spur des Maßstabs auf.

Bild 2.57 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines digital-absoluten Drehgebers zur Winkelmessung. Die Antriebswelle

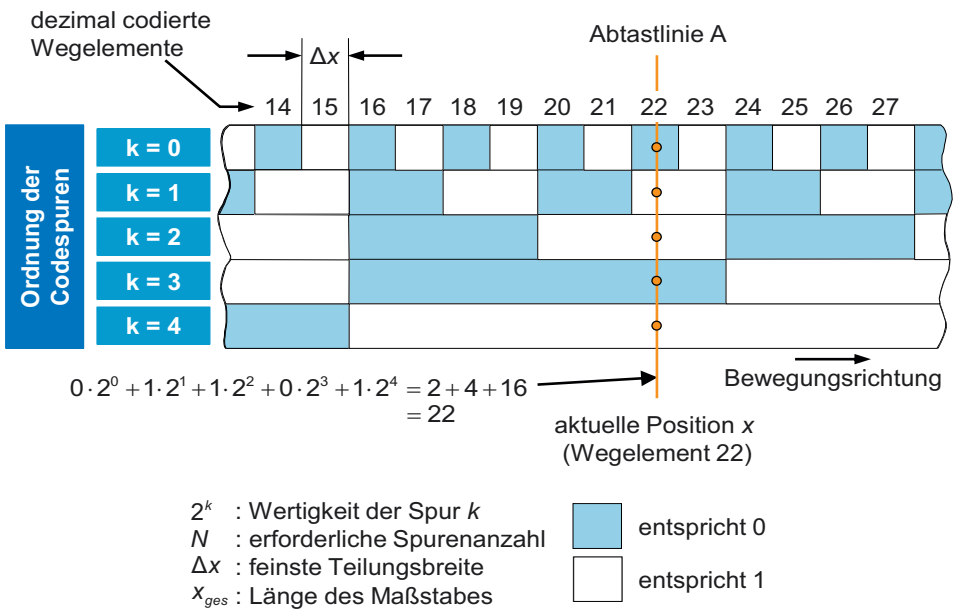


Bild 2.55 Fünfspuriger binär-codierter Maßstab

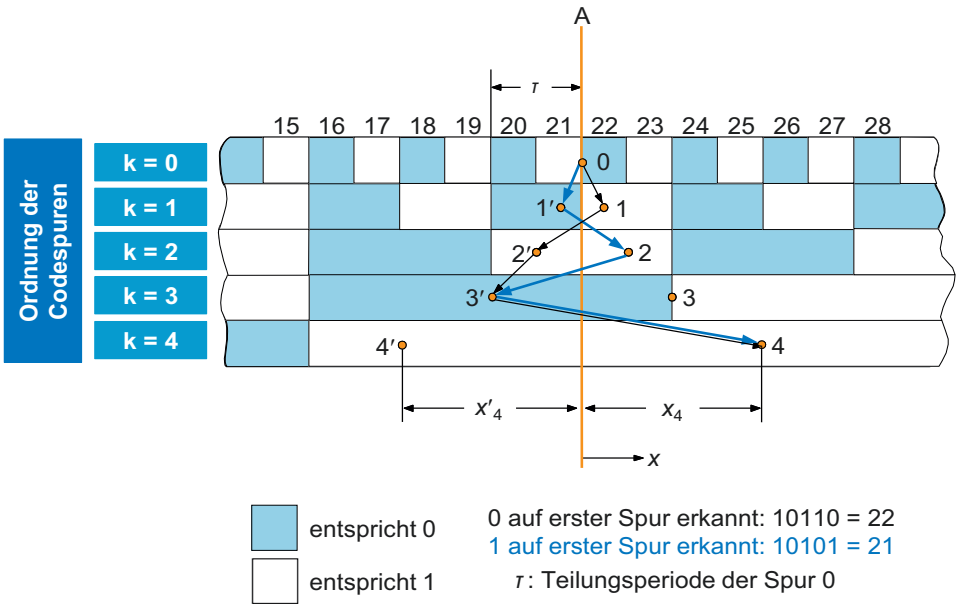


Bild 2.56 Doppelabtastung für einen binär-codierten Maßstab

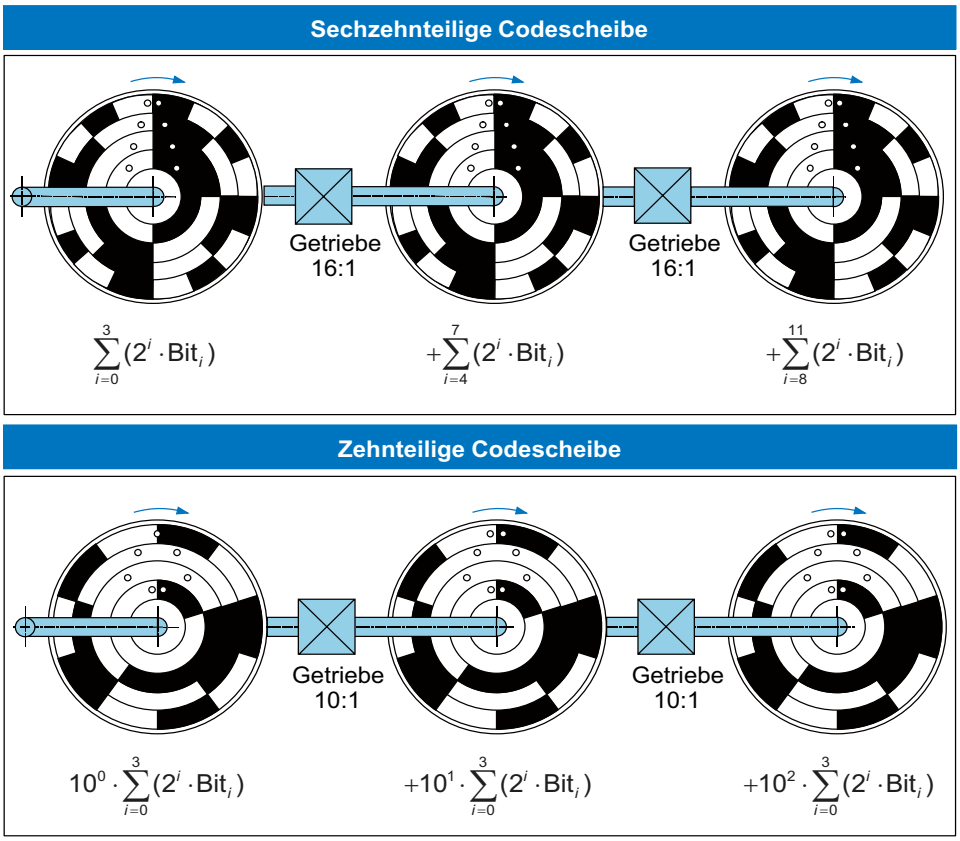


Bild 2.57 Prinzip eines binär-codierten und eines binär-dezimal-codierten Winkelcodierers mit einem Messbereich von mehr als einer Umdrehung. Nach halstrup-walcher, Kirchzarten

trägt eine kreisförmige Codescheibe aus bruchfestem Kunststoff, die einem stillstehenden Gegengitter (Abtastgitter) in geringem Abstand flächenparallel gegenübersteht. Die Codescheibe trägt als Hell-/Dunkel-Felder den Signalschlüssel, der durch eine emittierende Lichtquelle und einen Empfänger aufgenommen und zur Weiterverarbeitung bereitgestellt wird.

Zur Vergrößerung des Messbereichs können – wie Bild 2.57 zeigt – mehrere Abtastgruppen in einem Gehäuse untergebracht und über ein Präzisionsgetriebe miteinander verbunden werden. Das Flankenspiel im Getriebe zwischen den Abtastgruppen muss dabei eliminiert werden, damit die Messgenauigkeit im gesamten Messbereich gleichbleibend ist. Bild 2.58 zeigt eine gerätetechnische Ausführung.

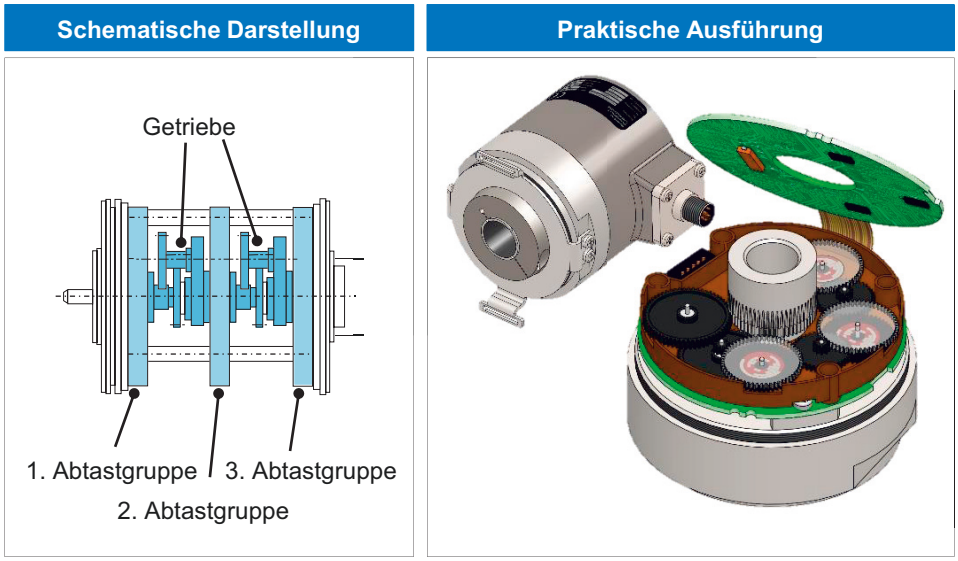


Bild 2.58 Drehgeber mit zwei Abtastgruppen und zwischengeschaltetem Getriebe zur Erhöhung der Auflösung je Umdrehung

Inkremental-absolute Messsysteme

Eine Kombination des inkrementalen und des absoluten Messverfahrens verbindet die Vorteile beider Verfahren, Bild 2.59 [MILL90]. Bei der inkremental-absoluten Abtastung ist auf einem Durchlichtmaßstab eine absolute Spur mit einem Pseudo-Random-Code (PRC) z. B. mit der Teilung 75 µm (geringe Auflösung) und eine inkrementale Spur z. B. mit einer Teilung von 20 µm (hohe Auflösung) aufgetragen. Der Pseudo-Random-Code codiert auf einer Wortlänge von 16 Bit die absoluten Positionen. Für jede der beiden Spuren ist eine separate Ausleseeinheit installiert. Die Spuren werden also unabhängig voneinander ausgelesen.

Die absolute Spur wird mit einem Zeilensensor ausgelesen, der aus einem Feld von Pixeln (Photoelemente, z. B. CCD-Sensoren) besteht und kurzzeitig durch die absolute Messspur belichtet wird. Die Hell-Dunkel-Codierung des gespeicherten Codemusters wird dadurch wie auf einem Photo, in Form von Ladungen in den Pixeln des Zeilensensors gespeichert. Gleichzeitig wird die inkrementale Spur mit einer Vierfeld-Abtastung ausgewertet, um mit hoher Auflösung die genaue Position zu bestimmen.

Ein Microcontroller bestimmt dann durch Decodierung des Codemusters aus dem Pixelbild die absolute Position. Zur Steigerung der Genauigkeit werden darüber hinaus die Lagen der einzelnen Hell-/Dunkel-Übergänge ausgewertet. Dadurch kann aus der absoluten Spur die Position ausreichend genau bestimmt werden, um die Ordnungszahl der Inkrementalperiode zu bestimmen. Im letzten Schritt werden die Inkrementalsignale interpoliert und zur absoluten Position addiert. Dadurch ist es möglich, die Position mit

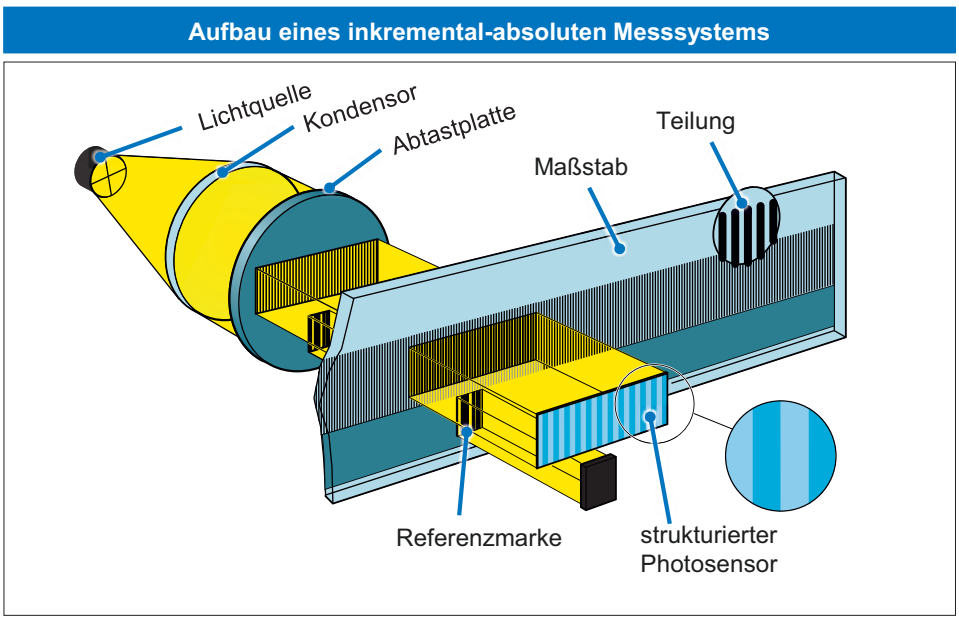


Bild 2.59 Aufbau eines inkremental-absoluten Messsystems. Nach HEIDENHAIN

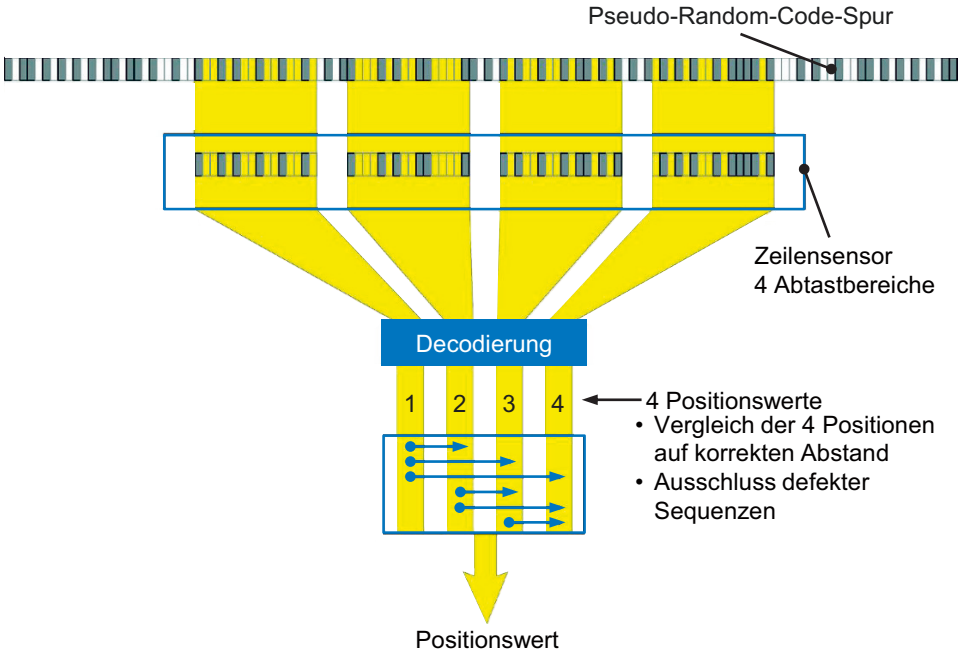


Bild 2.60 Erhöhung der Fehlersicherheit durch die Messung von vier absoluten Positionen. Nach HEIDENHAIN

einer maximalen Auflösung von 0,1 µm zu berechnen. Um Auslesefehler durch Verschmutzungen auf der absoluten Spur zu vermeiden, wird das Verfahren aus Bild 2.60 angewandt. Dazu wird der PRC-Code gleichzeitig an vier Position gleichen Abstands ausgelesen. Da die vier Werte exakt den gleichen Abstand haben müssen, kann man fehlerhafte Werte leicht erkennen und von der Auswertung ausschließen.

Interferenzielle Wegmesssysteme

Für die Anwendung in Ultrapräzisionsmaschinen oder in hochgenauen Anlagen für die Mikrochipherstellung gibt es Längenmesssysteme, die Auflösungen bis zu wenigen Nanometern besitzen. Diese Systeme nutzen die Überlagerung von Lichtwellenzügen, die an optischen Gittern gebeugt werden [ERNS98; HEID00].

Trifft eine ebene Lichtwellenfront auf ein optisches Phasengitter, so wird das Licht in verschiedene Richtungen gebeugt. In Bild 2.61 ist eine solche Beugungserscheinung dargestellt. Gezeigt werden hier und im Folgenden nur die Beugungsordnungen –1, 0, +1, da meist nur diese für die technische Realisierung der Längenmesssysteme genutzt werden. Die Intensitätsverteilung sowie die Phasenlage der Wellenfront hinter dem Phasengitter sind abhängig von der Gitterbreite b, der Dicke der Stege d, dem Brechungsindex n des Materials der Gitterstäbe sowie der Gitterteilung τ. Eine exakte Intensitätsverteilung kann mit Hilfe der Fourier-Transformation berechnet werden [SESS91].

Unter Vernachlässigung von Verlusten und Reflexionen verschwindet die Intensität der Beugung 0. Ordnung, wenn Gitterstege und -öffnungen gleich breit sind und die durch die lichtdurchlässigen Stege durchtretenden Wellen gegenüber den durch die Öffnung durchtretenden Wellen einen Gangunterschied von $\lambda/2$ haben. Wird das Gitter um einen Weg x verschoben, so verändert sich dadurch die Phasenlage der gebeugten Wellen mit den Ordnungen –1 und +1 um den Winkel $-\Omega$ bzw. $+\Omega$. Die Wellen der Ordnung 0 werden nicht phasenverschoben, Bild 2.61.

Eine Hintereinanderreihung von drei Phasengittern im konstanten Abstand z zeigt Bild 2.62. Alle drei Gitter haben die Teilung τ. Gitter $G1$ und Gitter $G3$ sind exakt identisch aufgebaut. Sie sind so gewählt, dass die 0. Beugungsordnung gegenüber den Ordnungen –1 und +1 eine konstante Phasenverschiebung Φ hat. Das Gitter $G2$ ist gegenüber $G1$ und $G3$ verschiebbar. Im Bild 2.62 sind in vereinfachter Darstellung nur die Ausbreitungsrichtungen der Wellen als Strahlen dargestellt. Trifft ein Bündel paralleler Lichtwellen auf das Gitter $G1$, so wird es gebeugt in die Ordnungen –1, 0 und +1. Die Wellen der 0. Ordnung sind gegenüber der 1. Ordnung um den konstanten Winkel Φ verschoben.

An dem Gitter $G2$ werden die dort auftreffenden Lichtbündel wiederum in die Ordnungen –1 und +1 gebeugt. Das Gitter $G2$ erzeugt keine Beugung 0. Ordnung. Bei Verlagerung des Maßstabes werden die Wellen der einzelnen Lichtbündel zusätzlich um den Winkel $+\Omega$ bzw. $-\Omega$ phasenverschoben, Bild 2.61.

Am Gitter $G3$, das identische Eigenschaften zu Gitter $G1$ hat, wird das Licht erneut gebeugt. Hinter diesem Gitter überlagern sich nun einzelne Lichtbündel, die zueinander unterschiedliche Phasenlagen haben. Diese Phasenlagen sind abhängig von der Verlagerung des Gitters $G2$ in Richtung der X-Achse. Es kommt hinter Gitter $G3$ zu Interferenzen, die als Intensitätsschwankungen in Abhängigkeit vom Verfahrweg x gemessen werden können. Die an

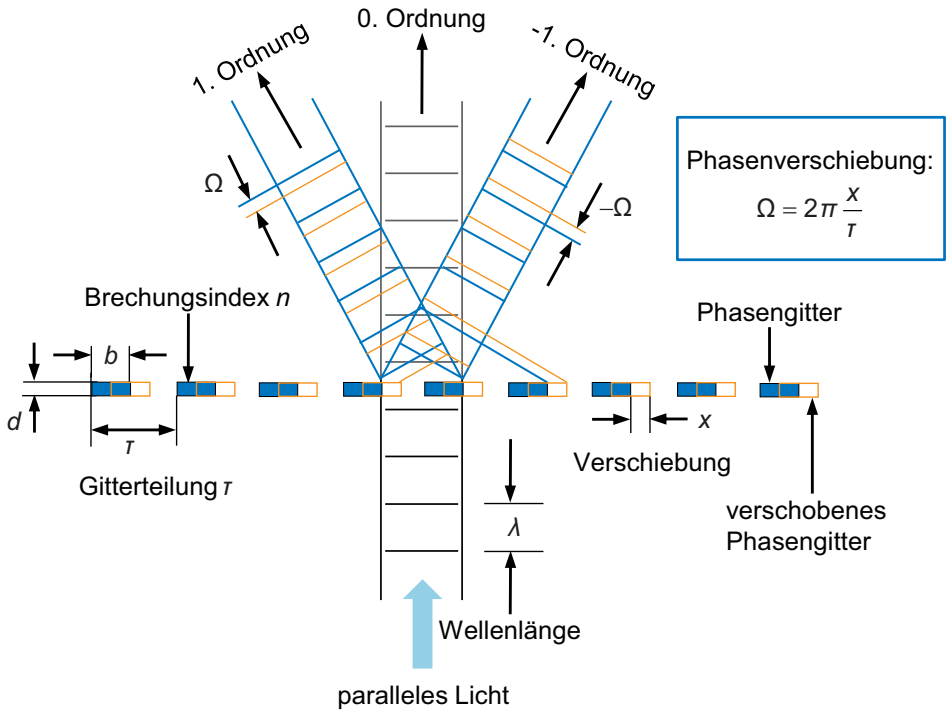


Bild 2.61 Beugung am optischen Gitter (Ordnungen –1, 0 und +1)

den Photoelementen P_{-1} bis P_{+1} gemessenen Ströme I_{-1} bis I_{+1} können hier anstelle der Lichtintensitäten $\hat{I}_{-1}$ bis $\hat{I}_{+1}$verwendet werden, da die beiden Größen proportional zueinander sind. Im Diagramm auf der rechten Seite von Bild 2.62 ist der Zusammenhang zwischen dem Verfahrweg x, den gemessenen Strömen I_{-1} bis I_{+1} und deren Phasenlagen dargestellt.

Licht kann als elektromagnetische Welle sowohl durch ihre elektrische Feldstärke E als auch durch ihre magnetische Feldstärke B beschrieben werden. Die Lichtwellen werden hier in den folgenden Berechnungen vereinfacht (ideale ebene Welle) durch ihre elektrische Feldstärke E als Cosinusfunktion mit Phasenverschiebung φ, der Frequenz f und Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ beschrieben.

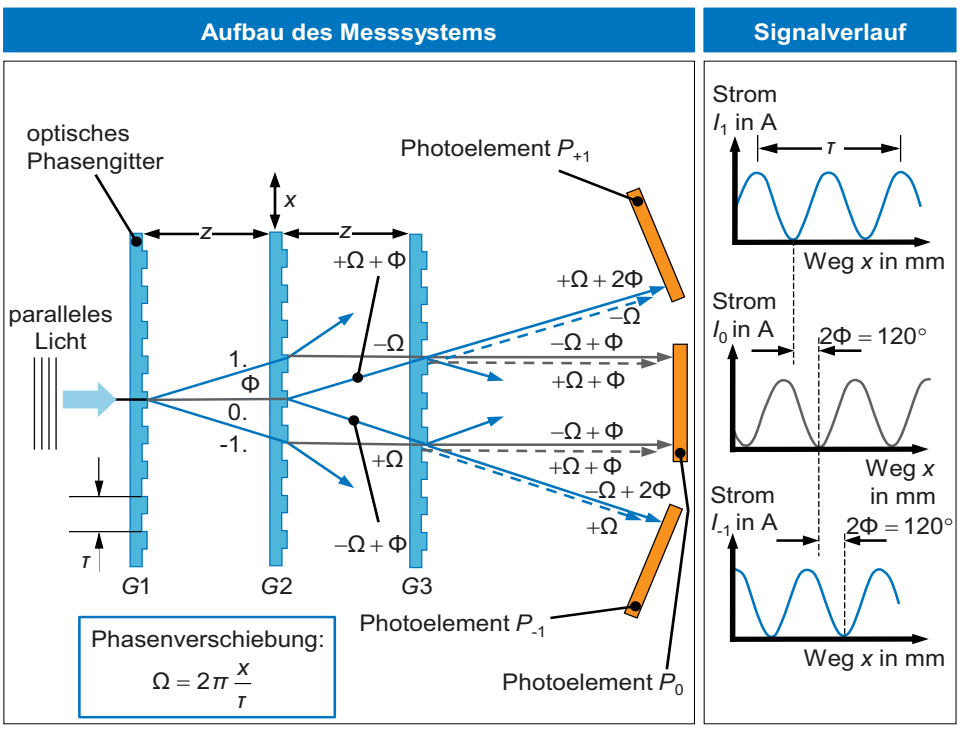


Bild 2.62 Wirkungsweise interferenzieller Wegmesssysteme. Nach HEIDENHAIN

$$E = A\cos(\omega t + \varphi) \tag{2.85}$$

Um die Berechnungen mit den Winkelfunktionen zu erleichtern, wird die Schwingung in der komplexen Schreibweise dargestellt, deren Realteil der betrachteten Schwingung entspricht. Im Folgenden werden komplexe Zahlen Z immer mit einem Unterstrich gekennzeichnet.

$$\begin{aligned} \underline{E} &= A(\cos(\omega t + \varphi) + i\sin(\omega t + \varphi)) \\ &= A e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (\textit{Eulersche Formel}) \\ &= A e^{i\varphi} e^{i\omega t} \end{aligned} \tag{2.86}$$

mit $\underline{E} \in \mathbb{C}$, $E = \mathrm{Re}(\underline{E})$

Der Anteil $U = Ae^{i\varphi}$ wird als komplexe Amplitude (Phasor) von E bezeichnet.

Die Amplituden der in Bild 2.62 eingezeichneten Lichtwellen der einzelnen nicht interferierenden Lichtbündel sind gleich und werden für alle folgenden Berechnungen auf 1 normiert. Die drei komplexen Amplituden U_{-1} bis U_{+1} der resultierenden Lichtwellen werden jeweils aus den beiden sich überlagernden Lichtwellen berechnet, indem man deren komplexe Amplituden addiert [MENZ73].

Photoelement P_{+1}:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{+1} &= 1 \cdot e^{-i\Omega} + 1 \cdot e^{i(2\Phi+\Omega)} = e^{i\Phi} \cdot \left(e^{-i(\Omega+\Phi)} + e^{i(\Omega+\Phi)}\right) \\ &= e^{i\Phi} \cdot 2\cos(\Omega + \Phi) \end{aligned} \tag{2.87}$$

Photoelement P_0:

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 &= 1 \cdot e^{i(\Phi+\Omega)} + 1 \cdot e^{i(\Phi+\Omega)} = e^{i\Phi} \cdot \left(e^{-i\Omega} + e^{i\Omega}\right) \\ &= e^{i\Phi} \cdot 2\cos\Omega \end{aligned} \tag{2.88}$$

Photoelement P_{-1}:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{-1} &= 1 \cdot e^{i\Omega} + 1 \cdot e^{i(2\Phi-\Omega)} = e^{i\Phi} \cdot \left(e^{-i(\Omega-\Phi)} + e^{i(\Omega-\Phi)}\right) \\ &= e^{i\Phi} \cdot 2\cos(\Omega - \Phi) \end{aligned} \tag{2.89}$$

$|U_{-1}|$ bis $|U_{+1}|$ entsprechen den reellen Lichtwellenamplituden und $|U_{-1}|^2$ bis $|U_{+1}|^2$ den Lichtintensitäten der Lichtwellen. Zur Berechnung wird die allgemeingültige Formel

$$|\underline{Z}|^2 = \underline{Z} \cdot \underline{Z}^* \tag{2.90}$$

verwendet. Z^* bezeichnet dabei die konjugiert komplexe Zahl zu Z.

Setzt man weiterhin für den Winkel

$$\Omega = 2\pi x / \tau \tag{2.91}$$

so errechnen sich die Lichtintensitäten $\hat{I}_{-1}$ bis $\hat{I}_{+1}$ an den einzelnen Photoelementen in Abhängigkeit vom Verfahrweg x zu:

Photoelement P_{+1}:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{+1} &= U_{+1} \cdot U_{+1}^* = 4\cos^2(\Omega + \Phi) = 2[1 + \cos 2(\Omega + \Phi)] \\ &= 2\left\{1 + \cos[2\pi\left(\frac{2x}{\tau}\right) + 2\Phi]\right\} \end{aligned} \tag{2.92}$$

Photoelement P_0:

$$\begin{aligned} \hat{I}_0 &= U_0 \cdot U_0^* = 4\cos^2\Omega = 2[1 + \cos 2\Omega] \\ &= 2\left\{1 + \cos[2\pi\left(\frac{2x}{\tau}\right)]\right\} \end{aligned} \tag{2.93}$$

Photoelement P_{-1}:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{-1} &= U_{-1} \cdot U_{-1}^* = 4\cos^2(\Omega - \Phi) = 2[1 + \cos 2(\Omega - \Phi)] \\ &= 2\left\{1 + \cos[2\pi\left(\frac{2x}{\tau}\right) - 2\Phi]\right\} \end{aligned} \tag{2.94}$$

Die Intensitäten und damit die Ausgangsströme der Photoelemente ändern sich demnach in Abhängigkeit von der Verlagerung des Gitters $G2$ nach einer Cosinusfunktion. Wird das Gitter $G2$ um den Weg einer Gitterteilung τ verschoben, so durchläuft das Ausgangssignal zwei volle Perioden (Bild 2.62). Die Periodenlänge des Ausgangssignals der Photoelemente ist also um den Faktor 2 kürzer als die Gitterteilung τ. Die Lichtwellenlänge hat hier keinen Einfluss. Damit entfallen auch spezifische Messfehler aufgrund der Änderungen des Brechungsindexes der Luft, wie sie bei Laserinterferometern auftreten (vgl. Band 2, ▶ Kap. 9.7.6.1 „Laser-Interferometer“). Die Ausgangssignale der drei Photoelemente sind jeweils um den Winkel 2Φ gegeneinander versetzt. Durch eine geeignete Auslegung der Gitter $G1$ und $G3$ wird der Winkelversatz von $2\Phi = 120°$ eingestellt. Eine nachgeschaltete Elektronik erzeugt hieraus wieder zwei Rechteckpulsfolgen, die zur Richtungserkennung um ±90° zueinander phasenversetzt sind.

Die Lichtintensitätsschwankungen werden durch Interferenzen von optischen Wellen erzeugt. Damit sind der Verlauf der Intensität über den Verfahrweg x und damit auch das Ausgangssignal der Photoelemente praktisch ideal sinusförmig. Die elektrischen Signale lassen sich deshalb nach den im ▶ Kap. 2.3.3 angegebenen Verfahren feininterpolieren. Eine Interpolation der analogen Signale der Photoelemente um den Faktor 100 ist möglich. Zusammen mit der Vierfach-Auswertung der digitalisierten Signale ist somit ein Auflösungsvermögen erreichbar, das um den Faktor 400 feiner als die Signalperiode bzw. um den Faktor 800 feiner als die Gitterteilung τ ist.

So sind Messschritte mit einer Teilung von unter 10 nm zu verwirklichen. Mit technisch abgewandelten Systemen werden sogar Auflösungsvermögen von 1 nm erreicht [SPIE90].

Funktion und Messgenauigkeit werden nicht beeinträchtigt, wenn sich der Abstand z zwischen den Gittern innerhalb eines Toleranzbereichs verändert. Diese Eigenschaft ist besonders in der praktischen Anwendung der Messsysteme nützlich, da hier immer Fertigungs- und Montagetoleranzen einkalkuliert werden müssen. Erst bei relativ großen Abweichungen, wenn der Toleranzbereich überschritten wird, kommt es wegen der damit verbundenen geometrischen Verschiebung der Strahlenbündel zu keiner Überlagerung hinter Gitter $G3$ mehr oder die interferierenden Lichtbündel werden nicht mehr auf den Photoelementen abgebildet.

In der technischen Realisierung interferenzieller Längenmesssysteme wird die in ◘ Bild 2.62 gezeigte Anordnung aus drei Gittern durch das mittlere Gitter $G2$ um die Ebene gefaltet. Damit fallen physikalisch die identischen Gitter $G1$ und $G3$ zusammen. Für das Gitter $G2$ wird ein Gitter mit reflektierenden Gräben und Stegen verwendet. Eine solche Anordnung zeigt ◘ Bild 2.63.

Da das Prinzip auch mit nicht ideal monochromatischem Licht funktioniert, wird als Lichtquelle eine Leuchtdiode verwendet. Mit Hilfe einer Kondensorlinse wird ein paralleles Lichtbündel erzeugt. Dieses passiert das Durchlicht-Phasengitter, wird an dem Maßstabgitter reflektiert und passiert erneut das Abtastgitter. An den einzelnen Gittern treten die entsprechenden Beugungen auf. Die interferierenden Lichtbündel werden durch die Kondensorlinse auf die Photoelemente abgebildet.

Der Maßstab ist aus Stahl gefertigt. Die Genauigkeit des Messsystems ist damit nur von der Temperaturdehnung des Stahls abhängig, die rechnerisch einfach zu kompensieren ist. Das reflektierende Maßstabgitter wird durch hochpräzise aufgebrachte Goldschichten gebildet. Das Gitter der Abtastplatte wird in Glas geätzt. Der Luftspalt zwischen Phasengitter und Maßstab beträgt ca. 1 mm, bei einer Toleranz von etwa ±0,5 mm.

Mit ihren spezifischen Eigenschaften – einfacher Aufbau, hohes Auflösungsvermögen, hohe Genauigkeit, leicht kompensierbare Messfehler und große Maßtoleranzen bei der Montage – sind interferenzielle Längenmesssysteme günstige Alternativen zu Laserinterferometern.

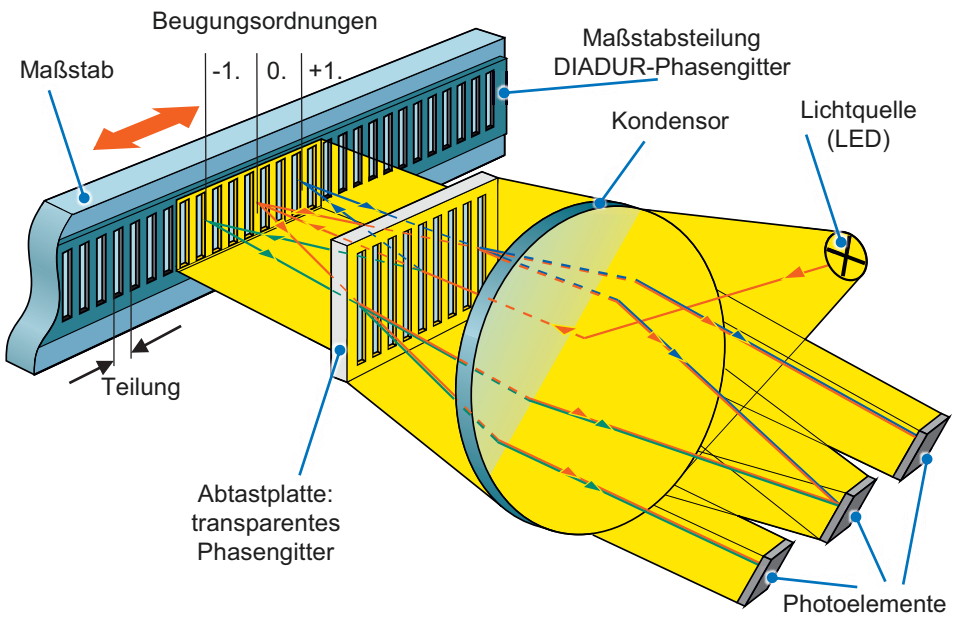
2.3.2.2 Interferometer

Für sehr hohe Präzision bei der Wegmessung werden Interferometer eingesetzt. ◘ Bild 2.64 zeigt die Funktionsweise eines Michelson-Interferometers. Ein monochromatischer Lichtstrahl trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel S_1 und spaltet sich auf. Ein Teil des Lichtstrahls trifft auf den Spiegel S_3, dessen Abstand gemessen werden soll. Der restliche Teil trifft auf den Referenzspiegel S_2, der an der gleichen Position bleibt. Durch die Reflektionen treffen beide Lichtstrahlen auf den Photodetektor. Durch Interferenz löschen sich je nach Abstand entweder die Lichtstrahlen aus oder verstärken sich.

In der Praxis werden zumeist homo- sowie heterodyne Laser-Interferometer eingesetzt, da sie zusätzlich die Bewegungsrichtung bestimmen. Beide Systeme verwenden polarisiertes Licht, homodyne Laser-Interferometer arbeiten mit einer Frequenz, heterodyne Laser-Interferometer hingegen mit zwei nahe beieinanderliegenden Frequenzen (vgl. Band 2, ▶ Kap. 9.7.6.1 „Laser-Interferometer“).

2.3.2.3 Elektromagnetische Aufnehmer

Elektromagnetische Messeinrichtungen basieren auf dem Induktionsprinzip, ◘ Bild 2.65. Ein vom Wechselstrom $i_E(t)$



◘ **Bild 2.63** Aufbau eines interferenziellen Messsystems. Nach HEIDENHAIN

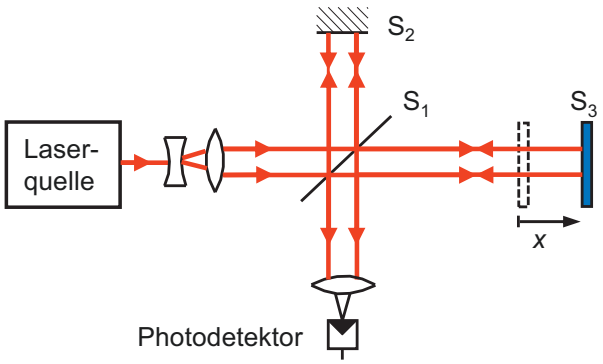


Bild 2.64 Prinzip des Michelson-Interferometers

durchflossener Leiter *a* erzeugt ein Wechselfeld, gekennzeichnet durch den magnetischen Fluss Φ. Die magnetischen Feldlinien induzieren in einem zweiten Leiter *b* eine Spannung $u_A(t)$, deren Wert unter anderem von der Entfernung und der gegenseitigen Lage der Leiter zueinander abhängig ist. Bewegt sich der Leiter *b* um Δx, so ändert sich der Effektivwert der induzierten Spannung um einen Betrag Δu_A, der so ein Maß für die Wegänderung ist.

Häufig werden von einem mit Wechselstrom durchflossenen Leiter in versetzten Leiterschleifen zwei Wechselspannungen induziert, die gegeneinander um 90° phasenverschoben sind. Mit der Bewegung ändern sich aufgrund der Lage der Induktionswicklungen die Amplituden der Spannungen relativ zueinander, sodass durch deren Auswertung Weginformationen gewonnen werden können. Inductosyn und Resolver sind die bekanntesten nach dem Induktionsprinzip arbeitenden Messsysteme.

Inductosyn

Es existieren zwei Ausführungsformen des Inductosyns. Für die Längenmessung setzt man das Linear-Inductosyn ein, während für Winkelmessungen das Rund-Inductosyn verwendet wird. Beide Systeme sind zyklisch-absolute Messsysteme, die nach dem gleichen physikalischen Prinzip arbeiten, sie unterscheiden sich nur in ihrem mechanischen Aufbau.

Die Komponenten des Linear-Inductosyns, Lineal und Reiter, enthalten mäanderförmige Leiterwicklungen, die in Form einer gedruckten Schaltung auf den Grundkörper aufgebracht sind, Bild 2.66. Der Grundkörper darf nicht aus ferromagnetischem Material bestehen, damit das induzierte Magnetfeld keinen Veränderungen unterliegt. In der Regel wird Glas oder Keramik als Grundmaterial ausgewählt. Es wird aber auch Stahl mit Kunststoffisolation verwendet. Die Wicklungen auf dem Lineal und dem Reiter haben die gleiche Teilungsperiode. Auf dem Reiter befinden sich zwei um $(N+1/4)\cdot\tau$, $N=0, 1, 2, \ldots$, d. h. räumlich um 90° zueinander verschobene Wicklungsgruppen. Diese Anordnung ermöglicht durch eine Phasen- und Amplitudenmessung eine Bewegungsrichtungserkennung und eine genaue Lageauswertung (vgl. ▶ Kap. 2.3.3.3). Die Linealwicklung wird mit einem hochfrequenten Wechselstrom $i_E(t)$ gespeist, der im Frequenzbereich von 1 kHz bis 10 kHz *liegt*:

$$i_E(t) = \hat{i}_E \sin \omega t \tag{2.95}$$

Dieser verursacht ein magnetisches Wechselfeld, das in den beweglichen Reiterwicklungen die Wechselspannungen $u_{A1}(t)$ und $u_{A2}(t)$ induziert. Bild 2.67 zeigt die räumliche Anordnung des Lineals und des Reiters sowie die Verläufe der induzierten Wechselspannungen im Reiter. Die aktuelle Amplitude bzw. Phasenlage von $u_{A1}(t)$ und $u_{A2}(t)$ ist von der jeweiligen Lage des Reiters zum Lineal abhängig.

Durch den räumlichen Versatz der beiden Reiterwicklungen um $(n+1/4)\cdot\tau = \pi/2$ (elektrisch) sind die Amplituden A_1 und A_2 der induzierten Wechselspannungen $u_{A1}(t)$, $u_{A2}(t)$ dem Cosinus bzw. Sinus des elektrischen Drehwinkels α (vgl. Bild 2.66) proportional:

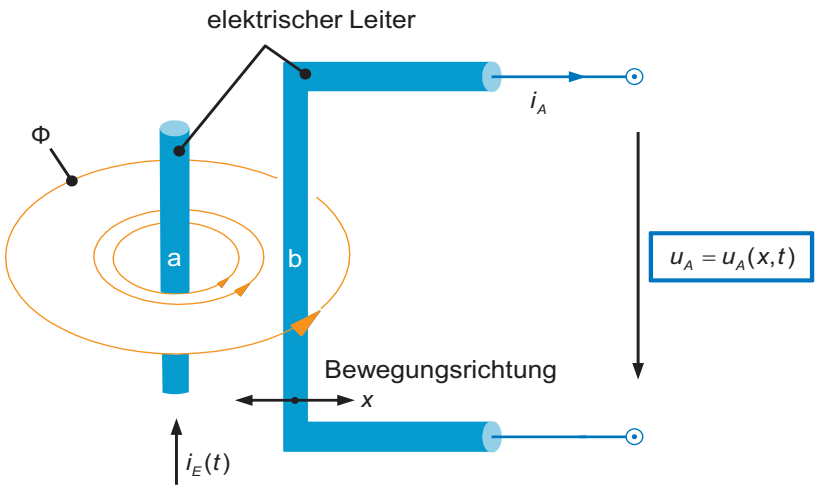


Bild 2.65 Das Induktionsprinzip

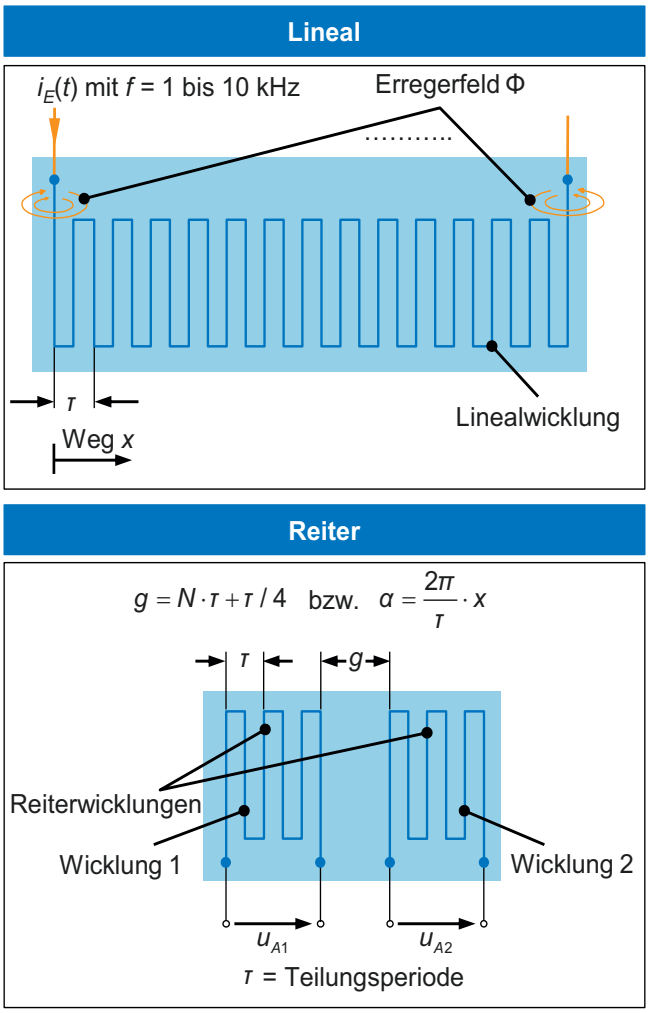


Bild 2.66 Wicklungsanordnung des Linear-Inductosyns

$$A_1 = K \cdot \hat{i}_E \cdot \cos\alpha \tag{2.96}$$

$$A_2 = K \cdot \hat{i}_E \cdot \sin\alpha \tag{2.97}$$

$$u_{A1}(t) = K \cdot \hat{i}_E \cdot \sin\omega t \cdot \cos\alpha \tag{2.98}$$

$$u_{A2}(t) = K \cdot \hat{i}_E \cdot \sin\omega t \cdot \sin\alpha \tag{2.99}$$

$$\alpha = \frac{2\pi x}{\tau} \text{ für } 0 \le x \le \tau \tag{2.100}$$

mit: K als elektromagnetischem Kopplungsfaktor.

Eine Verschiebung des Reiters auf dem Lineal führt bei den hochfrequenten Spannungsverläufen dort zu Phasensprüngen um 180°, wo der Verlauf der Einhüllenden seine Nulldurchgänge hat. Die eindeutige Bestimmung der Lage des Reiters erfolgt durch eine Auswertung der Phase α über den Verlauf der einhüllenden Spannungsverläufe in den Reiterwicklungen sowie über das Phasenverhältnis (Gleich- oder Gegenphasigkeit) der hochfrequenten, induzierten Signale. Das im ▶ Kap. 2.3.3.3 beschriebene Amplitudenauswerteverfahren dient zur Umsetzung der Reiterspannungen in digitale Pulsfolgen, die in der NC-Steuerung als Zählinkremente verarbeitet werden.

Den Aufbau eines Linear-Inductosyns zeigt Bild 2.68. Das Lineal wird am ortsfesten Maschinenteil (z. B. Bett) befestigt. Der Reiter befindet sich am beweglichen Maschinenteil (z. B. Schlitten oder Tisch). Dabei muss ein relativ kleiner Luftspalt (etwa 0,25 mm) zwischen beiden Komponenten eingehalten werden.

Einzelne Inductosyn-Maßstäbe haben in der Regel Teilungen von 2 mm oder 1/10 Zoll und Längen von etwa 250

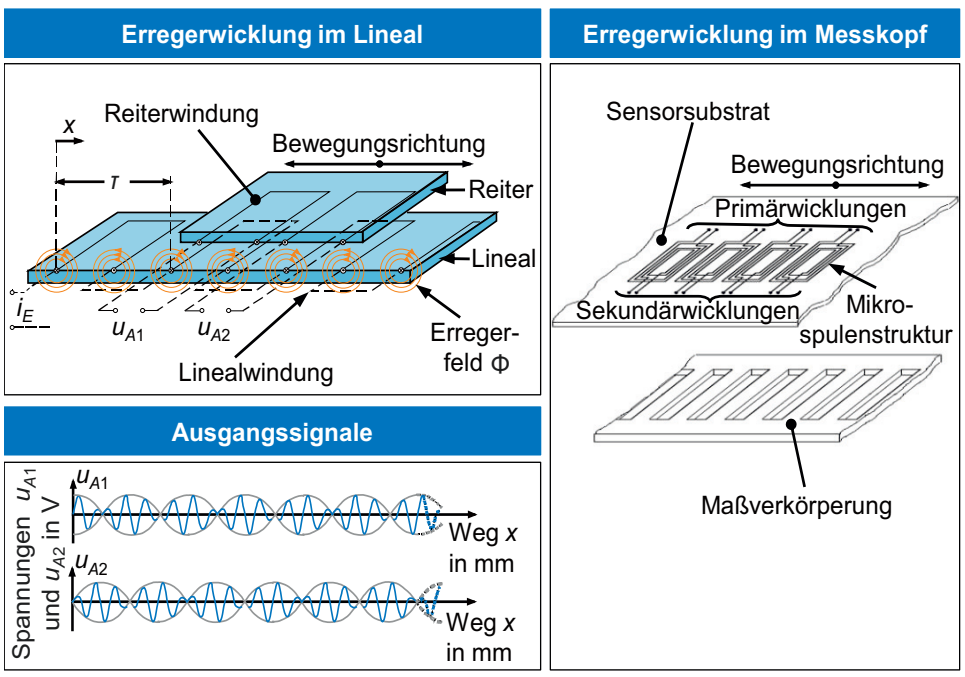


Bild 2.67 Prinzipielle Darstellung und Funktionsweise des Linear-Inductosyns. Nach AMO Automatisierung Messtechnik Optik

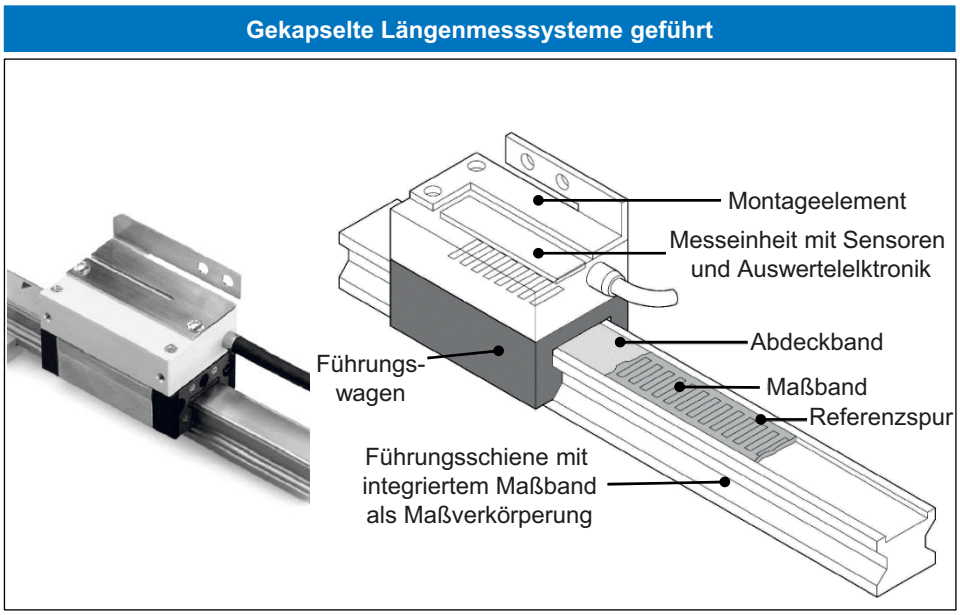


Bild 2.68 Aufbau des Linear-Inductosyns. Nach AMO Automatisierung Messtechnik Optik

bis 1000 mm. Bei größeren Wegen werden mehrere Maßstabelemente aneinander gereiht, wobei eine sorgfältige Justage zur Vermeidung von Fehlern an den Stoßstellen erforderlich ist.

Resolver

Der Resolver ist ein elektromagnetischer Winkelmessaufnehmer, der z. B. in Verbindung mit einer Kugelrollspindel auch als Wegmesssystem verwendet werden kann. In seinem Aufbau ähnelt der Resolver einem kleinen Elektromotor mit Präzisionswicklungen. Der Stator trägt zwei Wicklungsgruppen, deren Wicklungsebenen senkrecht aufeinander stehen, also 90° räumlich gegeneinander gedreht sind. Die prinzipielle Anordnung der Wicklungen ist in Bild 2.69 dargestellt.

Die Rotorwicklung wird mit einem hochfrequenten Wechselstrom $i_E(t)$ (etwa 10 kHz) gespeist, der ein magnetisches Wechselfeld Φ hervorruft. Das magnetische Wechselfeld wiederum induziert in den Statorwicklungen die Wechselspannungen $u_{A1}(t)$ und $u_{A2}(t)$, die, wie das Vektordiagramm zeigt, dem Cosinus bzw. Sinus des Drehwinkels α proportional sind. Die Auswertung der in den Statorwicklungen induzierten Spannungsverläufe erfolgt in Analogie zu dem Inductosyn-Messsystem [HAMA19; HEWL76]. Der dabei ermittelte Winkel α entspricht dem Drehwinkel des Resolverrotors. Die Periodizität des Signalverlaufs ermöglicht eine eindeutige Messwertzuordnung nur innerhalb einer Rotorteilung. Es handelt sich um ein zyklisch-absolut arbeitendes Messsystem

Grundsätzlich sind verschiedenartige Wicklungskombinationen in Ständer und Rotor möglich [BEIK00; HAMA19; HEWL76]. Zur Erhöhung des Auflösungsvermögens wird die Gesamtwicklung des Stators in Wicklungsgruppen unterteilt, deren Anzahl durch die Polteilung p gegeben ist. Durch die Kombination von Wicklungsgruppen mit der Polteilung 1 und solchen mit höherer Teilung erhält man Resolver, die innerhalb einer Umdrehung die Winkelposition absolut und mit einer Auflösung von einigen Winkelsekunden erfassen können. Den realen Aufbau eines Resolvers zeigt Bild 2.70. Wie bei den meisten Resolvern wird auch hier die Rotorwicklung schleifringlos über einen Drehtransformator gespeist. Zum direkten Aufsetzen auf eine Welle sind Hohlwellenausführungen weit verbreitet.

Die kleine Bauweise, eine hohe Genauigkeit und extreme Robustheit sind besondere Vorteile des Resolver-Messsystems. Es findet deshalb häufig Anwendung im militärischen Bereich sowie in der Luft- und Raumfahrt. In Werkzeugmaschinen sind Resolver weitgehend durch optische Drehgeber verdrängt worden. Sie werden jedoch wieder zunehmend in drehzahlgeregelte Synchron- und Asynchronmotoren integriert, um die Winkellage des Läufers zwecks phasenrichtiger Steuerung des Ständerfeldes zu erfassen.

2.3.2.4 Magnetische Aufnehmer

Bei magnetischen Wegmesssystemen wird die Maßverkörperung durch die periodische Aufteilung des Maßstabes in Nord- und Südpole gebildet. Der Maßstab besteht aus einem hartmagnetischen Werkstoff mit hoher Koerzitivfeldstärke, in dem die Magnetisierung dauerhaft eingeprägt ist. Das Magnetfeld wird durch magnetoresistive Sensoren abgetastet, deren Widerstand sich unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes ändert. Eine Abtasteinheit enthält vier Senso-

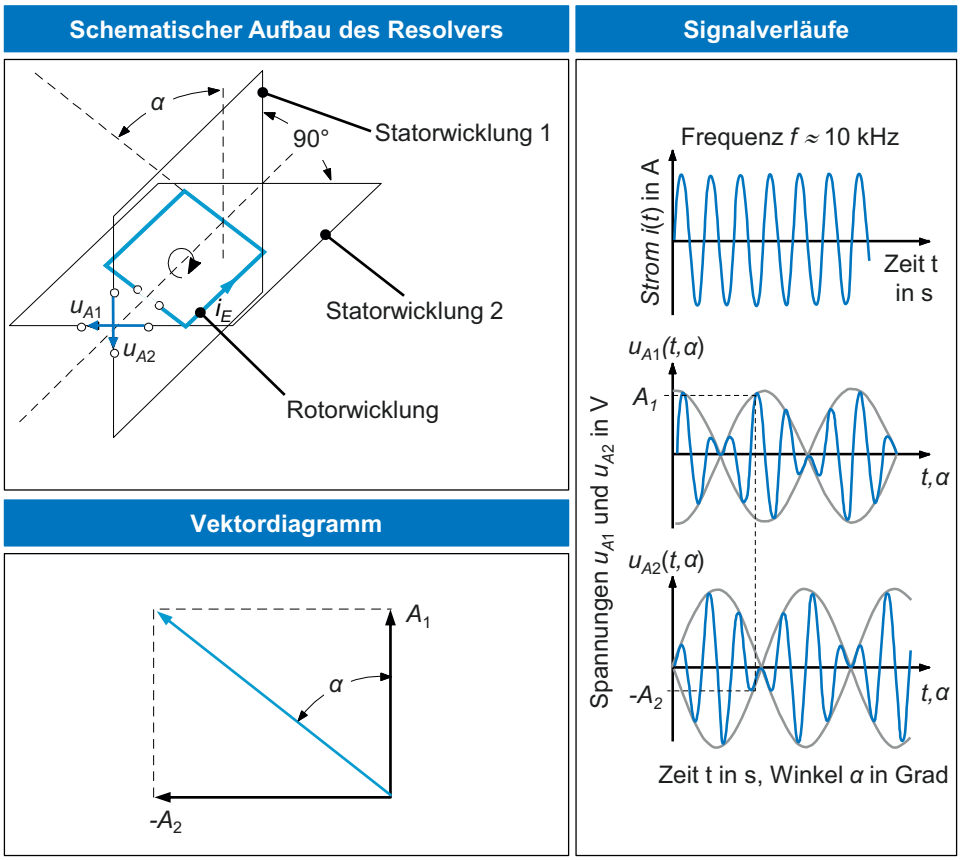


Bild 2.69 Funktionsprinzip des Resolvers

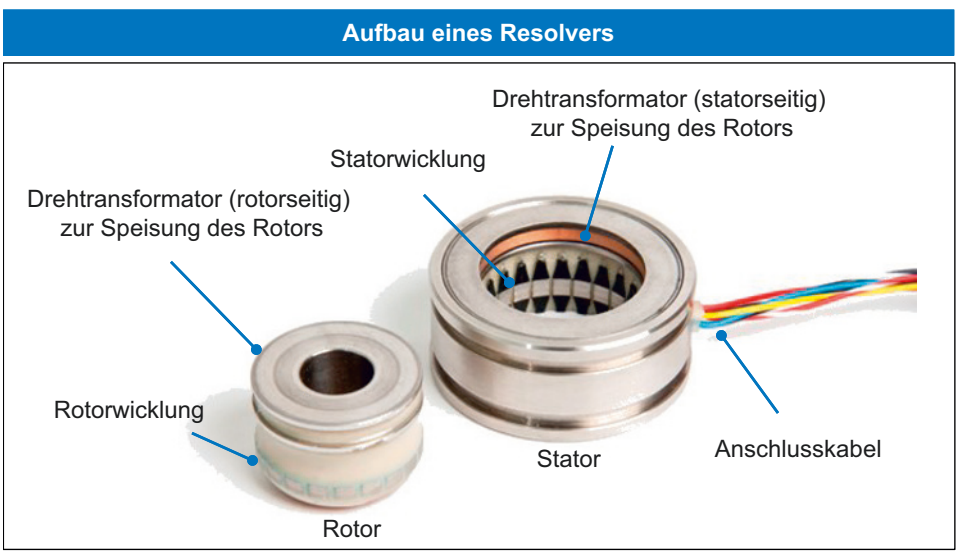


Bild 2.70 Aufbau eines Resolvers. Quelle: LTN Servotechnik (© Johann Hinrichs)

ren, die zu einer Wheatstone'schen Brücke (vgl. Band 2, ▶ Kap. 9.7.5 „Induktive Weggeber") verschaltet sind. Die Sensoren sind entsprechend der in Bild 2.71 gezeigten Anordnung gegeneinander versetzt. Dadurch erreicht man, dass die Brückenausgangsspannung $u_A(x)$ über den Verfahrweg x sinusförmig um die Nulllinie schwankt. Eine weitere Abtasteinheit, die gegenüber der ersten um $N\tau + \tau/4$ ($N = 1, 2, 3, \ldots$) versetzt ist, erzeugt das zweite um 90° verschobene Ausgangssignal. Beide Signale dienen als Eingangsgröße für die Interpolationseinheit.

Magnetische Wegmesssysteme sind gegenüber Verschmutzungen durch Öle und Fette unempfindlich. Zudem eignen sie sich aufgrund ihres geringen Bauvolumens für den direkten Einbau in die Schiene einer Wälzführung,

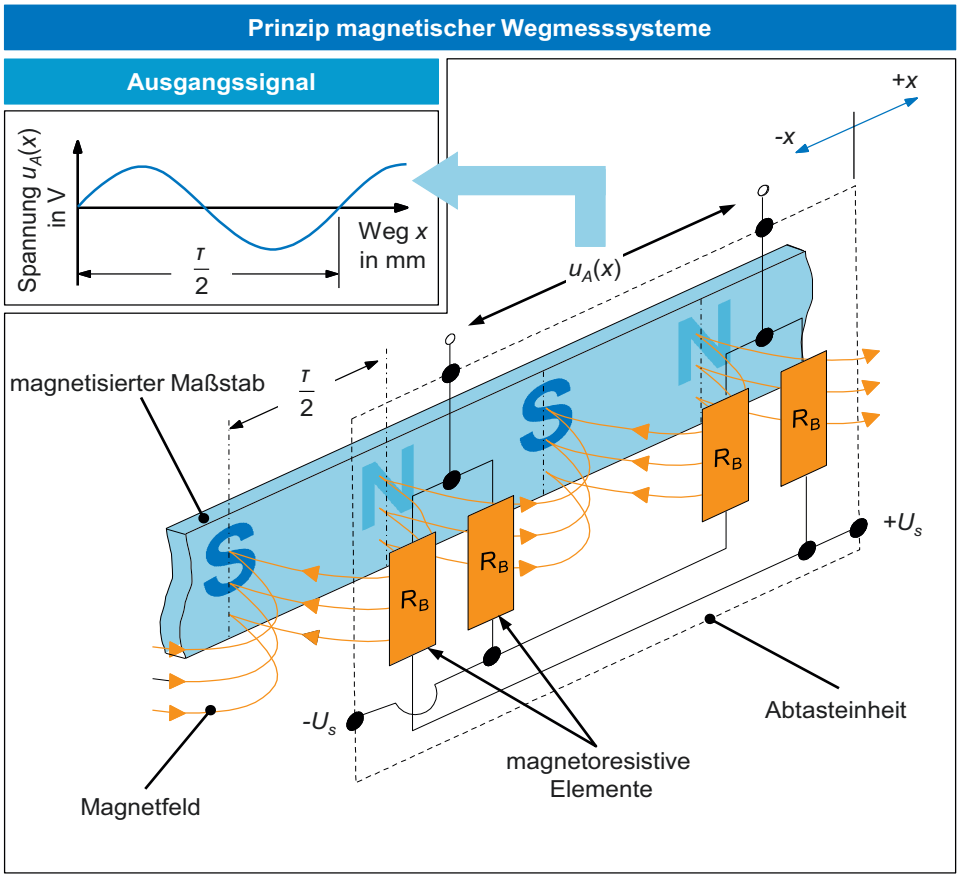


Bild 2.71 Prinzip magnetischer Wegmesssystem. Nach HEIDENHAIN

Bild 2.72. Eventuell anhaftende magnetisch leitende Metallpartikel werden durch Späneabstreifer entfernt, die ohnehin Bestandteile der Führungseinheit sind. Die Messsysteme bieten zusammen mit einer Interpolationseinheit ein für Werkzeugmaschinen ausreichendes Auflösungsvermögen von üblicherweise 1 µm. Zur Bestimmung der absoluten Messposition befindet sich auf dem Maßstab eine Referenzmarke.

Als Maßstab lässt sich alternativ ein magnetisiertes Kunststoffband verwenden, das gegenüber mechanischen Einwirkungen mit einem nicht-magnetischen Metallband geschützt ist. Magnetische Wegmesssysteme sind kostengünstig, denn das Kunststoffband ist preiswert erhältlich und kann einfach montiert werden. Ein Nachteil dieser Messsysteme ist ihr geringes Auflösungsvermögen, das etwa 10 µm beträgt. Sie eignen sich daher bevorzugt für die Anwendung in Holzbearbeitungsmaschinen, in Schlagscheren zur Profilstahlpartitionierung [CONR15] und für Handhabungsaufgaben.

Eine weitere rotatorische Ausführung eines magnetischen Messsystems wird in Bild 2.73 beschrieben. Eine Scheibe aus ferromagnetischem Material (z. B. Stahl) ist auf ihrem Umfang mit einer feinen, präzisen Zahnung versehen. In einem geringen Abstand von etwa 0,2 bis 0,5 zum Kopfkreisdurchmesser des Zahnrades sind die Abtastelemente angeordnet. Die Abtaster erzeugen ein permanentes Magnetfeld, das auch die Zähne der Teilscheibe durchdringt. Der magnetische Fluss ändert sich abhängig davon, ob sich ein Zahn oder eine Zahnlücke vor dem Abtastelement befindet. Der magnetische Fluss wird durch magnetoresistive Sensoren erfasst und in ein analoges, annähernd sinusförmiges Spannungssignal umgewandelt [HEID89; HEWL92]. Ein zweites, um $N\tau+\tau/4$ versetztes Abtastelement erzeugt das um 90° phasenverschobene Signal, mit dem eine Vorwärts- bzw. Rückwärtserkennung möglich ist. Zur Erhöhung des Auflösungsvermögens werden die Ausgangssignale einer Interpolationseinheit zugeführt (vgl. ▶ Kap. 2.3.3).

Für die Zahnteilung werden Standardmodule (z. B. $m=0{,}3$ oder $m=0{,}5$) verwendet. Zur Verfügung stehen Zahnräder mit Durchmessern zwischen ca. 77 und 257 mm bei einer Zähnezahl von 256 oder 512 Zähnen. Die Winkelmessung kann mit einer Genauigkeit von 1/100° durchgeführt werden. Je nach Interpolation kann eine Auflösung von bis zu 18.000 Messschritten pro Umdrehung erreicht werden.

Das magnetische Messsystem ist sehr empfindlich gegenüber mechanischen Beschädigungen der Zahnteilung, aber sehr robust gegenüber Verschmutzung durch Öl oder Fett. Es wird deshalb bevorzugt ohne weitere Kapselung zur Messung der Winkelstellung der Hauptspindel bei Drehmaschinen mit einer NC-gesteuerten C-Achse verwendet. Hier wurden

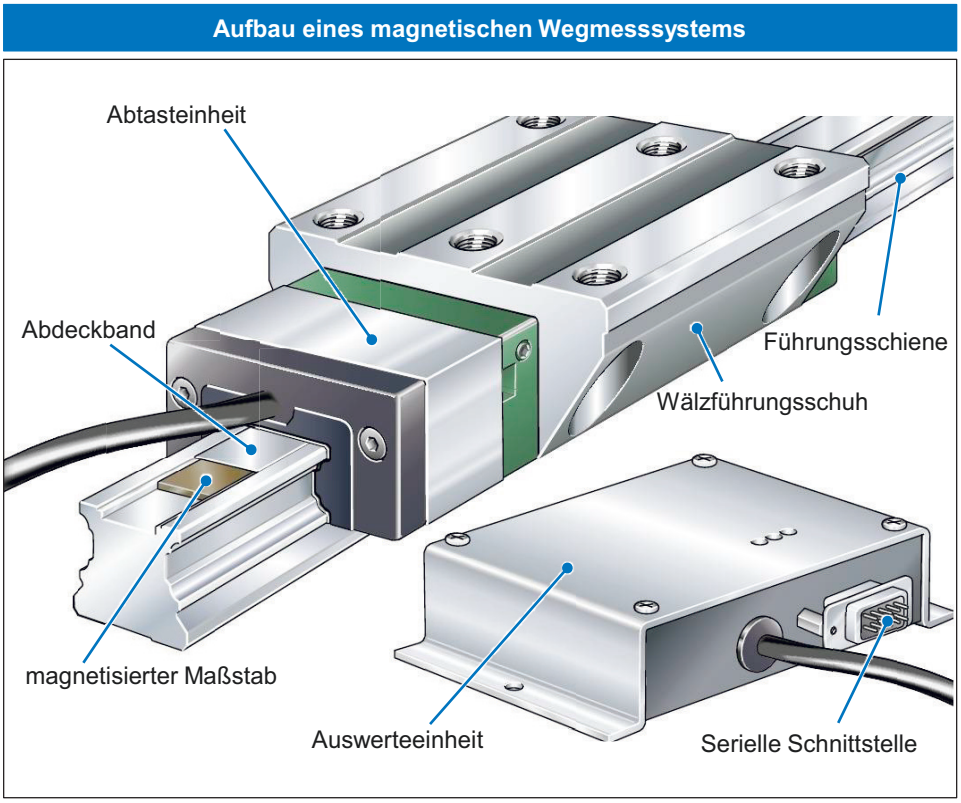


Bild 2.72 Aufbau eines magnetischen Wegmesssystems. Quelle: Schaeffler Technologies AG & Co. KG

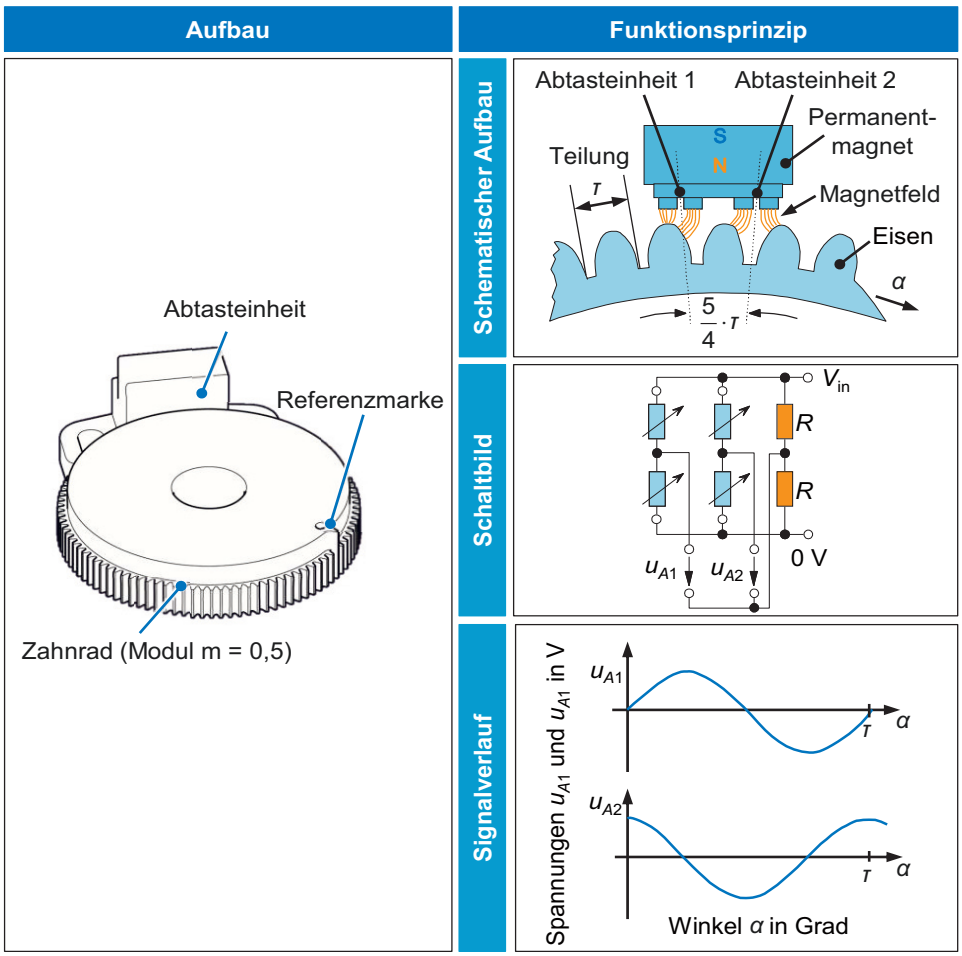


Bild 2.73 Abtastung einer Zahnteilung mit Hilfe magnetoresistiver Sensoren. Nach SIEMENS, Lenord + Bauer

früher optische Drehgeber eingesetzt, die, neben der Spindel montiert, über einen Zahnriemen angetrieben wurden. Durch das Fehlen der Übertragungsfehler des Zahnriementriebes ist die Genauigkeit der Winkelmessung mit dem in Bild 2.73 dargestellten System deutlich höher. Kritisch ist jedoch die Montage des Zahnrades auf der Spindel. Geringe Rund- und Planlauftoleranzen sind für die exakte Funktion des Systems erforderlich.

2.3.3 Interpolationsverfahren und Richtungserkennung

Die Ausgangswerte der Weg- oder Winkelmesssysteme liegen in der Regel in Form von periodischen, analogen Signalen vor, deren Amplituden sich sinusförmig mit dem Verfahrweg ändern. Die Periodenlänge ist dabei abhängig von der Teilung des Messsystems. Im Allgemeinen ist die Periodenlänge zu grob, sodass ein bloßes Auszählen nicht die bei Werkzeugmaschinen erforderliche Auflösung bringt. Die Messung von Verfahrwegen erfolgt üblicherweise in Messschritten von 1 µm. Bei Ultrapräzisionsmaschinen sind sogar Auflösungen von wenigen Nanometern gefordert. Deshalb ist es erforderlich, je nach Art der analogen Ausgangssignale Interpolationsverfahren anzuwenden, Bild 2.74. Durch die Interpolation wird die Periode des Messsignals in ganzzahlige Vielfache unterteilt. Das Ausgangssignal der Interpolationseinheit besteht aus zwei Rechteckfolgen, die um 90° gegeneinander phasenversetzt sind. Anhand des Vorzeichens der Phasenverschiebung der Signalverläufe untereinander lässt sich die Verfahrrichtung ermitteln. Eine zusätzliche Erhöhung des Auflösungsvermögens wird erreicht durch das Zählen der Flanken einer Rechteckfolge (Zweifach-Auswertung) oder beider Folgen (Vierfach-Auswertung) innerhalb der Teilungsperiode τ' des digitalen Signals.

Die Eingangsfrequenz f_{ein} der Interpolationseinheit errechnet sich entsprechend Bild 2.74 nach:

$$f_{ein} = \frac{v}{\tau} \tag{2.101}$$

mit:
v = Verfahrgeschwindigkeit
τ = Teilungsperiode

Die Eingangsfrequenz der Interpolationseinheit ist begrenzt. Oftmals bedingt eine Erhöhung des Auflösungsvermögens eine Reduzierung der maximal möglichen Verfahrgeschwindigkeit.

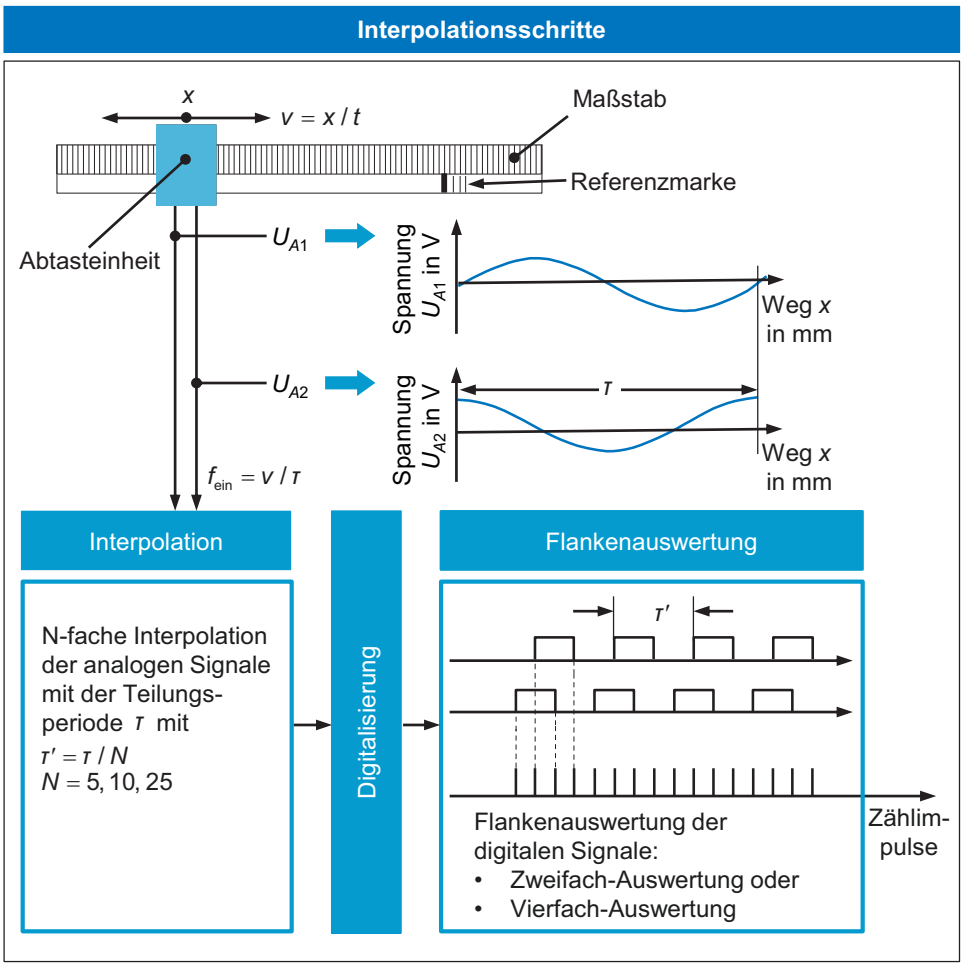


Bild 2.74 Interpolationsschritte und -verfahren zur Erhöhung des Auflösungsvermögens

2.3.3.1 Interpolation mit Hilfsphasen

Liegen die Ausgangssignale eines Messsystems in Form zweier sinusförmiger, um 90° verschobener Spannungen vor, so lässt sich das Interpolationsverfahren mit Hilfsphasen bzw. Frequenzvervielfachung anwenden [MILL90]. Die beiden Spannungen haben den Verlauf

$$U_{A1} = k \cdot \cos\alpha \tag{2.102}$$

$$U_{A2} = k \cdot \sin\alpha \tag{2.103}$$

mit:

$$\alpha = \frac{2\pi x}{\tau}$$

x = zurückgelegter Weg oder Winkel innerhalb einer Teilung
τ = Teilungsperiode

Werden die beiden Spannungen mit Hilfe des Widerstandnetzwerks in ◘ Bild 2.76 entsprechend

$$U_n = A_n U_{A1} + B_n U_{A2} = A_n \cdot k \cdot \cos\alpha + B_n \cdot k \cdot \sin\alpha \tag{2.104}$$

überlagert, erhält man ein resultierendes Signal U_n, das gegenüber U_{A1} um λ_n phasenverschoben ist, je nachdem wie groß A_n und B_n gewählt werden.

$$U_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \cdot k \cdot \cos(\alpha - \lambda_n) \tag{2.105}$$

Zur Berechnung der Werte A_n und B_n zu einer vorgegebenen Phasenverschiebung λ_n ist in ◘ Bild 2.75 ein Addierglied des Widerstandnetzwerks im Detail dargestellt.

Die Ausgangsspannung U_n in ◘ Bild 2.75 wird dann nach Gleichung (2.106) berechnet.

$$\begin{aligned} U_n &= -R \cdot \left(\frac{-U_{A1}}{R_n} + \frac{-U_{A2}}{R'_n}\right) \\ &= \frac{R}{R_n} U_{A1} + \frac{R}{R'_n} U_{A2} \\ &= \frac{R}{R_n} k\cos(\alpha) + \frac{R}{R'_n} k\sin(\alpha) \end{aligned} \tag{2.106}$$

Da die Phasenverschiebung durch $\lambda_n = n \cdot 18°$ (n = 1, 2, 3, …) vorgegeben ist und die Amplituden der Ein- und Ausgangssignale gleich groß sind, gilt

$$U_n = k\cos(\alpha - \lambda_n)$$

mit dem Additionstheorem für trigonometrische Funktionen folgt

$$U_n = k\cos(\lambda_n)\cos(\alpha) + k\sin(\lambda_n)\sin(\alpha)$$

und ein Koeffizientenvergleich mit (2.104) und (2.106) ergibt

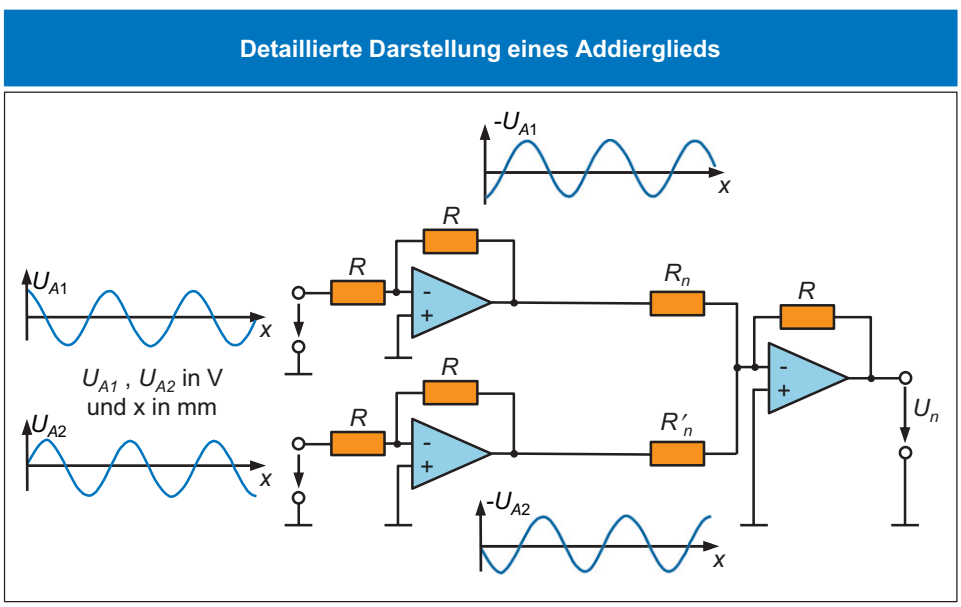
$$A_n = \cos(\lambda_n) = \frac{R}{R_n} \Leftrightarrow \boxed{R_n = \frac{R}{\cos(\lambda_n)}} \tag{2.107}$$

$$B_n = \sin(\lambda_n) = \frac{R}{R'_n} \Leftrightarrow \boxed{R'_n = \frac{R}{\sin(\lambda_n)}}. \tag{2.108}$$

Für die Phasenverschiebung gilt dann

$$\lambda_n = \arctan\frac{B_n}{A_n} = \arctan\frac{R_n}{R'_n} = \arctan\frac{R/\cos\lambda_n}{R/\sin\lambda_n}. \tag{2.109}$$

Die Schaltung in der Mitte von ◘ Bild 2.76 erzeugt aus den beiden sinusförmigen Spannungen der Photoelemente eine Vielzahl phasenverschobener Ausgangssignale U_n, die in ◘ Bild 2.76 unten links als Vektordiagramm dargestellt sind.



◘ **Bild 2.75** Detaillierte Darstellung eines Addierglieds

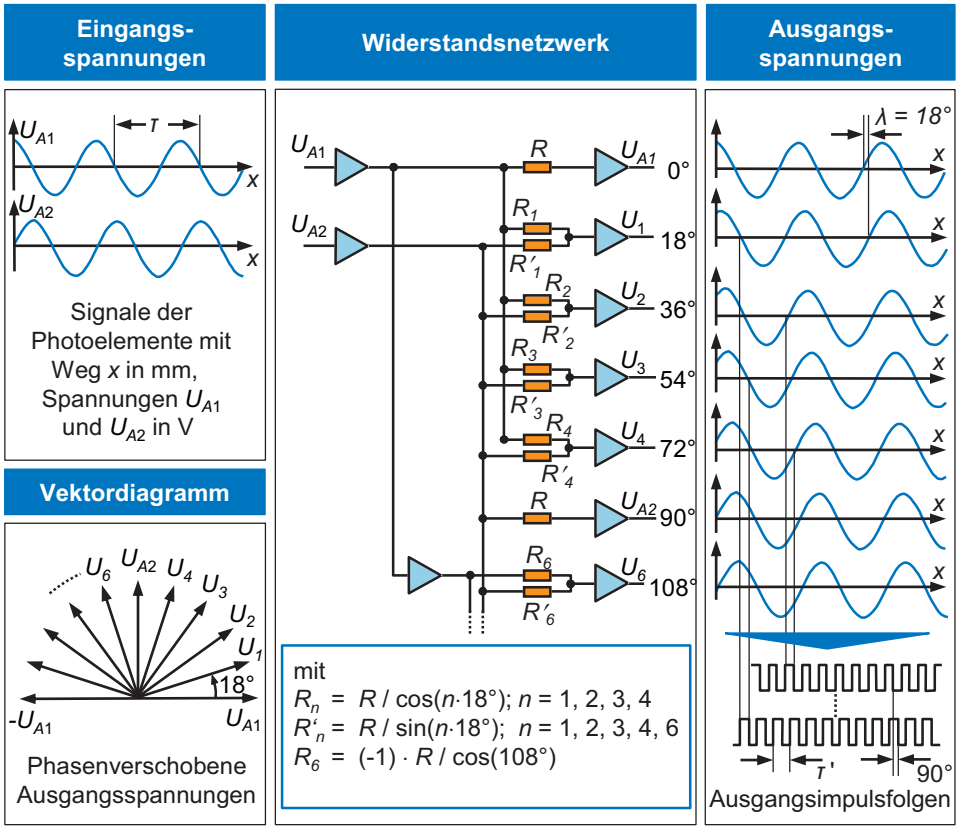


Bild 2.76 Prinzip der Interpolation (fünffach) durch Hilfsphasen oder Frequenzvervielfachung. Nach HEIDENHAIN

Die *X*- und *Y*-Komponente der Spannung eines Ausgangs entspricht den Spannungen an dessen vorgeschalteten Widerständen (trigonometrischer Pythagoras).

Die Nulldurchgänge der Ausgangssignale werden mittels einer nachfolgenden Logikschaltung so ausgewertet, dass man zwei Impulsfolgen erhält, die zueinander einen Phasenversatz von 90° haben. Die Teilung τ' dieser Impulsfolgen muss ein ganzzahliger Bruchteil der Teilung τ des Eingangssignals sein. Durch dieses Interpolationsverfahren ist eine Erhöhung des Auflösungsvermögens eines Maßstabes oder Drehgebers um einen Faktor von bis zu 25 möglich. Durch Auszählen jeder Flanke der beiden Impulsfolgen kann die Anzahl der Messschritte nochmals um den Faktor 4 erhöht werden. Somit ist mit ausreichender Genauigkeit eine Steigerung des Auflösungsvermögens um das 100-fache gegenüber der Maßstabsteilung möglich. Die vom Messsystem gelieferten Spannungen U_{A1} und U_{A2} sind nicht ideal sinusförmig. Sie enthalten Oberwellen, Offset- und Phasenfehler. Aufgrund dieser Fehler ist eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens durch Interpolation nicht sinnvoll. Zu beachten ist auch, dass durch die Interpolation nur das Auflösungsvermögen, nicht aber die Genauigkeit des Messsystems gesteigert wird.

2.3.3.2 Digitale Interpolation

Mit einer Arkustangens-Tabelle in der Auswerteelektronik ist ebenfalls eine Interpolation realisierbar. Sind die Amplituden der Spannungen U_{A1} und U_{A2} gleich groß, so gilt mit k = konst. (Amplitudenfaktor) und $\alpha = 2\pi x/\tau$

$$U_{A1} = k \cdot \cos\alpha$$
$$U_{A2} = k \cdot \sin\alpha \qquad (2.110)$$
$$\frac{U_{A2}}{U_{A1}} = \frac{k \cdot \sin\alpha}{k \cdot \cos\alpha} = \tan\alpha \qquad (-\pi/2 < \alpha \le \pi/2)$$

Für den verfahrenen Weg x gilt:

$$x = \frac{\tau}{2\pi} \arctan\frac{U_{A2}}{U_{A1}} + n\frac{\tau}{2} \qquad (n = 1,2,3\ldots) \qquad (2.111)$$

Das Bild 2.77 zeigt das Blockschaltbild einer digitalen Interpolationseinheit, die eine Arkustangens-Tabelle nutzt. Die vom Messsystem kommenden analogen Signale U_{A1} und U_{A2} werden zunächst digitalisiert. Diese Digitalwerte dienen als Adressen für eine Interpolationstabelle, aus der der zugehörige Arkustangens-Wert ausgelesen wird. Zur Erzeugung der Impulsfolgen wird mit dem Tabellenwert ein Nachlaufzähler angesteuert. Diese Schaltung enthält einen steuerbaren Pulsgenerator, einen Differenzrechner sowie einen Vorwärts-/Rückwärtszähler, die einen geschlossenen Regelkreis bilden. Der Differenzrechner vergleicht den eingegebenen Wert aus der Interpolationstabelle mit dem Zählerstand des Vorwärts-/Rückwärtszählers. Mit dem Differenzwert wird der Pulsgenerator gesteuert. Je nach Größe des Wertes gibt

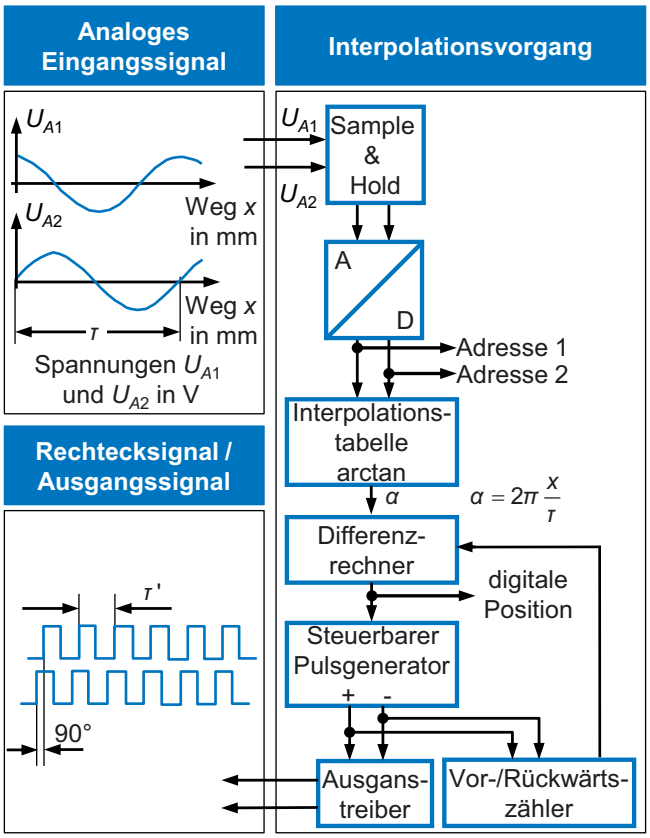


Bild 2.77 Blockschaltbild eines digitalen Interpolators

der Pulsgenerator mit einer entsprechenden Frequenz Aufwärts- oder Abwärtszählimpulse an den Zähler. Stimmen Tabellenwert und Zählerstand überein, gibt der Generator keine Pulse ab. Die Zählimpulse werden von dem Ausgangstreiber in zwei Rechtecksignale umgesetzt, die gegeneinander um 90° elektrisch phasenversetzt sind.

Aufwendigere digitale Interpolatoren enthalten zusätzliche Mikroprozessoren und Speicherbereiche, in denen Korrekturtabellen zur Kompensation systematischer Messfehler abgelegt sind. Mit einer solchen digitalen Auswerteeinheit ist eine Unterteilung der Signalperiode des Messsystems bis zu einem Faktor von 4096 möglich [TR14]. Diese extrem feine Unterteilung wird hauptsächlich dazu benutzt, um auch bei sehr langsamen Verfahrbewegungen ausreichend viele Impulse zu erzeugen. Aus dem Wegsignal kann dann durch Differenziation mit ausreichender Genauigkeit der aktuelle Geschwindigkeitswert bestimmt werden. Ein zusätzlicher Tachogenerator für den Geschwindigkeitsregelkreis, der dem Lageregelkreis unterlagert ist, entfällt somit.

2.3.3.3 Amplitudenauswertung

Die Amplitudenauswertung wird angewendet, wenn das Messsystem zwei Signale mit einer konstanten Frequenz f (Trägerfrequenz) ausgibt, deren Amplitude sich in der Messgröße (Verfahrweg, Drehwinkel) sinusförmig ändert. Die beiden Wechselstromsignale haben die Form

$$u_1 = A \cdot \sin \omega t \cdot \cos \alpha \tag{2.112}$$

$$u_2 = A \cdot \sin \omega t \cdot \sin \alpha \tag{2.113}$$

$$\alpha = \frac{2\pi x}{\tau} \tag{2.114}$$

$$\omega = 2\pi f \tag{2.115}$$

mit:
x = zurückgelegter Weg oder Winkel
τ = Teilung
f = Trägerfrequenz
Die Signale werden verstärkt und phasenrichtig gleichgerichtet. Anschließend ist eine Interpolation möglich.

2.3.3.4 Richtungserkennung

Beim inkrementalen Messverfahren werden die Perioden eines Messsignals während des Verfahrens gezählt. Zur Richtungserkennung werden zwei periodische Signale benötigt, die um 90° gegeneinander versetzt sind. Bei Änderung der Verfahrrichtung springt die Phasenverschiebung von +90° auf −90°. Das Prinzip der Richtungserkennung wird anhand von Bild 2.78 deutlich. Ein Maßstab trägt eine Hell-Dunkel-Rasterung mit der Teilungsperiode τ. Die Rasterung wird mit zwei Photoelementen A und B abgetastet, deren Breite im Verhältnis zur Teilung des Maßstabs klein sei.

In Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung des Maßstabs nach rechts bzw. nach links entstehen die unterschiedlichen Signalfolgen a und b am Ausgang der Abtastelemente A und B. In der Auswerteschaltung, Bild 2.78 rechts oben, werden die Rechteckfolge b und deren Inverse $\overline{b}$ differenziert und die Signale b' und $\overline{b}'$ gewonnen. Durch den Einsatz der UND-Gatter Verknüpfung von b' bzw. $\overline{b}'$ mit a werden jeweils nur die positiven Anteile der Signale b' bzw. $\overline{b}'$ als Zählimpulse an den Zähler weitergegeben. Je nachdem, ob sich der Maßstab nach rechts oder links bewegt, wird der angeschlossene Zähler inkrementiert oder dekrementiert und entspricht damit der diskreten Weglänge bzw. dem Drehwinkel.

2.3.4 Messgeräte – Auswahl und Einbau

Unterschiedliche Anforderungen an Funktionalität und Leistung der unterschiedlichen Positionsmessgeräte für Längen und Winkel stehen einer Vielzahl von Auswahlmöglichkeiten gegenüber. Für die Messgenauigkeit, d. h. die Abweichung des ermittelten Positionswertes vom tatsächlichen

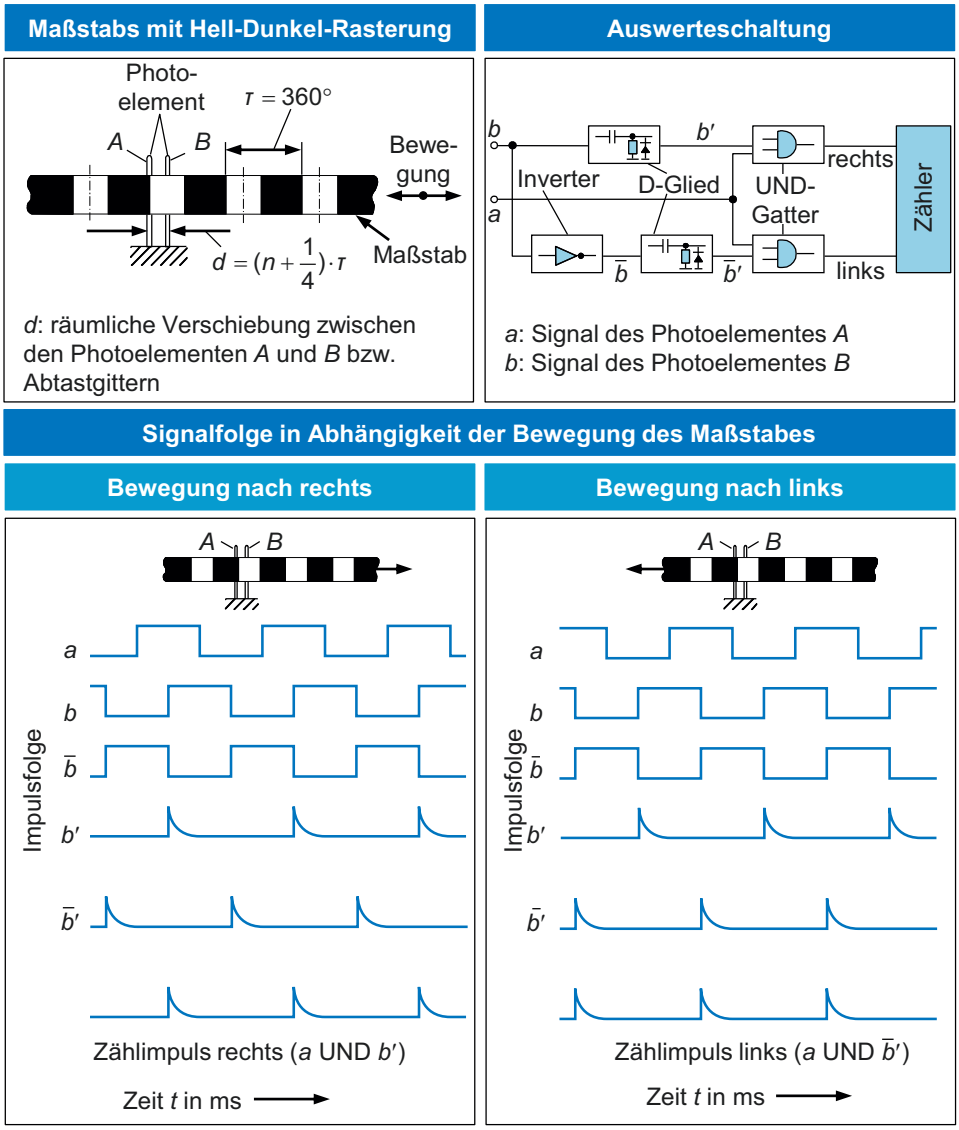


Bild 2.78 Richtungserkennung beim inkrementalen Messsystem. Nach Herold, Maßberg, Stute

Positionswert, ist zum einen die Fertigungsgenauigkeit des Messgeräts entscheidend. Zum anderen haben der Anbauort in der Maschine sowie die Einhaltung von Einbautoleranzen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit des ermittelten Positionswertes.

2.3.4.1 Auswahl des Messgeräts

Maschinen und Anlagen, die zur Montage oder zum Transport von Komponenten dienen, stellen meist geringere Anforderungen an das Positionsmessgerät, als beispielsweise Fertigungsmaschinen, die eine spanabhebende Bearbeitung von eng tolerierten Bauteilen ermöglichen.

Zum Messen von Längen und linearen Wegen werden Spindel-Drehgeber-Systeme oder Längenmessgeräte verwendet. Spindel-Drehgeber-Lösungen nutzen die Spindelsteigung der Antriebsspindel als Maßverkörperung, die vergleichsweise grob, d. h. im Bereich von 5 bis 40 mm ausfällt. Der Drehgeber dient dabei der mechanisch-elektronischen Unterteilung der Spindelsteigung, sodass sich Messschritte im Mikrometer-Bereich realisieren lassen. Nachteilig auf die Positioniergenauigkeit wirken sich grundsätzlich Wärmequellen aus, die in der meist stark vorgespannten Spindelmutter ihren Ursprung haben oder vom Antrieb ausgehen und ein Spindellängenwachstum verursachen. Die stellenweise schwer zu erfassenden lokalen Erwärmungen der Spindel resultiert in erheblichen, schwer vorhersehbaren Abweichungen bei der Positionierung der Vorschubachsen. Dies führt schließlich zu Ausschuss in der Fertigung.

Direkte Längenmessgeräte nehmen Verfahrbewegungen des Achsschlittens unmittelbar auf und werden heute in überwiegender Mehrzahl in Werkzeugmaschinen eingesetzt. Der Regelkreis schließt so – im Gegensatz zur Spindel-Drehgeber-Lösung – die Vorschubmechanik mit ein. Ein Spindelwachsen aufgrund thermischer Einflüsse hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit des ermittelten Positionswertes. Bei gekapselten Längenmessgeräten schützt ein Gehäuse den Maßstab und die

Abtasteinheit vor Spänen, Staub und Spritzwasser. Diese Ausführungen eignen sich insbesondere für den Betrieb in Werkzeugmaschinen. Gekapselte Längenmessgeräte sind in der Regel eigengeführt, d. h. die Abtasteinheit wird relativ zum Maßstab über eine Lagerung geführt. Dies kann ggf. die Beschleunigungen begrenzen. In diesem Fall bieten sich offene Längenmessgeräte an, die ohne mechanischen Kontakt zwischen Abtasteinheit und Maßstab arbeiten.

Die Erfassung von Drehbewegungen und Winkeln, z. B. bei Drehtischen oder Spindelachsen, erfolgt über zwei Gerätearten: Drehgeber und Winkelmessgeräte, die sich in der Messgenauigkeit unterscheiden. Drehgeber haben in der Regel Messgenauigkeiten von ±10 Winkelsekunden, bei Winkelmessgeräten erreicht man Messgenauigkeiten von bis zu ±0,2 Winkelsekunden.

Gekapselte Drehgeber und Winkelmessgeräte besitzen grundsätzlich eine Eigenlagerung der Rotoren. Unterschiede gibt es in den Wellenausführungen: Geräte mit Vollwelle benötigen zur Ankopplung an die zu messende Welle meist eine Kupplung, die radiale und axiale Wellenbewegungen ausgleicht. Blattfeder- und Rohrbalgkupplungen werden hier häufig eingesetzt, ◘ Bild 2.51.

Geräte mit Hohlwelle verfügen über eine integrierte oder angebaute Statorkupplung. Die Statorkupplung muss nur das aus der Lagerreibung resultierende Drehmoment aufnehmen und die Exzentrizitäts- und Taumelbewegungen des Wellenendes, an das der Drehgeber angekoppelt ist, ausgleichen. Diese Geräte ermöglichen eine direkte und somit steife Ankopplung an die zu messende Welle und minimieren daher statische und dynamische Messabweichungen. Aufgrund der auf dem Markt erhältlichen relativ kleinen Lagerdurchmesser sind die Hohlwellendurchmesser bei eigengelagerten Ausführungen begrenzt. Erfordert die Maschinenkonstruktion größere Innendurchmesser, so werden Geräte ohne Eigenlagerung eingesetzt. Wie offene Längenmessgeräte arbeiten auch offene Winkelmessgeräte berührungslos, d. h. reibungsfrei und lassen höhere Beschleunigungen und Drehzahlen zu.

Üblicherweise sind Positionsmessgeräte mit diversen am Markt üblichen elektronischen Schnittstellen erhältlich, sodass sie sich modular in die jeweils verwendete Steuerungs- und Regelungsarchitektur einbinden lassen.

2.3.4.2 Anbauort in der Anlage und Maschine

Um Positionsinformationen mit geringen Abweichungen zu erfassen, ist neben der Genauigkeit des Messgeräts der Anbauort innerhalb der Maschine oder Anlage entscheidend.

Beim Erfassen von Längen beeinträchtigen beispielsweise Fehler von Achsführungen das Messergebnis. Verläuft die Messachse nicht exakt parallel zur Maßverkörperung, treten z. B. Kippfehler auf (Abbe'sche-Fehler), die sich aber durch eine geeignete Wahl des Einbauorts minimieren lassen. So sollte das Längenmessgerät möglichst in der Nähe des Messobjekts bzw. Werkzeugeingriffs platziert werden.

Beim An- oder Einbau von Winkelmessgeräten treten vor allem Exzentrizitätsfehler auf, die bei offenen Geräten zwischen der Maschinenlagerung und der Teilscheibe entstehen. Die durch Exzentrizität auftretenden Abweichungen können durch einen zweiten diametral angebrachten Abtastkopf weitgehend eliminiert werden. Bei Geräten mit Eigenlagerung gleicht die wellenseitig angebrachte Kupplung, bzw. bei Hohlwellenausführungen die integrierte Statorkupplung, Fluchtungsfehler aus.

Zu berücksichtigen sind in allen Fällen die Umgebungsbedingungen, die am Messort vorherrschen, wie Späne, Staub und Spritzwasser, welche die Funktionstüchtigkeit des Geräts beeinflussen. Flüssige Medien wie z. B. Kühlmittel können sich bei gekapselten Geräten im Inneren ansammeln. Abhilfe schaffen geeignete Schutzmaßnahmen, wie Abdeckungen oder Ablaufbohrungen, die ein Abfließen der Medien ermöglichen. Durch das Anlegen von Druckluft in das Gehäuseinnere wird ein Eindringen von Staub und Spritzwasser zusätzlich verhindert. Auch die Maschinenreinigung ist bei Wahl des Anbauortes zu berücksichtigen: Nicht selten werden die Maschinen nach dem Betrieb mit aggressiven Reinigungsmitteln oder mit Druckluft gesäubert.

Lassen sich die überwiegend mit photoelektrischer Abtastung arbeitenden Messgeräte nicht ausreichend schützen, stellen magnetische oder induktive Messgeräte eine Alternative dar. Dabei muss als Nachteil eine geringere Genauigkeit in Kauf genommen werden.

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Positioniergenauigkeit ist die Temperatur. Grundsätzlich sollte das Messgerät nicht in unmittelbarer Nähe von Temperaturquellen angebaut werden.

2.3.4.3 Montagehinweise

Ist der Anbauort für das Positionsmessgerät festgelegt, so sind die Anbautoleranzen, die der Messgeräte-Hersteller in seinen Anschlussmaßzeichnungen vorschreibt, einzuhalten. Diese beinhalten zulässige Führungsabweichungen, Rechtwinkligkeitsfehler, Parallelitäten von Anschraubflächen etc. Die Nichteinhaltung der vorgegebenen Toleranzen reduziert die Positioniergenauigkeit einerseits, andererseits werden die Funktionstüchtigkeit und die Lebensdauer des Messgeräts beeinträchtigt.

Gekapselte Längenmessgeräte lassen sich unter Berücksichtigung der Einbautoleranzen einfach montieren, da die Abtasteinheit am Maßstab geführt wird und somit eine Justage der Abtasteinheit zum Maßstab entfällt, ◘ Bild 2.79. Bei offenen Längenmessgeräten ist diese zusätzliche Justagearbeit immer aufzuwenden. Mechanische Hilfsmittel wie Abstandsplättchen oder -winkel sowie elektronische Hilfen, die quantitative oder qualitative Aussagen über das Messsignal ausgeben, erleichtern diese Arbeiten.

Eigengelagerte gekapselte Winkelmessgeräte und Drehgeber mit Vollwelle werden unter Berücksichtigung der Ein-

bautoleranzen statorseitig über ihren Anbauflansch befestigt. Zur wellenseitigen Ankopplung benötigen diese Geräte eine Rohrbalg-, Membran- oder eine Flachkupplung, Bild 2.51, die Fluchtungsfehler und Versatz von Drehgeberwelle und Motorwelle bzw. Kugelrollspindel ausgleicht. Bei dieser Gerätegattung können zusätzliche kinematische Fehler auftreten. Eine andere Bauart ist die Hohlwellen-Ausführung mit angebauter Statorkupplung, wie in Bild 2.80 skizziert. Die starre wellenseitige Verbindung ist torsionssteif, die Statorkupplung muss hierbei die Bewegung des Gehäuses, bedingt durch die Achsfehler, ermöglichen.

Offene Winkelmessgeräte verfügen über keine Eigenlagerung. Hier muss auf Exzentrizitätsfehler geachtet werden. Bei offenen Winkelmessgeräten sind auch Bandlösungen möglich. Hier sind mit relativ engen Toleranzen innen- oder außenliegende Nuten für das Band vorzubereiten. Bei außenliegenden Nuten ist zusätzlich ein Einbauraum für das Bandschloss zu berücksichtigen.

Bild 2.79 Einbaumaße und -toleranzen an einem gekapselten Längenmesssystem. Nach HEIDENHAIN

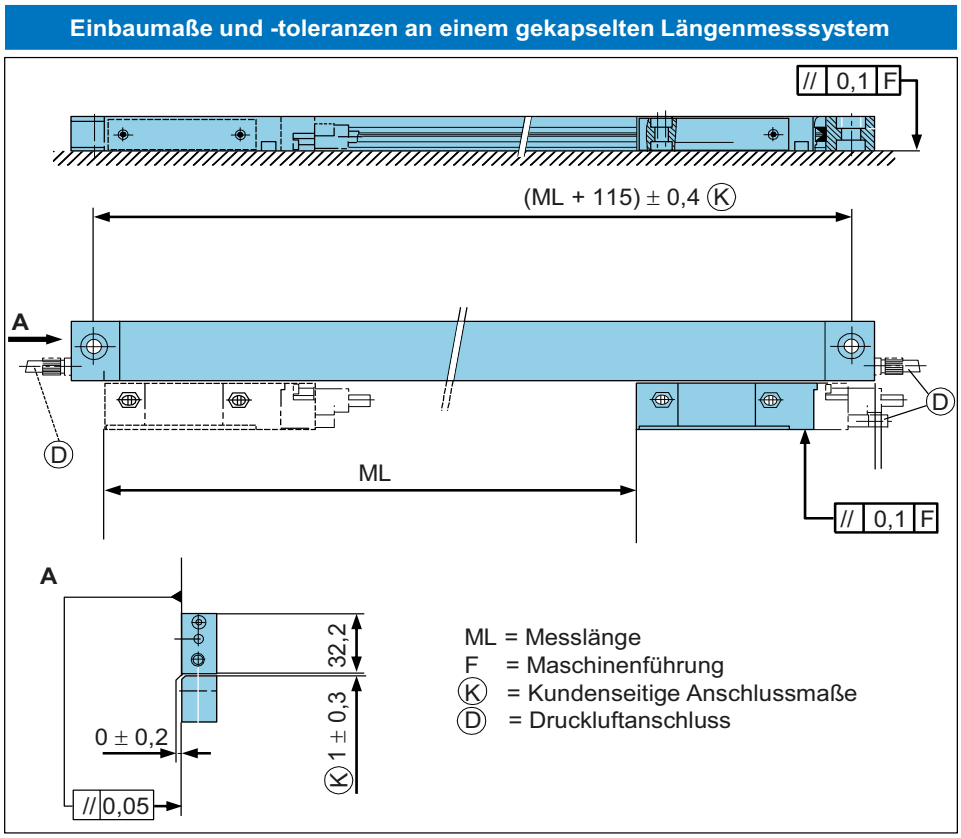
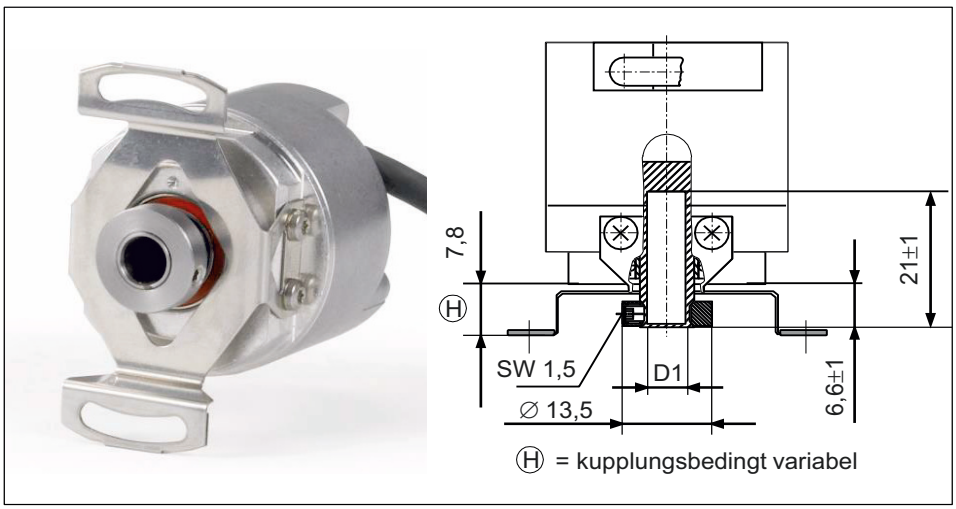


Bild 2.80 Einbaumaße eines Winkelmesssystems mit angebauter Statorkupplung. Quelle: HEIDENHAIN



2.3.4.4 Elektrischer Anschluss

Automatisierte Maschinen und Anlagen sind mechatronische Systeme, in denen erhebliche Leistungen installiert sind. Kapazitive oder induktive Einkopplungen können zu Störungen der Messsignale führen. Diese Einstreuungen erfolgen im Wesentlichen über Leitungen und Geräteein- und -ausgänge. Typische Störquellen sind starke Magnetfelder von Transformatoren und Elektromotoren, Relais, Schütze und Magnetventile, Hochfrequenzgeräte, Impulsgeräte und magnetische Streufelder von Schaltnetzteilen, Frequenzumrichtern sowie deren Netz- und Zuleitungen.

Um elektrische Störungen zu vermeiden, sollten nur speziell geschirmte Messgerätekabel und Steckverbinder verwendet werden (EN 50178). Die Messgerätekabel sollten so kurz wie möglich sein und nicht in unmittelbarer Umgebung zu Leistungskabeln anderer elektrischer Systeme verlegt werden.

Bei der Verwendung von Verbindungskabeln ist auf die Eignung des Kabels zu achten. Hierbei sind Biegeradien, Schleppkettentauglichkeit und Medienbeständigkeit zu berücksichtigen. Um den Versorgungsspannungsbereich der Messgeräte einzuhalten, ist der Spannungsabfall über der Kabellänge zu beachten.

2.4 Mechanische Übertragungselemente

Zu den mechanischen Komponenten sind alle Bauteile eines Vorschubantriebes zu rechnen, die im Kraftfluss zwischen Motor und Werkzeug bzw. Werkstück liegen. Neben den Komponenten zur Wandlung einer Rotationsbewegung in eine Translationsbewegung wie z. B. Kugelgewindetriebe sind dies Vorschubgetriebe, Kraftübertragungskomponenten und Kupplungen. Weitere Komponenten sind Werkzeug- und Werkstückhalter, Linear-Führungssysteme, Lagerungen, Führungsbahnabdeckungen und Energieführungsketten (vgl. ▶ Kap. 15.1). ◘ Bild 2.81 zeigt den schematischen Aufbau eines Vorschubantriebes mit Elektroservomotor, Zahnriementrieb, Gewindespindel, Gewindemutter und Werkstücktisch.

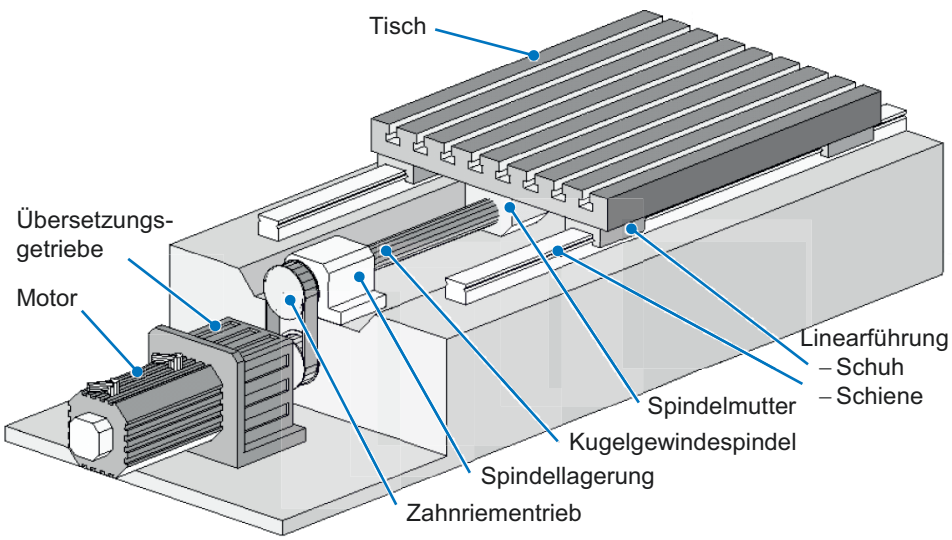
Die in Werkzeugmaschinen vorliegenden Vorschubaufgaben unterscheiden sich zum Teil sehr stark hinsichtlich ihrer Anforderungen bezüglich Verfahrweg, -geschwindigkeit und -beschleunigung sowie Bauraum. Hieraus ergeben sich zwangsläufig deutliche Unterschiede hinsichtlich des zu wählenden Antriebsprinzips und der Ausführung der verwendeten mechanischen Komponenten.

Der allgemeine Entwicklungstrend geht bei Gewindespindelantrieben zu getriebelosen Lösungen. Bei Maschinen mit großen Verfahrwegen finden Zahnstange-Ritzel bzw. Zahnstange-Schnecke oder auch Lineardirektantriebe Verwendung. Bei mittleren Maschinengrößen mit sehr hohen Beschleunigungsanforderungen der Vorschubbewegung wird heute ebenfalls auf den Lineardirektantrieb zurückgegriffen.

Die Vorschubaufgabe kann in vielen Fällen hinsichtlich der konstruktiven Lösung unterschiedlich realisiert werden. Dann entscheiden Zuverlässigkeit und Kostengesichtspunkte über die Wahl des Vorschubprinzips.

2.4.1 Komponenten zur Wandlung von Rotationsbewegung in Translationsbewegung

Wesentlich für elektromechanische Vorschubantriebe sind die Komponenten zur Umwandlung der rotatorischen Drehbewegung des elektrischen Antriebes in eine lineare Vorschubbewegung von Tisch oder Schlitten. In kleinen und mittelgroßen Werkzeugmaschinen werden hierzu überwiegend Gewindespindel-Mutter-Systeme verwendet. Bei



◘ **Bild 2.81** Schematischer Aufbau eines Vorschubantriebes mit Elektro-Servo-Motor und Gewindespindel-Mutter-System

langen Verfahrwegen besteht die Gefahr, dass Vorschubspindeln aufgrund ihrer Länge unter Last ausknicken und die Spindel-Drehfrequenz in den Bereich der Biegeeigenfrequenz der Spindel fällt. Deshalb werden Vorschubantriebe mit Kugelgewindetrieb und drehender Spindel in der Regel nur bis zu einer Verfahrweglänge von ca. 4 m eingesetzt. In Großdrehmaschinen und Langtischfräsmaschinen werden daher Ritzel-Zahnstange oder Schnecke-Zahnstange-Systeme verwendet.

Für Vorschubantriebe geringerer Anforderungen, insbesondere hinsichtlich Steifigkeit, kommen aufgrund der geringeren Kosten auch Zahnriementriebe zur Anwendung.

2.4.1.1 Gewindespindel-Mutter-Antrieb

Vorschubspindeln sind heute fast ausschließlich als Kugelgewindespindel ausgeführt, die entweder über ein vorgelagertes Getriebe oder direkt von einem Vorschubmotor angetrieben werden, ◘ Bild 2.82. Daneben finden auch Trapezgewindespindeln mit Bronzemuttern oder hydrostatischen Muttern, Rollen- oder Wälzringgewindespindeln Anwendung.

Kugelgewindeltriebe

Ein Kugelgewindetrieb (KGT), auch Kugelrollspindel genannt, dient wie alle Schrauben-Mutter-Systeme der Wandlung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung oder umgekehrt. Als Hauptanwendungsgebiete sind Vorschubantriebe in Werkzeugmaschinenachsen sowie Bewegungsachsen im Messgerätebau zu nennen.

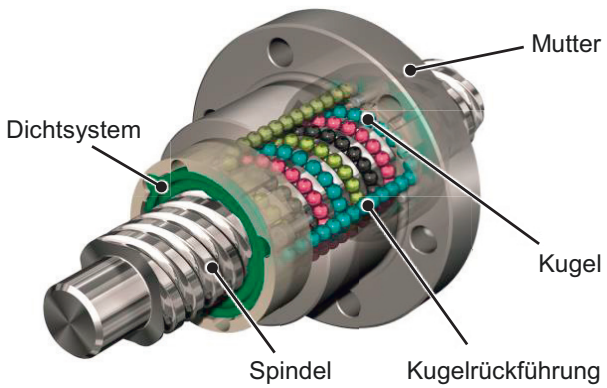
Gegenüber den beiden anderen verbreiteten Systemen zur Vorschuberzeugung, Ritzel-Zahnstange-Trieb und Linearmotor, zeichnet sich der Kugelgewindetrieb durch einen sehr hohen Wirkungsgrad aufgrund der Rollreibung, der fehlenden Stick-Slip-Effekte, der Spielfreiheit sowie einer ausreichend hohen Steifigkeit aus. Nachteilig sind die geringe Dämpfung, die Erwärmung des Systems bei hohen Drehzahlen sowie die variierende Axialsteifigkeit in Abhängigkeit der Mutterposition. Kugelgewindetriebe können heute mit bis zu 300 m/min Axialgeschwindigkeit und etwa 30 m/s² Axialbeschleunigung eingesetzt werden.

Ein Kugelgewindetrieb besteht im Wesentlichen aus einer Spindel, einer Mutter sowie Kugeln, ◘ Bild 2.82. Die Spindel und Mutter sind mit einem Gewindeprofil versehen, wobei die Flanken eine Kugellaufbahn nachbilden. Häufig werden Spindel und Mutter eingängig ausgeführt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, auch Systeme mit mehreren Gewindegängen, üblicherweise mit bis zu vier, zu realisieren, wie in ◘ Bild 2.82 dargestellt. Durch die mehrgängige Ausführung können bei bestimmten KGT-Varianten die Tragfähigkeit sowie die Lebensdauer erhöht werden. Während in einem Bewegungsgewinde die Gewindeflächen direkt aufeinander gleiten, werden diese beim Kugelgewindetrieb durch Kugeln voneinander getrennt, sodass die Gleitreibung durch die vorwiegend vorliegende Rollreibung ersetzt wird. Dadurch wird der Wirkungsgrad des KGT gegenüber dem Bewegungsgewinde bedeutend erhöht. Üblicherweise wird die Spindel rotatorisch angetrieben und die Mutter verdrehgesichert. Durch die Gewindesteigung kommt es zu einer axialen Relativbewegung zwischen der Mutter und der Spindel. Ein Antrieb des Kugelgewindetriebs über die Mutter ist ebenfalls möglich, wird jedoch seltener verwendet.

Da die Kugeln während des Betriebs zwischen den Gewindeflanken abwälzen, würden sie aus der Gewindenut herauswandern. Das Herauswandern der Kugeln wird durch eine Kugelumlenkung verhindert. Es wird grundsätzlich zwischen einer Gesamtumlenkung, bei der die Kugeln nach einem kompletten Durchlauf durch die gesamte Mutterlänge zurück in die Ausgangsposition geführt werden und einer Einzelgangumlenkung, bei der die Kugelrückführung nach jeder durchlaufenen Gewindewindung erfolgt, unterschieden. Die Möglichkeiten der Kugelumlenkung sind in ◘ Bild 2.83 dargestellt.

Die Gesamtumlenkung zeichnet sich aufgrund des tangentialen Einlaufs der Kugeln in die Umlenkung durch hohe Laufruhe auch bei hoher Dynamik sowie eine höhere Anzahl tragender Kugeln aus. Nachteilig an der Gesamtumlenkung sind die längere Kugelkette, welche eine höhere Fertigungspräzision erfordert, sowie eine höhere Empfindlichkeit des Kugelgewindetriebs gegenüber Radialkräften. Die Gesamtumlenkung kann mittels eines in die Mutter intergierten Rückführkanals oder eines Röhrchens realisiert werden. Die Gesamtumlenkung mittels Röhrchen hat den Vorteil einer optimierten Gestaltung der Kugeleinlaufzone jedoch auf Kosten des Mutterdurchmessers, welcher dadurch größer wird.

Trotz der Möglichkeit, die Kugeleinlaufzone zu gestalten, sind Stöße durch die Kugeln bei hohen Drehzahlen unvermeidbar. Neben der geometrischen Gestaltung ist daher auch das Material des Röhrchens für die Geräuschentwicklung, die Erwärmung und den Verschleiß der Mutter bei höheren Drehzahlen von Bedeutung. Der integrierte Rückführkanal



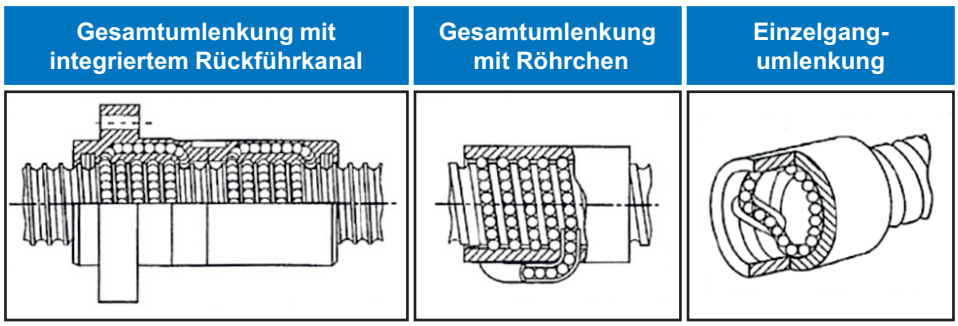
◘ **Bild 2.82** Aufbau eines Kugelgewindetriebs. Quelle: Bosch Rexroth

ist gegenüber der Gesamtumlenkung mit Röhrchen aufwendiger in der Herstellung und Montage, hat jedoch den Vorteil einer höheren Laufruhe und des kleineren Mutterdurchmessers. Die Einzelgangumlenkung, auch Gang-zu-Gang-Umlenkung genannt, ist gegenüber der Gesamtumlenkung kostengünstiger in der Herstellung, toleranter gegen Radialkräfte sowie montagefreundlicher. Nachteilig bei der Einzelumlenkung ist die geringere Anzahl an belasteten Kugeln, was die Tragfähigkeit des Kugelgewindetriebs verringert. Ferner wirkt sich die Vielzahl der Kugelein- und -austritte nachteilig auf ein gleichmäßiges Abwälzen aus, was eine Erhöhung der Reibung, des Verschleißes und der Geräuschbildung mit sich bringt [FORS10], ◘ Bild 2.83, rechts.

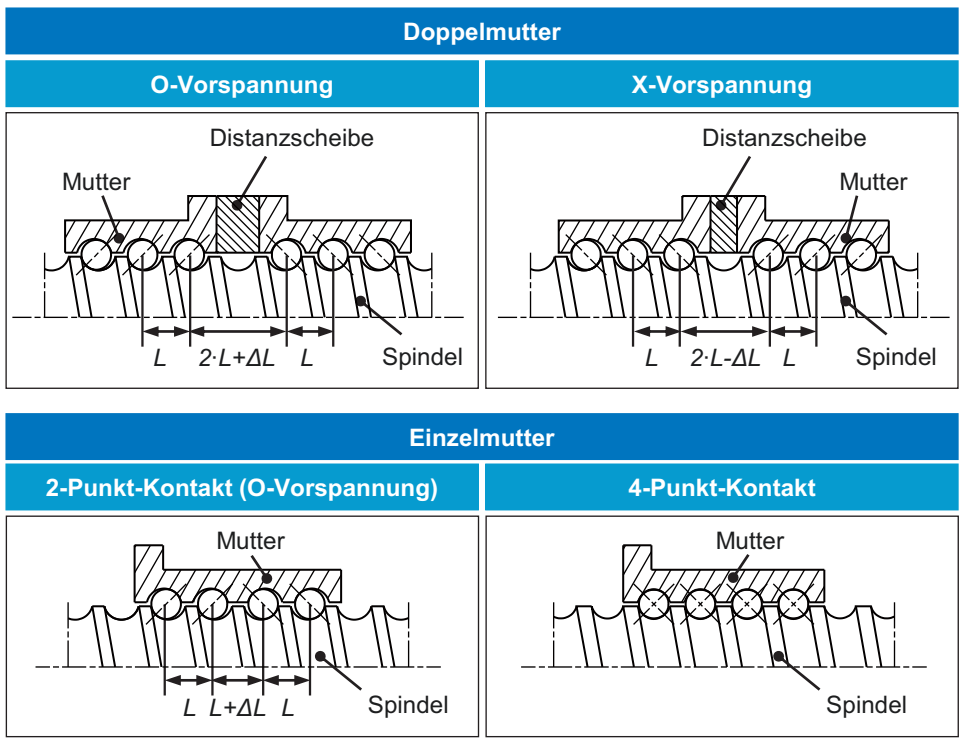
Um die Kugelstaugefahr in der Rückführung zu minimieren, können die Kugeln durch eine Art Käfig aus Kunststoff, die Kugelkette, auf Abstand gehalten werden. Nachteilig hierbei ist jedoch die geringere Anzahl an Kugeln, was eine Verminderung der Tragfähigkeit bewirkt.

Um die hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit zu erfüllen, ist bei Kugelgewindetrieben eine hohe Steifigkeit und/oder Spielfreiheit (keine Umkehrspanne) gefordert. Dies wird durch eine Vorspannung erreicht, welche entweder durch eine Zweiteilung der Spindelmutter (Doppelmutter) oder durch die Gestaltung der Kugellaufbahn in der Einzelmutter realisiert werden kann. ◘ Bild 2.84 zeigt die Möglichkeiten der Vorspannung von Einzel- und Doppelmuttern. Im oberen Teil des Bildes sind zwei Doppelmuttern abgebildet, bei denen die Spindel unter Zug- (links) bzw. Druckspannung (rechts) steht. Zwischen den Muttern ist ein kalibrierter Distanzring eingefügt, der die beiden Mutternhälften auseinander- bzw. zusammendrückt.

Vertiefende Informationen zur Verspannung, Auslegung und Berechnung sowie Dichtung und Schmierung von Kugelgewindetrieben befinden sich in Band 2, ▶ Kap. 6.6.4.



◘ **Bild 2.83** Möglichkeiten der Kugelumlenkung. Nach A. MANNESMANN, REMSCHEID



◘ **Bild 2.84** Möglichkeiten der Vorspannungserzeugung. Nach Steinmeyer

Rollengewindetriebe

Rollengewindetriebe (RGT) wandeln wie Kugelgewindetriebe eine Drehbewegung in eine Axialbewegung um. Alle Rollengewindetriebe bestehen im Wesentlichen aus einer gewindeprofilierten Spindel, einer gewindeprofilierten Mutter sowie gewinde- oder rillenprofilierten Planetenrollen, welche in Planetenträgern (Führungsscheiben) gelagert sind, ◘ Bild 2.85. Auch hier dienen die Planetenrollen unter anderem der Minimierung der Reibung in den Kontakten. Bei bestimmten Bauarten und Varianten der Rollengewindetriebe trägt die Planetengeometrie auch zur Gesamtsteigung des Systems bei. Wird ein Rollengewindetrieb über die Spindel angetrieben, so werden die Planetenrollen durch Reibung in den Kontaktpunkten in Drehung um die eigene Achse versetzt und vollführen gleichzeitig eine planetare Umlaufbewegung um die Spindel, welche durch die Planetenträger unterstützt wird. Durch das Zusammenspiel der Profilierungen der Spindel, der Mutter und der Planetenrollen sowie der planetaren Umlaufbewegung der Planetenrollen um die Spindel bewegt sich die Mutter entlang der Spindel.

Um stets den Punktkontakt der Flanken zu gewährleisten und das sogenannte Kantentragen zu vermeiden, sind die Gewindeflanken der Planeten ballig ausgeführt. Aufgrund der hohen Kontaktpunktanzahl sowie dem großen Krümmungsradius der Gewindeflanken ergeben sich gegenüber den Kugelgewindetrieben Vor- und Nachteile. Von Vorteil sind die deutlich höhere Tragfähigkeit, Steifigkeit sowie realisierbare Axialkraft aus einem gegebenen Antriebsmoment. Nachteilig sind der geringere Wirkungsgrad und die damit verbundene stärkere Erwärmung sowie in der Regel ein höherer Anschaffungspreis. Aufgrund der genannten Vorteile sind Rollengewindetriebe für Anwendungen im Schwerlastbereich sowie Präzisionsvorrichtungen besonders geeignet.

Analog zum Kugelgewindetrieb verfährt die Mutter relativ zur Spindel pro Antriebsumdrehung genau die Strecke, die der Gesamtsteigung P_{ges} des Rollengewindetriebs entspricht. Auch die erzeugbare Axialkraft lässt sich mit der Formel für Kugelgewindetriebe berechnen:

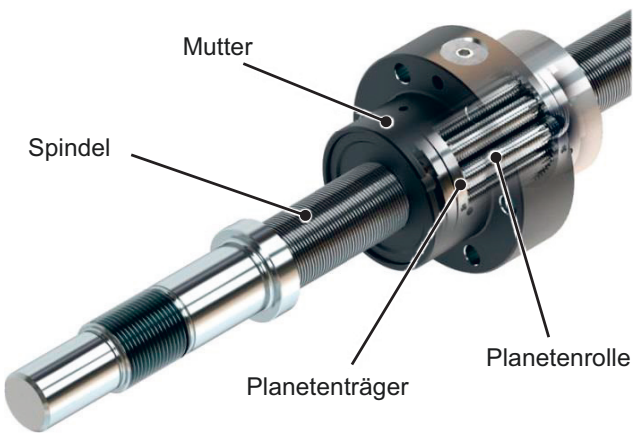
$$v_{ax} = n_{Antrieb} \cdot P_{ges} \tag{2.116}$$

$$F_{ax} = \frac{M_{Antrieb} \cdot 2\pi \cdot \eta_{PRG}}{P_{ges}} \tag{2.117}$$

Allgemein gilt, dass bei Rollengewindetrieben eine deutlich kleinere Gesamtsteigung als bei Kugelgewindetrieben gleicher Baugröße realisiert werden kann, womit mit Rollengewindetrieben eine höhere Kraftübersetzung möglich ist.

Die Gesamtsteigung P_{ges} entspricht allerdings nicht für jede Bauart und Variante der Rollengewindetriebe der Spindelsteigung wie es bei Kugelgewindetrieben der Fall ist. Auch der Wert der Spindelsteigung ist bei Rollengewindetrieben nicht immer beliebig wählbar, da Rollengewindetriebe ein komplexes Zusammenspiel der Einzelelemente aufweisen. Wie sich die Gesamtsteigung aus den geometrischen Parametern des Rollengewindetriebs zusammensetzt, hängt in erster Linie von der gewählten Bauart und Variante ab.

Rollengewindetriebe lassen sich in die Bauarten Planetenrollengewindetrieb, Rollengewindetrieb mit Rollenrückführung sowie Planetenwälzgewindespindel unterteilen. Diese Bauformen sind in Band 2, ► Kap. 6.6.5 detailliert beschrieben.



◘ **Bild 2.85** Aufbau eines Rollengewindetriebs. Quelle: Bosch Rexroth

Hydrostatische Spindel-Mutter-Systeme

Spindel-Mutter-Systeme dienen zur Umsetzung rotatorischer in translatorische Bewegungen. Außer hydrodynamischen Gleitgewindespindeln für untergeordnete Antriebseinheiten und Kugelgewindetriebe bei Vorschubantrieben werden speziell bei Großwerkzeugmaschinen, Räummaschinen und im Bereich der Präzisions- bzw. Ultrapräzisionsmaschinen hydrostatische Gewindespindeln eingesetzt. Hier dienen sie z. B. zur Bewegung der Schlitten. Der besondere Vorteil des hydrostatischen Gewindetriebs gegenüber einem Kugelgewindetrieb liegt in der höheren Dämpfung, der durch das Funktionsprinzip begründeten Spielfreiheit und der Verschleißfreiheit.

◘ Bild 2.86 verdeutlicht den Aufbau und die Gestalt eines hydrostatischen Gewindetriebs. Die dargestellte Schnittdarstellung (unteres Teilbild) zeigt das Prinzip eines hydrostatischen Gewindetriebs. Die Taschen sind in den Gewindeflanken der Mutter angebracht. Sie werden über Kapillaren, die hier ebenfalls im Inneren der Mutter untergebracht sind, mit Drucköl versorgt. Das Rücköl kann sowohl über die Gewindegänge als auch über Stichbohrungen in Grund und Kopf der Flanken abgeführt werden. Im dargestellten Funktionsprinzip sind die Lagertaschen beider Mutternhälften zur Vorspannung des Systems gegensinnig angeordnet. Das Ölversorgungssystem „gemeinsame Pumpe und Kapillaren" ist hier wegen der großen Anzahl

der Taschen, z. B. vier Taschen pro Flanke bei vier bis acht Gewindegängen, zweckmäßig.

Gewindespindellagerung

Als dritte wichtige Bauteilkomponente des Vorschubspindelantriebs ist neben Spindel und Mutter die Spindellagerung zu nennen. Diese hat die Aufgabe, die Spindel radial zu führen und gleichzeitig die Vorschubkräfte in Axialrichtung aufzunehmen, wobei Spindelverformungen und -verlagerungen in erlaubten Grenzen bleiben müssen. Deshalb stehen bei der Auswahl einer Lagerung für Kugelgewindespindeln die Anforderungen hinsichtlich großer axialer Tragfähigkeit, hoher Steifigkeit, Spielfreiheit, geringer Lagerreibung, hoher Drehzahl und hoher Laufgenauigkeit im Vordergrund. Je nach Einsatzfall kommt den einzelnen Kriterien noch besondere Bedeutung zu. So spielt bei Vorschubantrieben großer Fräsmaschinen mit hohen Zerspanungskräften die Steifigkeit des Lagers als Teil des Gesamtsystems eine große Rolle. Im Interesse der hohen Steifigkeit wird hier z. B. die Reibung der stark vorgespannten Lager im Verhältnis zu anderen Reibungsverlusten vernachlässigt. Demgegenüber dominiert dieser Faktor bei Vorschubantrieben von Schleifmaschinen, wo bei geringen bewegten Massen sehr hohe Positioniergenauigkeiten verlangt werden. Hier ist eine reibungsarme Lagerung gefordert.

Damit die Kugelgewindetriebe die hohen Positioniergenauigkeiten erreichen, müssen die Lagerungen insbesondere eine große axiale Steifigkeit über dem gesamten Verfahrweg aufweisen. Bei der herkömmlichen Lagerung mit einem Festlager und einem Loslager nimmt die Steifigkeit der Anordnung mit der Entfernung des Schlittens vom Festlager hyperbolisch ab. Führt man die zweite Lagerstelle ebenfalls als Festlager aus, so lässt sich eine spiegelbildlich verlaufende Steifigkeitskurve superponieren, sodass eine symmetrische Kurve entsteht.

In Bild 2.87 ist die untere Lageranordnung mit einem Festlager und einem Loslager ausgeführt, die obere Lageranordnung mit zwei Festlagern. Es ist zu erkennen, dass die Gesamtsteifigkeit bei zwei Axiallagern wesentlich vergrößert wird und in der Spindelmitte über einen größeren Bereich annähernd konstant ist.

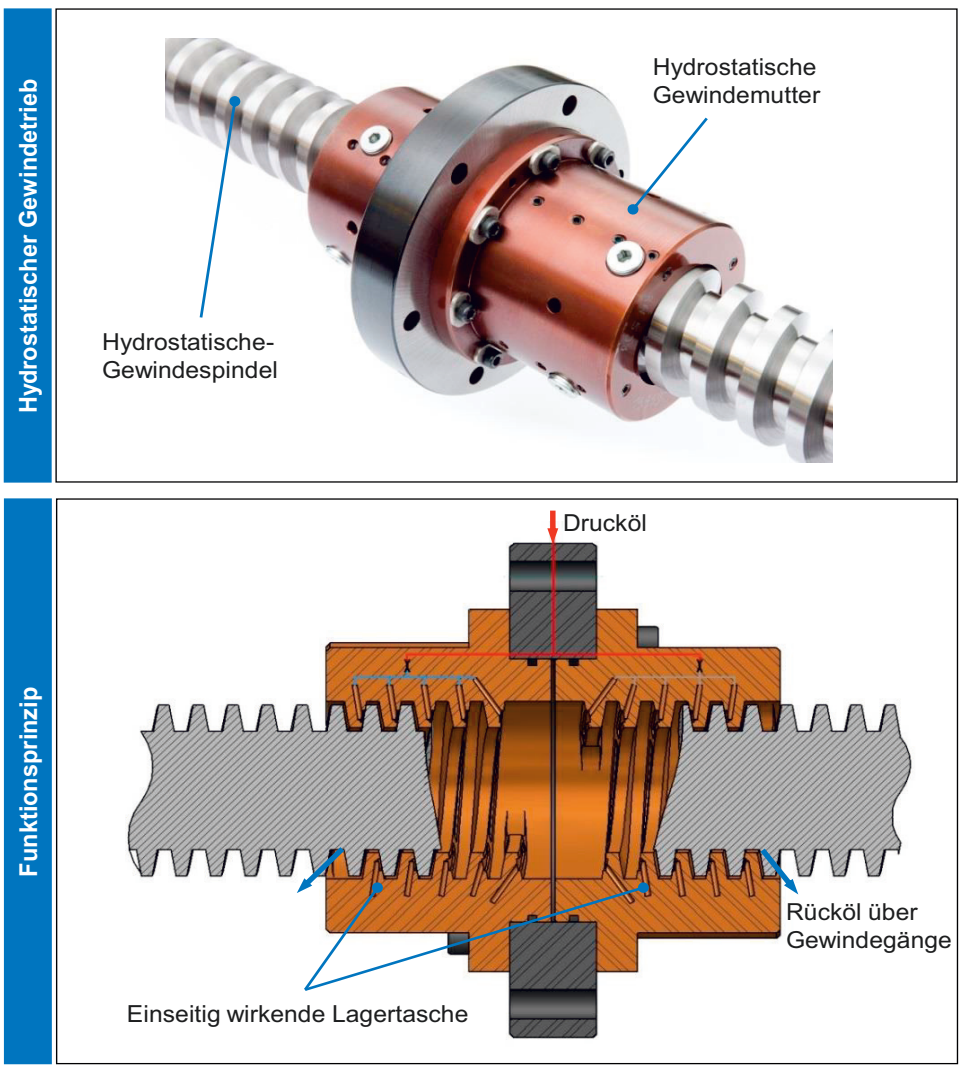


Bild 2.86 Prinzip eines hydrostatischen Gewindetriebs. Nach ZOLLERN

Das Verfahren des Vorschubschlittens bewirkt aufgrund der Reibung zwischen Spindel und Spindelmutter eine Erwärmung der Spindel, die eine Spindelausdehnung zur Folge hat. Bei doppelseitig eingespannter Spindel führt dies zu zusätzlichen Druckkräften, die eine Stauchung der Spindel verursachen. Spindeln, die aufgrund hoher Reibbelastung im Dauerbetrieb einer starken Erwärmung unterliegen, werden deshalb in kaltem Zustand auf Zug vorgespannt. Bei Wärmedehnung wird dann zunächst die Vorspannung der Spindel abgebaut. Erst bei weiterer Erwärmung können axiale Druckkräfte entstehen, die dann jedoch – bei richtiger Wahl der Vorspannung – erträglich sind.

Folgende Konstruktionsregeln sind bei der Auslegung von steifen Gewindespindellagerungen zu beachten:

- Nadel- und Rollenlager sind wegen der Linienberührung und somit wegen höherer Steifigkeit Kugellagern vorzuziehen.
- Lagerringe und Zwischenringe sollen möglichst vermieden werden, da die Kontaktflächen die Steifigkeit verringern.
- Passungs- und Distanzflächen sollen geschliffen werden. Hohe Rauhigkeit bedingt einen geringen Traganteil und führt zu einer Steifigkeitsverminderung. Parallele Anlageflächen vermeiden ein Verkanten des Lagers.
- Das Vorspannen der Axiallager ist unbedingt erforderlich.
- Es sind steife Verbindungen zwischen trennbaren Flächen anzustreben. Hier ist insbesondere auch auf eine Gestaltung von steifen Schraubenverbindungen zu achten.
- Insgesamt ist die konstruktive und fertigungstechnische Gestaltung der Lagerumbauteile sehr sorgfältig auszuführen.

Bild 2.88 zeigt ein Einbaubeispiel für ein kombiniertes Radial-Axial-Rollenlager. Die Vorspannung des Axiallagers kann man durch geeignete Wahl der Distanzbuchsenlänge erzielen.

Einbaubeispiele für Gewindespindellagerungen mit Axial-Schrägkugellagern sind in Bild 2.89 dargestellt. Für mittlere Steifigkeitsanforderungen ist eine Fest-Loslagerung wie in Bild 2.89 oben üblich. Für Vorschubantriebe mit hohen Steifigkeitsanforderungen empfiehlt sich ein Einbau nach Bild 2.89 unten. Die Spindel ist durch die beiden Schrägkugellager an beiden Enden in doppelter O-Anordnung auf Zug vorgespannt. Ein jeweils dagegengesetztes Schrägkugellager übernimmt die Kraftübertragung in das Gestell, wenn durch Erwärmung der Spindel und deren hierdurch erzeugte Ausdehnung die Zugvorspannung in eine Druckspannung übergeht. Neben den bereits genannten Lagerungsformen sind bei geringeren Steifigkeitsanforderungen und kurzen Spindellängen auch einseitig gelagerte Gewindespindeln mit freien Enden üblich.

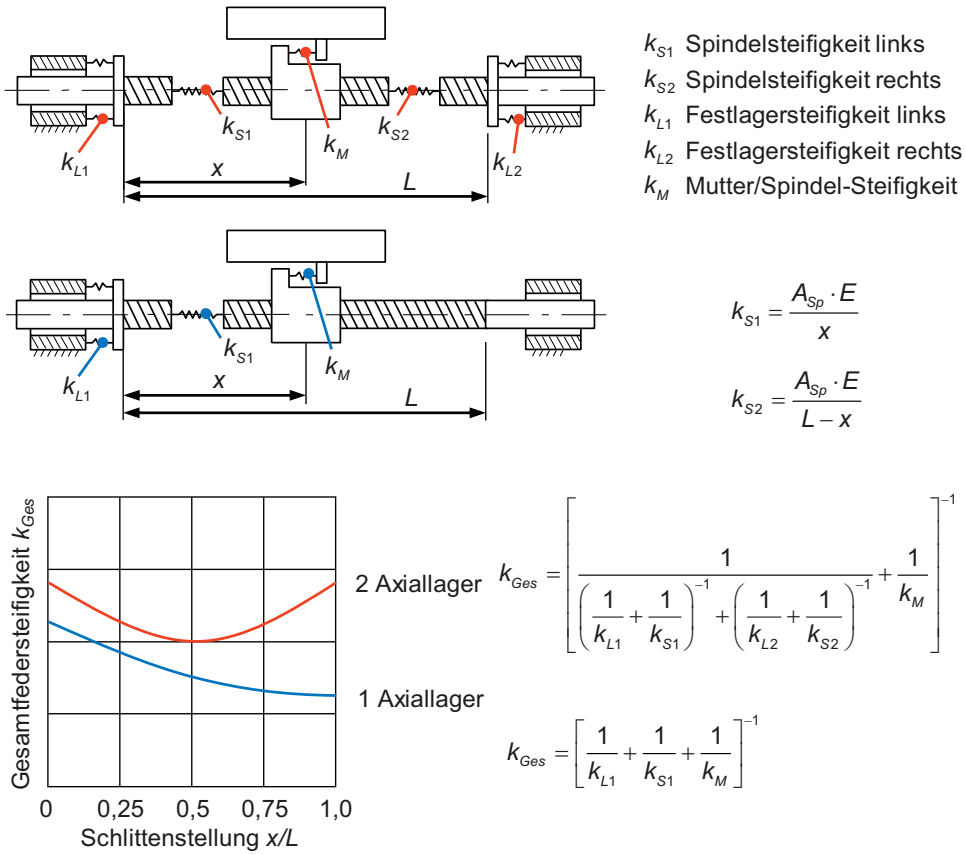


Bild 2.87 Steifigkeitsverhalten eines Spindelantriebs mit einseitigem und doppelseitigem Axialfestlager

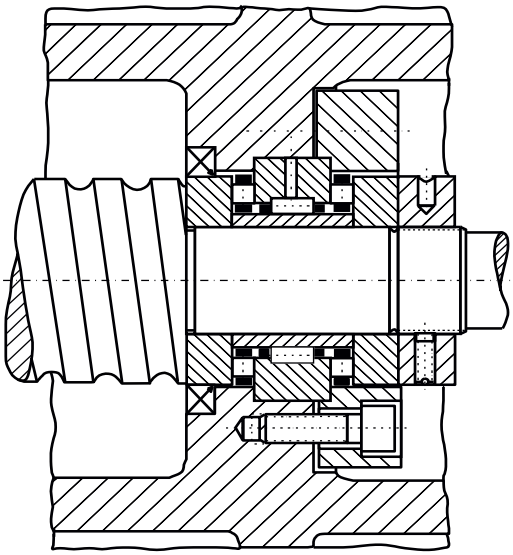


Bild 2.88 Einbaubeispiel für ein kombiniertes Radial-Axial-Rollenlager für Gewindespindeln

Um Kugelgewindetriebe auch bei großen Verfahrwegen einsetzen zu können und dabei hohe Steifigkeiten zu realisieren, kommen Spindelmutterantriebe mit stehender Kugelrollspindel zum Einsatz, Bild 2.90. Während bei herkömmlichen Systemen die Kugelrollspindel angetrieben wird, rotiert in diesem Beispiel die Spindelmutter, welche über einen mitfahrenden Motor über Zahnriemen angetrieben wird.

Auf diese Weise können Spindeln mit großem Durchmesser verwendet werden, und die Vorspannung der Spindel mittels Tellerfedern und/oder Spannelementen ist sehr leicht möglich. In Bild 2.90 sind zusätzlich Spindelabstützungen erkennbar, die auch bei großen Spindellängen ein Schwingen der Spindel mit der Biegeeigenfrequenz verhindern. Hierbei werden die auf Führungsschienen verfahrbaren Spindelabstützungen von der Spindelmutter verschoben, sodass die Spindelabstützungen in dem Verfahrbereich der Spindelmutter von der Endlage auf einer Seite bis zum Erreichen der gegenüberliegenden Spindelabstützung nicht bewegt werden. Ähnlich den Motorspindeln bei Hauptantrieben werden auch für dieses System Lösungen angestrebt, die eine Integration des Motors und der Spindelmutter darstellen.

2.4.1.2 Ritzel-Zahnstange-Antrieb

Für große Verfahrwege empfiehlt sich der Einsatz eines Ritzel-Zahnstange-Antriebs. Durch Zusammensetzen von Zahnstangensegmenten können beliebig lange Vorschubwege realisiert werden. Die resultierende Gesamtsteifigkeit des Ritzel-Zahnstange-Antriebs ist dabei immer unabhängig von der Verfahrweglänge. Sie setzt sich im Wesentlichen aus den Anteilen der Torsionssteifigkeiten von Vorgelegegetriebe und Ritzelwelle sowie der Kontaktsteifigkeit der Ritzel-Zahnstangen-Paarung zusammen.

Die Leistungsübertragung am Ritzel ist durch niedrige Drehzahlen und hohe Drehmomente gekennzeichnet. Dies

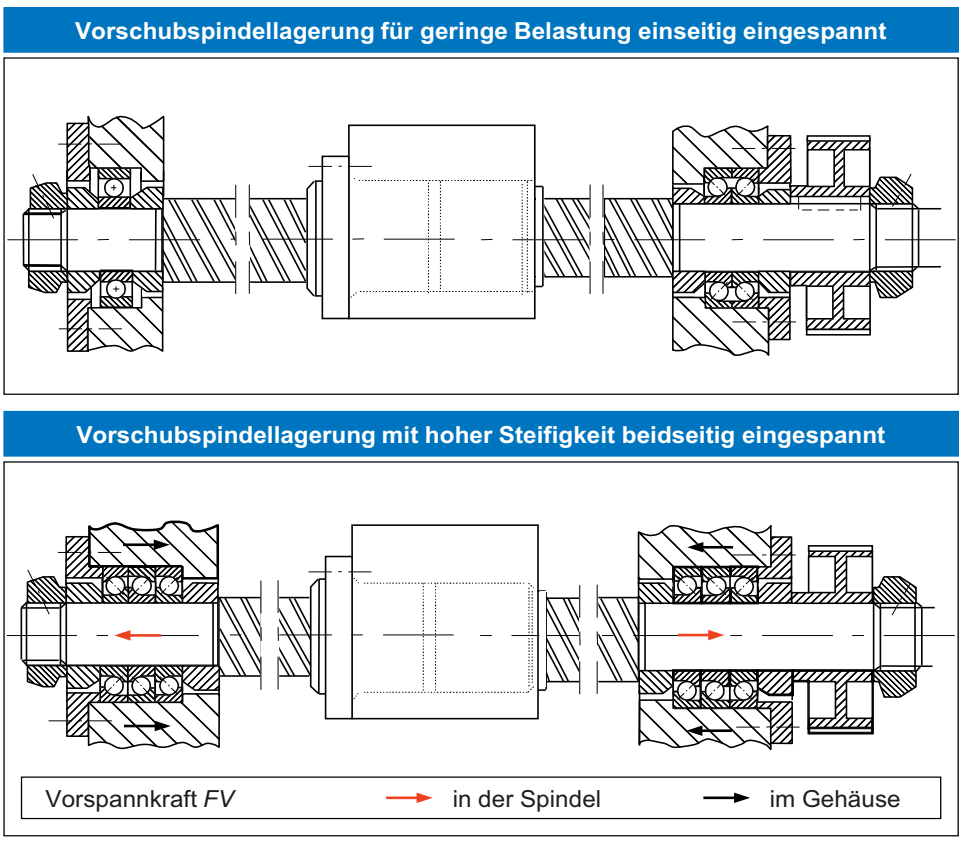


Bild 2.89 Lagerungsbeispiele für Kugelgewindespindeln mit Axial-Schrägkugellagern. Nach SKF

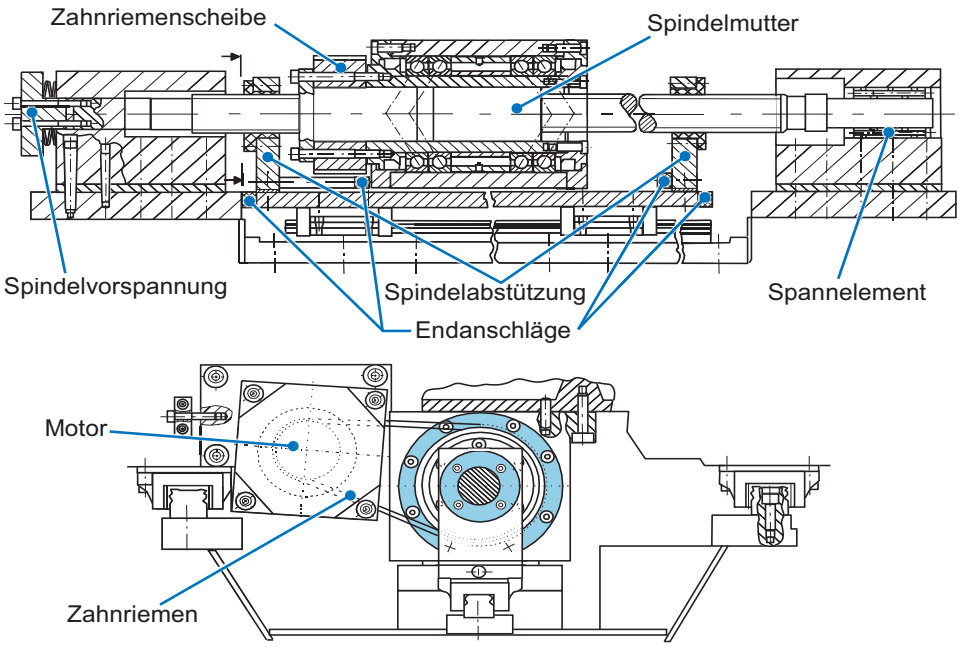


Bild 2.90 Spindelantrieb mit stehender Kugelrollspindel und Spindelabstützungen. Nach CHIRON Werke

erfordert zusätzliche Getriebestufen. Der gesamte Antriebsstrang sollte torsionssteif und spielfrei ausgeführt sein. Eine spielfreie Vorschubübertragung zwischen Ritzel und Zahnstange in beide Bewegungsrichtungen lässt sich durch die Teilung des Ritzels erreichen. Bei dem in Bild 2.91 dargestellten Vorschubantrieb wird das Spiel zwischen Ritzel und Zahnstange dadurch eliminiert, dass zwei schrägverzahnte Ritzel mit einer Zahnstange kämmen. Das untere Ritzel wird durch Federkraft auf einem Vielkeilwellenabsatz axial verschoben. Hierdurch kommen beide Ritzel an je einer gegenüberliegenden Flanke der Zahnstange zur Anlage. Dabei werden auch Verzahnungsfehler ausgeglichen.

Eine weitere Möglichkeit zur spielfreien Realisierung von Ritzel-Zahnstangen-Antrieben ist die elektrische Verspannung mit zwei Motoren. Beide Motoren treiben dabei jeweils ein Ritzel an. Das geforderte Gesamtmoment M_{Soll} wird nicht in gleichen Teilen von den Motoren aufgebracht, sondern die Momentlinien der Motoren werden so verschoben, dass bei gefordertem Nullmoment ($M_{Soll} = 0$) die

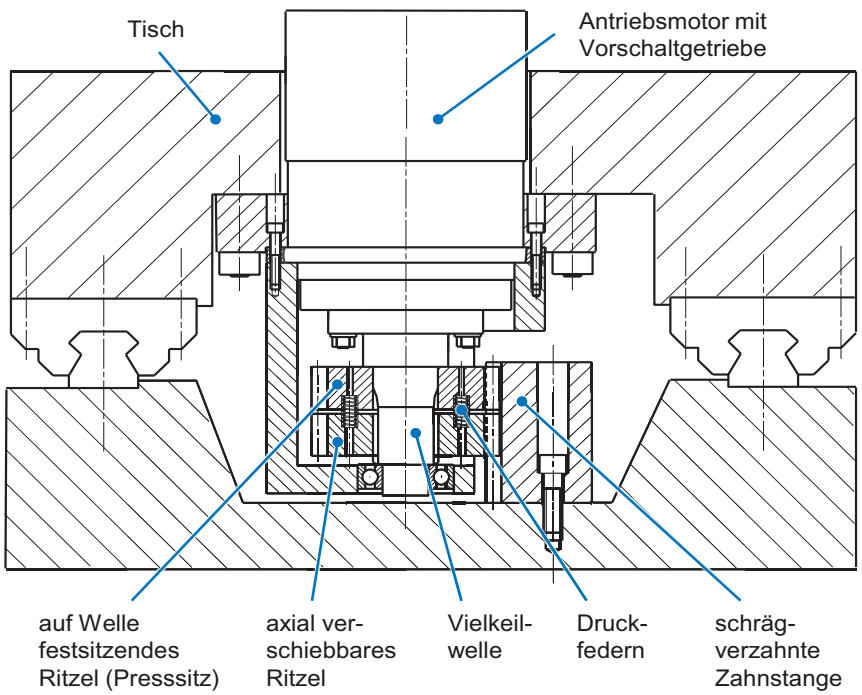


Bild 2.91 Spielfreies Ritzel-Zahnstange-System mit geteiltem Ritzel

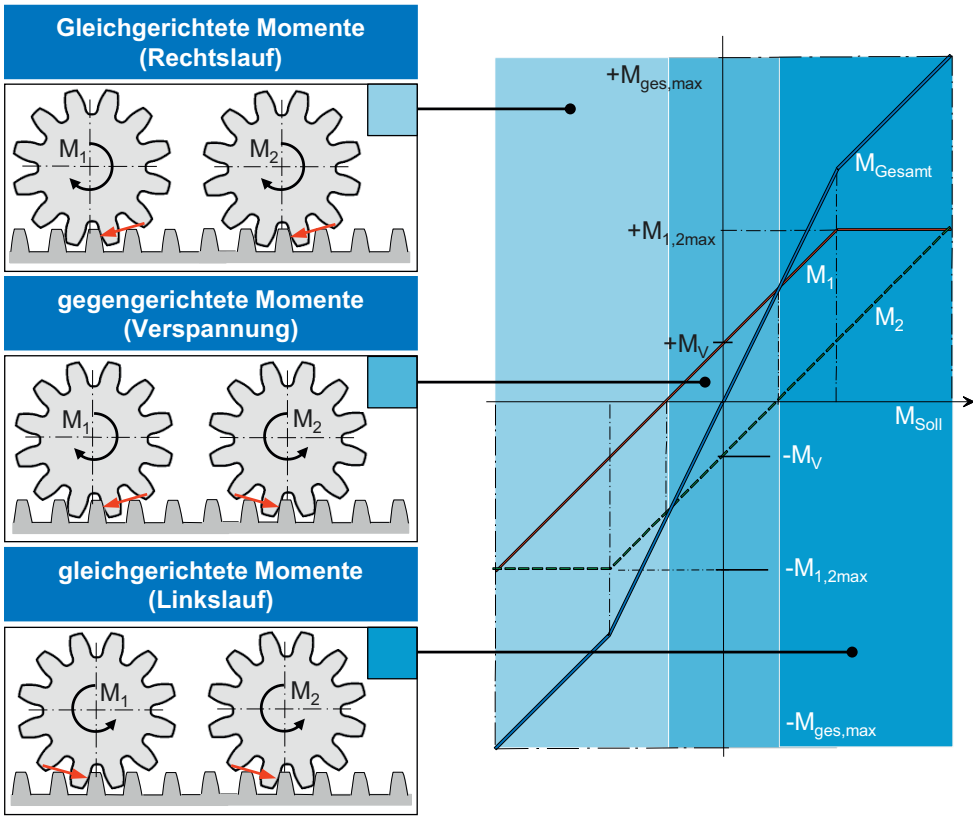


Bild 2.92 Spielfreies Ritzel-Zahnstange-System mit elektrischer Verspannung

Motoren mit dem Verspannmoment M_V entgegengerichtet arbeiten. Bild 2.92 zeigt die Verspannkennlinien. Die Ritzel kommen beim Momentennulldurchgang an gegenüberliegenden Zahnstangenflanken zur Anlage. Das Spiel wird eliminiert. Bei höheren Momenten wirken die Motoren gleichsinnig.

2.4.1.3 Schnecke-Zahnstange-Antrieb

Zur Vermeidung mehrstufiger Getriebe – wie bei einem Zahnstange-Ritzel-System erforderlich – werden bei langen Verfahrwegen häufig auch hydrostatische Zahnstange-Schnecken-Systeme (Johnson-Drive) eingesetzt. Typische Anwendungen der Zahnstange-Schnecke-Systeme sind Tisch- oder Supportantriebe für Großwerkzeugmaschinen (z. B. Portalfräsmaschinen). Vorteile des Systems sind die geringe Reibung und die hohe Steifigkeit. Bild 2.93 verdeutlicht die Funktionsweise. Die Zahnstange ist mit Drucköltaschen versehen. Die Ölversorgung erfolgt durch Hohlkolben, die auf die Zuleitungen der Öltaschen gepresst werden. Die Öltaschen der an dem Schlitten befestigten Zahnstange werden im Bereich der Schnecke über die Hohlkolben mit Druck beaufschlagt. Die Hohlkolben werden dabei durch den Staudruck, der an dem im Hohlkolben integrierten Vorwiderstand entsteht, an die Zahnstange gepresst. Das Leck- und Rücköl fließt frei über die Schnecke in eine Sammelrinne ab. Der Antrieb der Schnecke geschieht über eine Verzahnung im Schneckenaußenzylinder und ein Zwischenrad. Das Zwischenrad greift unmittelbar in das Ritzel des Vorschubmotors ein. Die Schnecke ist axial hydrostatisch und radial in Nadeln gelagert.

Zur Erzeugung von rotatorischen Vorschubbewegungen in Werkzeugmaschinen werden vielfach Schnecken/Schneckenrad-Getriebe eingesetzt. Bild 2.94 zeigt den Tischantrieb einer Wälzfräsmaschine in Doppelschneckentriebausführung. Über eine hydraulisch axial anstellbare Schnecke wird die Vorspannung aufgebracht und das Spiel eliminiert.

2.4.1.4 Zahnriemen-Antriebe

Zahnriemen-Antriebe werden wie Ritzel-Zahnstange-Antriebe für große Verfahrwege eingesetzt. Hierbei dient der Zahnriemen als Übertragungselement zwischen Zahnstange und Ritzel, Bild 2.95. Die Umsetzung der Drehbewegung in eine Linear- bzw. Rotationsbewegung erfolgt über den Zahnriemen, der örtlich feststeht und nur an der Ritzelstelle aus der Zahnstange herausgehoben wird. Mit dem antreibenden Zahnritzel bildet der Riemen einen Umschlingungstrieb. Der Zahnriemen wird nach einem kurzen freilaufenden Trum über Umlenkrollen in die Zahnstange gedrückt, wodurch Formschluss hergestellt wird.

Der Vorteil gegenüber einer konventionellen Zahnstangen-Ritzel-Lösung besteht in den preiswerten, käuflichen Elementen und der Spielfreiheit des Antriebes, die durch das Einpressen der elastischen Riemenzähne in Zahnstange und

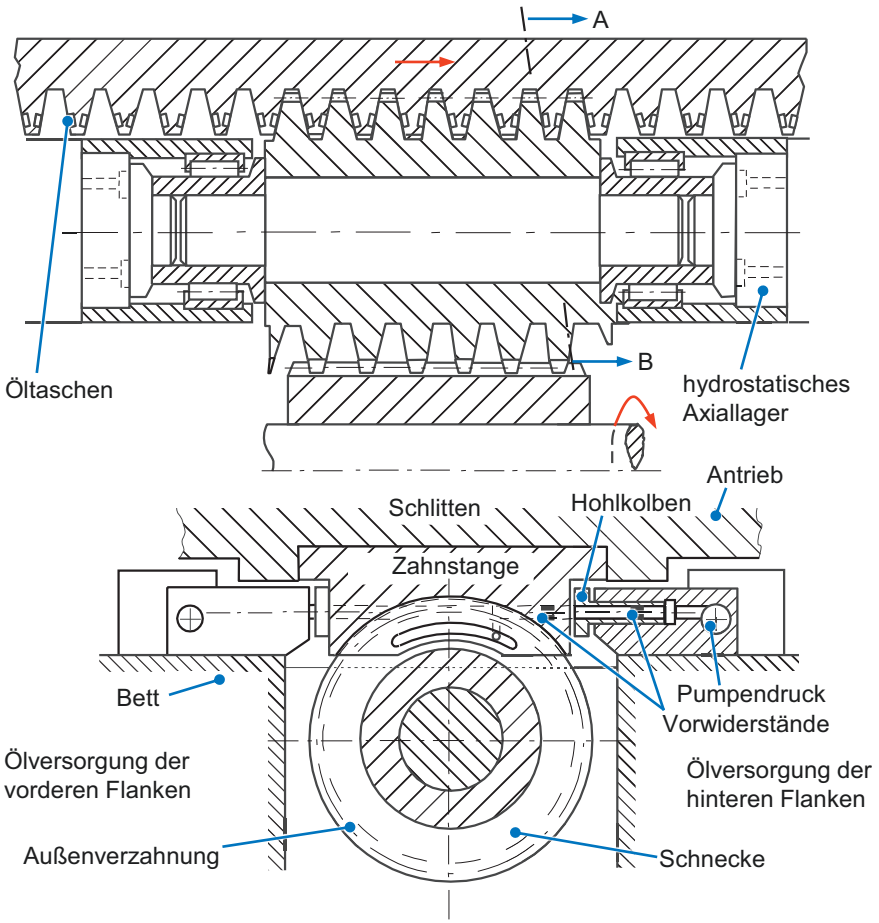


Bild 2.93 Vorschubantrieb mit hydrostatischem Zahnstange-Schnecken-System Johnson-Drive. Nach Waldrich Siegen

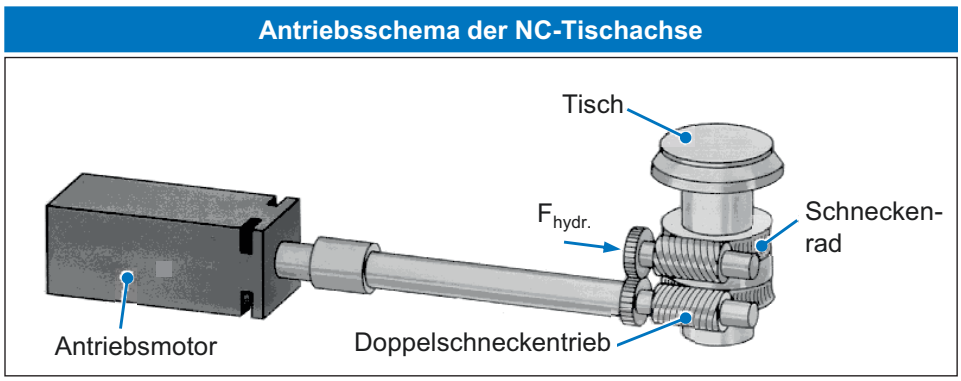


Bild 2.94 Tischantrieb einer Wälzfräsmaschine mit hydraulisch vorgespanntem Doppelschneckenantrieb. Quelle: Gleason-Pfauter Maschinenfabrik

Ritzel entsteht. Ein ausgeführtes Beispiel für die Verwendung eines solchen Antriebes ist in Bild 2.96 dargestellt. Der mit dem Tisch mitfahrende Motor treibt ein Zahnritzel an, das sich auf dem Zahnriemen abwälzt, welcher durch zwei Umlenkrollen vorgespannt ist und in die feststehende Zahnstange gedrückt wird. Eine der kugelgelagerten Umlenkrollen ist verschiebbar angeordnet, sodass die Vorspannung eingestellt werden kann.

2.4.1.5 Kettenantrieb

Kettentriebe übernehmen heutzutage aufgrund ihrer Vorteile wie z. B. der schlupffreien Leistungsübertragung, der konstanten Übersetzung und der Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Schmutz in Produktionsmaschinen vielfältige Aufgaben. Da die Wahl der verwendeten Kette anwendungsspezifisch ist, haben sich verschiedene Bauformen von Ketten entwickelt. Der meistgenutzte Kettentyp ist die in Bild 2.97 dargestellte Rollenkette.

Die sich auf den Buchsen bewegenden Rollen rollen mit geringer Reibung an den Zahnflanken des Zahnrades ab, sodass immer wieder eine andere Stelle des Umfangs einer Rolle zum Tragen kommt. Zwischen Rollen und Buchsen trägt ein Fettpolster zur Geräusch- und Stoßdämpfung bei.

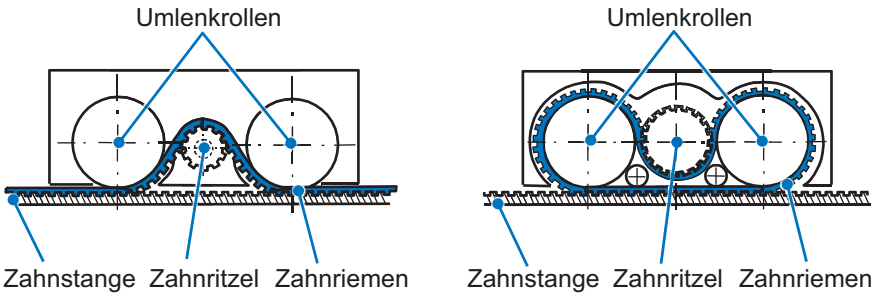


Bild 2.95 Funktionsprinzip von Zahnriementrieben mit stützender Zahnriemenstange. Nach Zarian

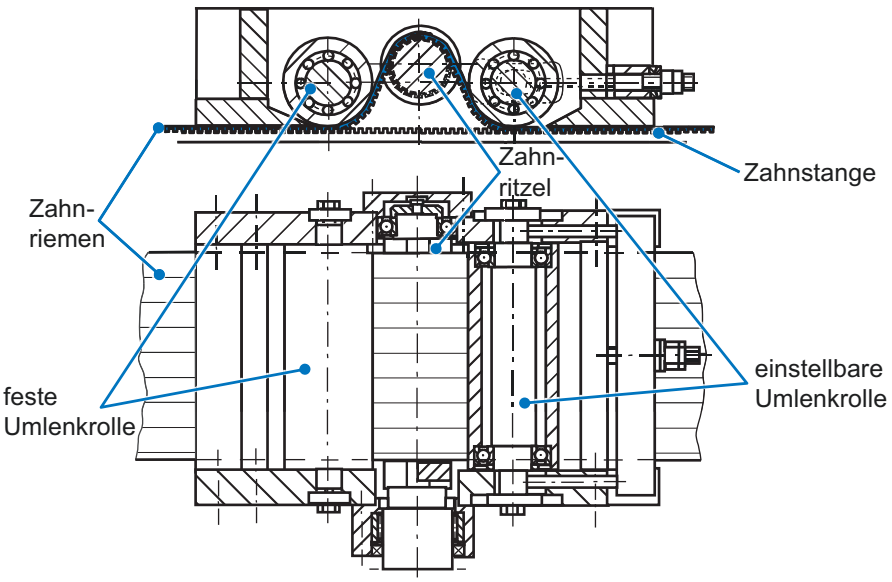


Bild 2.96 Zahnriemen-Linearantrieb mit stehenden Zahnriemen. Nach CHIRON Werke

Gezogen werden die Kettenelemente von Zahnrädern, die aus Vielecken (Polygon) bestehen, deren Eckenanzahl somit der Zähnezahl des Zahnrades entsprechen. Im Gegensatz zu anderen Getriebearten ist es mit Kettengetrieben möglich, größere Achsabstände einfach zu überbrücken. Nachteile von Ketten sind insbesondere der Polygoneffekt, der eine schwankende Kettengeschwindigkeit verursacht, sowie die Schwingungsanfälligkeit und der Wartungsaufwand.

Wie in Bild 2.98 dargestellt ist, legt sich die Kette als Vieleck um das Kettenzahnrad. Die Kettenkraft sowie die Kettengeschwindigkeit schwanken dabei durch den sich über dem Drehwinkel ändernden Abrollradius. Dies hat zur Folge, dass bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit v_u des treibenden Zahnrades die Kettengeschwindigkeit v_K periodischen Schwankungen zwischen den Grenzwerten $v_{K,\min}$ und $v_{K,\max}$ liegt. Die Grenzwerte berechnen sich dabei wie folgt:

$$v_{K,\min} = v_u \cdot \cos\frac{\tau}{2} \tag{2.118}$$

$$v_{K,\max} = v_u \tag{2.119}$$

Die abwechselnde Beschleunigung und Verzögerung der Kette führt zu erhöhten Belastungen der Kette. Zudem

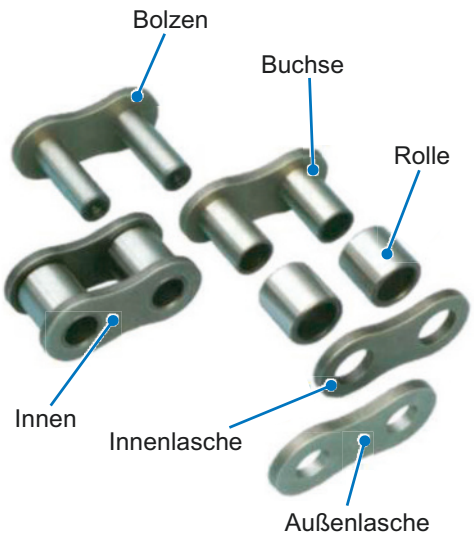


Bild 2.97 Elemente des Kettengliedes einer Einfach-Rollenkette

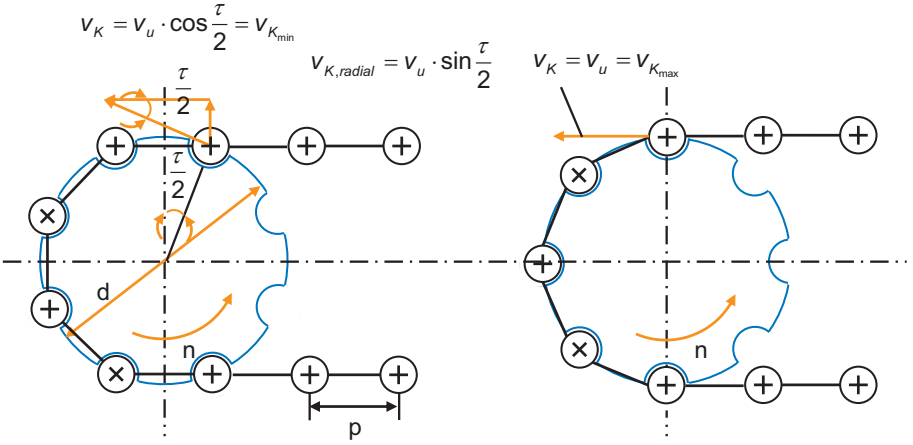


Bild 2.98 Polygoneffekt beim Kettengetriebe

werden die Kettenglieder beim Auf- und Ablaufen am Kettenrad gegeneinander verdreht. Das verursacht Reibung und Verschleiß in den Gelenken und führt zur Längung der Kette. Außerdem werden die Kettenelemente und Kettenräder beim Auflaufen der Kette auf das Kettenrad stoßartig belastet. Dieser als Polygoneffekt bezeichnete Einfluss ist in Bild 2.98 dargestellt.

2.4.2 Vorschubgetriebe

Neben den im vorherigen Abschnitt vorgestellten Getrieben zur Umwandlung einer Drehbewegung in eine translatorische Schlitten- oder Tischbewegung werden in Vorschubantrieben oft zusätzliche Vorschubgetriebe zwischen Motor und Spindel bzw. Ritzelwelle eingesetzt. Diese sind vielfach für die Übersetzung der hohen Motordrehzahlen auf eine für den Vorschubantrieb geeignete Drehzahl sowie zur Drehmomentanpassung erforderlich. Darüber hinaus bieten sie die Vorteile einer weiteren Reduzierung der Massenträgheitsmomente auf die Motorwelle. Vorschubgetriebe sollten torsionssteif, trägheitsarm und verdrehspielfrei ausgeführt sein.

2.4.2.1 Zahnradgetriebe

Zahnradgetriebe für Vorschubantriebe werden üblicherweise als Stirnrad- und bei höheren Untersetzungen auch als Planetengetriebe ausgeführt. Aus räumlichen Restriktionen ist in manchen Fällen die winkelige Anordnung des Vorschubmotors zum anzutreibenden Ritzel bzw. zur Spindel sinnvoll. Hierfür werden Winkelgetriebe mit Kegelradpaarung verwendet. Vorschubgetriebe werden heute häufig als Vorschaltgetriebe ausgeführt. Dabei ist die direkte Verbindung des Getriebes mit dem Motor bei gemeinsamer Aufstellung realisiert. Vorteilhaft bei Vorschaltgetrieben ist das Wegfallen sonst eventuell notwendiger Ausgleichselemente für Wellenversatz (Ausgleichskupplung).

Das Trägheitsmoment von Vorschubgetrieben sollte für gutes Beschleunigungsvermögen des Gesamtantriebes möglichst klein sein. Aus diesem Grund sollten Getrieberäder einen kleinen Durchmesser besitzen, da dieser mit der vierten Potenz in das Massenträgheitsmoment eingeht. Dies bedingt, dass oft mehrstufige Zahnradgetriebe statt eines einstufigen verwendet werden müssen. Um hierbei die zwingend erforderliche Spielfreiheit zu realisieren, ist meist hoher konstruktiver Aufwand die Folge.

Eine Lösungsalternative stellt das tangentiale Verspannen von zwei auf einer Welle verdrehbar gelagerten Zahnrädern dar, die mit einem Gegenrad von der Breite der beiden Zahnräder kämmen. Diese Variante hilft meist, den konstruktiven und fertigungstechnischen Aufwand zu reduzieren.

Bei dem im Bild 2.99 dargestellten Vorschubgetriebe ist für jede der beiden Stufen das tangentiale Verspannen konstruktiv durch ein Zahnrad mit einem angeflanschten, verdrehbaren Zahnradring gelöst. Zusätzlich sind weitere steifigkeitsverbessernde Maßnahmen zu erkennen, wie Kegelsitze (Ölpressverband) der Zahnräder auf den Wellen, Schrumpfsitze zwischen Motorwelle und Ritzel (Ölpressverband), Lagerung der Wellen mit verspannten Schrägkugellagern und Lagerung der Gewindespindel mit steifen, vorgespannten Axial-Rollenlagern.

Eine weitere Möglichkeit, Vorschubgetriebe ohne Radteilung spielfrei zu verwirklichen (d. h. kleinere Radbreite, kleineres Massenträgheitsmoment), besteht darin, die Zahnradwellen in justierbaren Exzenterbuchsen zu lagern. Durch Verdrehen der Exzenterbuchsen kann man den Achsabstand verändern, um das Zahnflankenspiel zu eliminieren.

Bild 2.100 zeigt am Beispiel eines Planetengetriebes das Prinzip der Spieleinstellung über konisch, d. h. mit in Zahnlückenrichtung kontinuierlicher Profilverschiebung geschliffene Zahnräder. Durch axiales Hineinschieben der Planetenräder in das Sonnenrad wird das Spiel eliminiert. Durch zusätzliches Verschieben des Hohlrades wird auch diese Zahnradpaarung spielfrei einstellbar. Im Gegensatz zu den meisten anderen Möglichkeiten, Vorschubgetriebe spielfrei zu gestalten, zeichnet sich diese Lösung dadurch aus, dass das Getriebe in beide Richtungen mit gleichen Kräften und

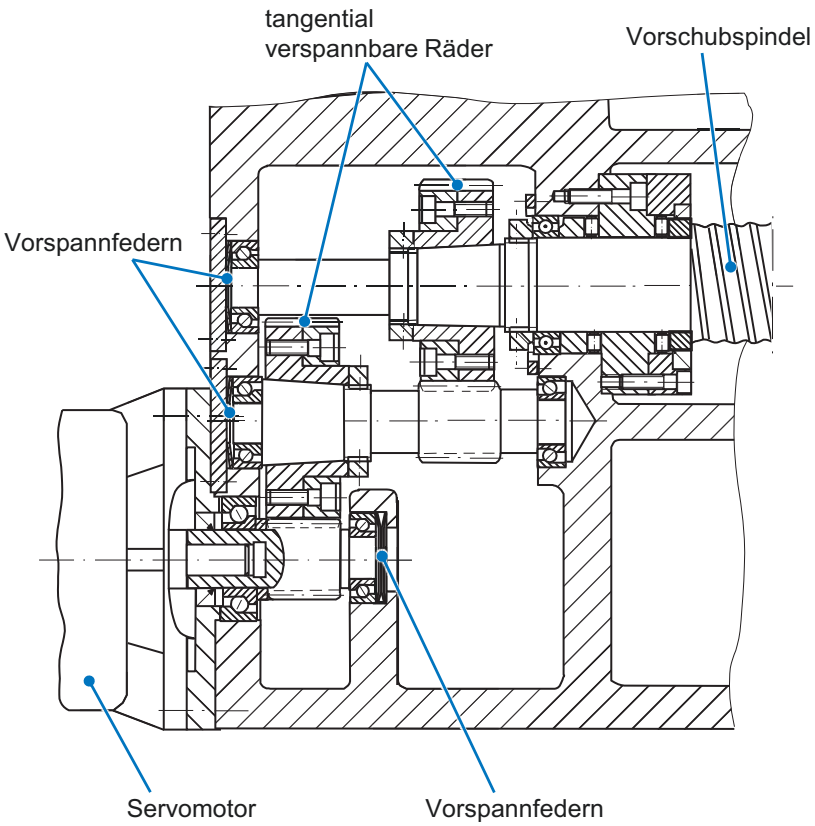


Bild 2.99 Spielfreies Stirnradgetriebe für Vorschubspindeln

Drehfrequenzen belastbar ist und keine Zwischenräder notwendig sind.

Nachteilig ist der höhere Fertigungsaufwand gegenüber der Produktion konventioneller Zahnräder, da bei der Herstellung der Verzahnung keine Einspannungen der Räder in Paketen möglich ist [WITT88].

2.4.2.2 Zahnriementriebe

Aufgrund der vorgenannten Nachteile werden heute anstelle von Zahnradgetrieben vielfach Zahnriemengetriebe als Vorschubgetriebe eingesetzt, wenn aus konstruktiven Gründen nicht auf eine zusätzliche Getriebestufe verzichtet werden kann, Bild 2.101. Das Zahnriemengetriebe erfüllt die an in NC-Werkzeugmaschinen eingesetzten Vorschubgetriebe gestellten Forderungen hinsichtlich Steifigkeit, Spielfreiheit und Genauigkeit in besonders kostengünstiger Weise. Durch Zugstränge aus Glasfasern, Kevlarfasern oder Stahlseilen wird eine große Zugfestigkeit, eine gute Nachgiebigkeit und eine geringe Dehnung erreicht.

Zur Erhöhung der Steifigkeit und zur Vermeidung von Spiel wird der Zahnriemen vorgespannt. Dies kann auf einfache Weise entweder durch eine radiale Verschiebbarkeit des Antriebsmotors oder durch Spannrollen erfolgen. Die Spannrollen drücken dabei auf die Außenseite des Riemens

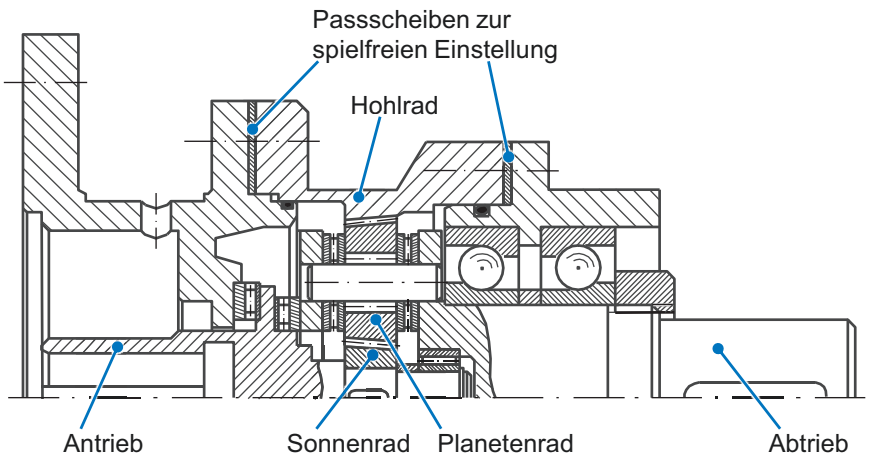


Bild 2.100 Planetengetriebe mit Spieleinstellung über konisch geschliffene Zahnräder. Nach Wittenstein alpha

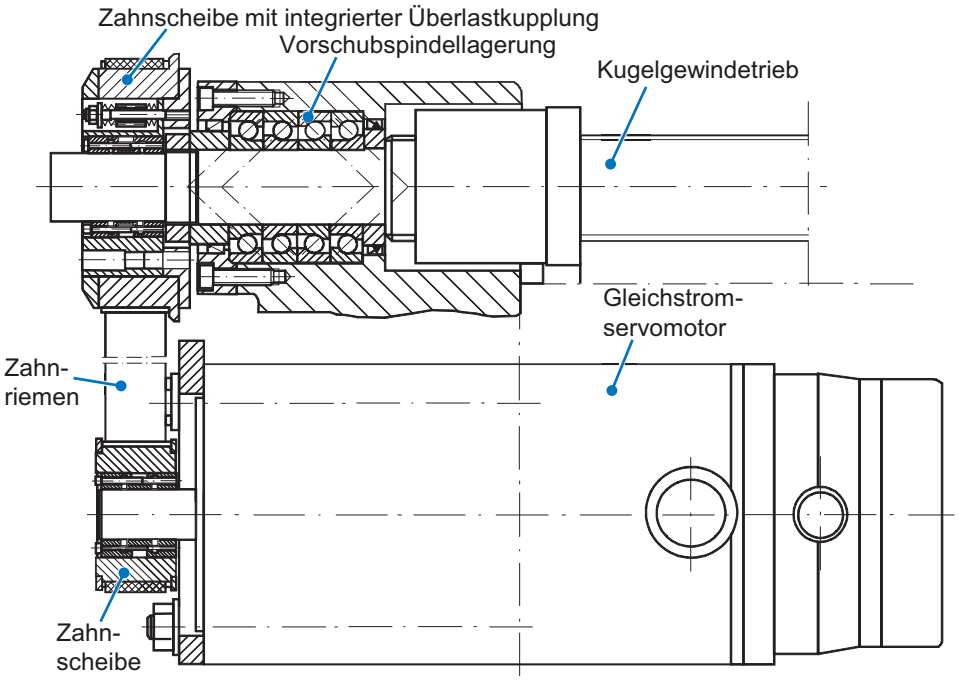


Bild 2.101 Vorschubantrieb einer Bettfräsmaschine mit integriertem Zahnriemengetriebe. Nach DMG MORI

und sollten nicht federnd gelagert werden. Zudem dämpfen sie insbesondere bei größeren freien Riemenlängen die auftretenden Trumschwingungen und führen zu einem größeren Umschlingungswinkel, sodass ein größeres Moment übertragbar wird. Darüber hinaus bewirkt eine Vorspannung auch den Ausgleich der Fertigungstoleranzen in der Zahnriemenlänge.

Zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens werden die Zahnriemenscheiben aus Aluminium gefertigt. Die hohe Materialdämpfung des Zahnriemenwerkstoffes bewirkt eine schwingungsarme Übertragung der Motorstellbewegung.

Ferner bietet das Zahnriemengetriebe aufgrund des größeren Achsabstandes wesentlich günstigere konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten für den Einbau des Motors. Dies führt zu Vorschubantriebskonzepten mit kleinem Einbauraum und damit kleinen Maschinenabmessungen.

2.4.2.3 Sondervorschubgetriebe

Für hohe Übersetzungen werden neben mehrstufigen Zahnradgetrieben mit Stirnrädern und Planetengetrieben häufig Sondervorschubgetriebe der Bauweisen *Harmonic Drive* und *Cyclo* eingesetzt. Sie erfüllen die Forderung, eine hohe Übersetzung in einer Getriebestufe bei kompaktem Bauraum, geringer Masse und geringem Trägheitsmoment bei zugleich großer Steifigkeit und koaxialem An- und Abtrieb zu erreichen. Nachteilig ist der gegenüber konventionellen Zahnradgetrieben niedrigere Wirkungsgrad.

Anwendung finden diese hochübersetzenden Kompaktgetriebe als Zwischengetriebe in Vorschubantrieben oder zum Antrieb von Drehtischen, Werkzeugmagazinen und Werkzeugwechslern. Darüber hinaus stellen die Kompaktgetriebe eine wesentliche Komponente in Gelenkantrieben von Robotern dar. Hier spielen die Kriterien große Übersetzung bei kleinstem Bauraum, Koaxialität, hohe Dynamik, geringes Spiel, hohe Verdrehsteifigkeit und hohe Überlastbarkeit zur Realisierung hochdynamischer, extrem spielarmer Antriebe mit hoher Positionier- und Wiederholgenauigkeit eine besondere Rolle.

Harmonic-Drive

In Bild 2.102 ist das Funktionsprinzip eines koaxialen Vorschubgetriebes (Harmonic Drive) dargestellt [LAGE13]. Ein starrer zylindrischer Ring (Circular Spline) mit Innenverzahnung ist stationär mit dem Gehäuse verbunden. In diesem starren Ring befindet sich eine elastische, topfförmige Stahlbuchse (Flexspline) mit einer Außenverzahnung, die meist zwei Zähne weniger als die Innenverzahnung hat. Der außenverzahnte Flexspline wird durch eine elliptische, mit dem Antrieb verbundene Scheibe mit aufgezogenem Kugellager (Wave Generator) verformt und rotatorisch umlaufend an zwei gegenüberliegenden Stellen im Bereich der großen Achse in die Innenverzahnung des Circular Splines gedrückt.

Infolge der unterschiedlichen Zähnezahl (Flexspline hat zwei Zähne weniger) entsteht zwischen dem stationären Ring und der flexiblen Stahlbuchse eine Relativdrehung, die über die Stahlbuchse an den Abtrieb gegeben wird. Bei einer Umdrehung des Rollenträgers macht die elastische Stahlbuchse eine Gegendrehung, die der Zähnezahldifferenz zwischen Innen- und Außenverzahnung entspricht.

Die Übersetzung i ergibt sich aus den Zähnezahlen z von Circular Spline (CS) und Flexspline (FL) zu

$$i = \frac{z_{FL}}{z_{FL} - z_{CS}} \tag{2.120}$$

Harmonic-Drive-Getriebe erlauben Übersetzungen von $i = 30 - 320$ bei Abtriebsdrehmomenten von $M = 0{,}5 - 10.000$ Nm und sind spielfrei. Durch den hohen Traganteil der doppelseitigen Zahnberührung (Zahneingriffsbereich beträgt ca. 15 % der Gesamtzähnezahl) ist die Torsionssteifigkeit sehr hoch. Besonders vorteilhaft wirkt sich weiterhin das geringe Massenträgheitsmoment des Getriebes aus.

Bild 2.103 zeigt zwei verschiedene Bauformen des Harmonic-Drive-Getriebes, die beide einen elliptischen Innenring als Wave Generator benutzen. Im linken Bildteil ist die sogenannte Topfbauform bestehend aus den drei Getriebeteilen Circular Spline, Flexspline und Wave Generator, dargestellt. Eine Weiterentwicklung dieses Getriebetyps stellt die flache Bauform dar, die die Vorteile des Getriebes auch in kompakten Außenabmessungen realisiert. Als Abtrieb dient hier im Vergleich zur Topfbauweise ein viertes Grundelement, der Dynamic Spline. In Verbindung mit dem elliptisch geformten Flexspline stellt dieser über die geringe Zähnezahldifferenz die Übersetzungsstufe dar, wohingegen Flexspline und Circular Spline die gleiche Zähnezahl aufweisen.

Die Anwendung der flachen Bauform zeigt Bild 2.104 für den Vorschubantrieb einer Fräsmaschine. Die Vorteile hinsichtlich des hohen Übersetzungsverhältnisses auf kleinstem Bauraum, ein geringes Getriebespiel sowie eine einfache Montagemöglichkeit kommen hier zum Tragen. Der An-

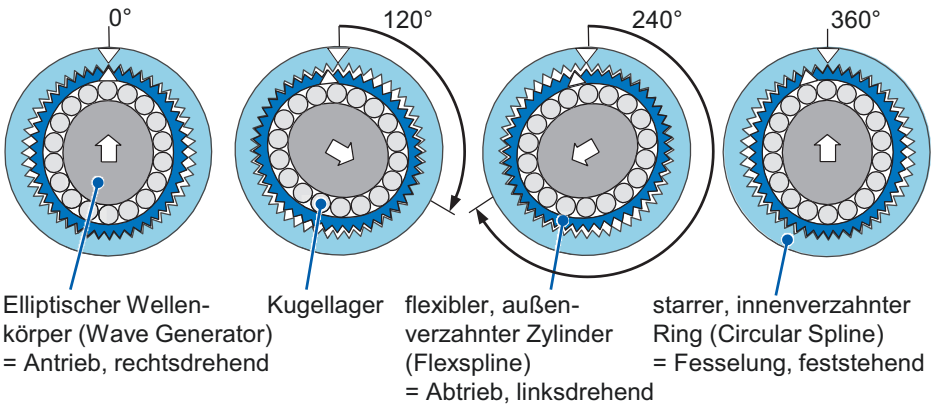


Bild 2.102 Funktionsprinzip eines Harmonic Drive. Nach Harmonic Drive AG

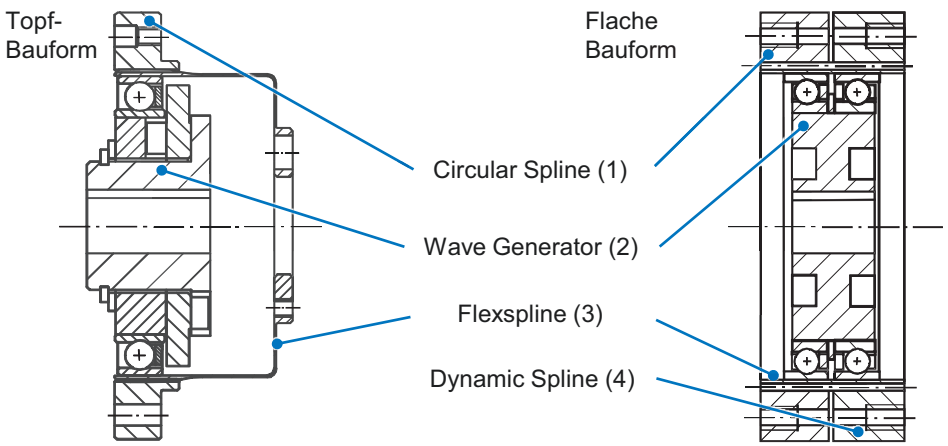
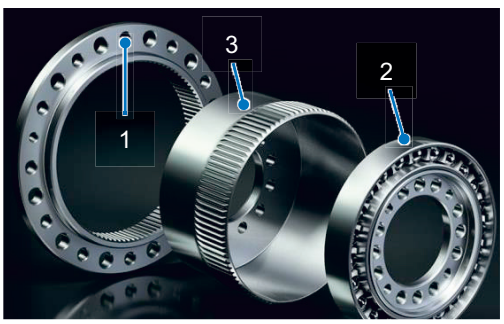
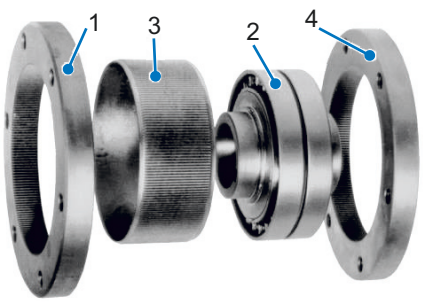


Bild 2.103 Bauformen von Harmonic-Drive-Getrieben. Quelle: Harmonic Drive AG





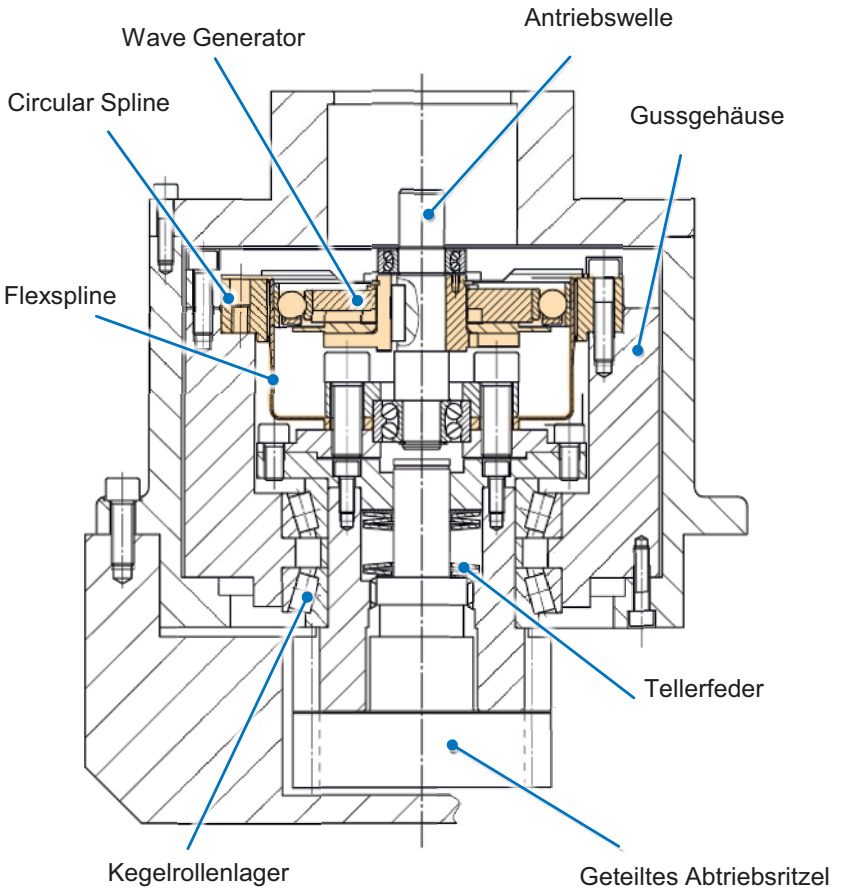


Bild 2.104 Vorschubantrieb für den Fräskopf einer Fräsmaschine. Nach Harmonic Drive AG

triebsmotor treibt den Wave Generator an. Der Circular Spline ist im Gehäuse fixiert, und der Abtrieb erfolgt über den Flexspline auf den Dynamic Spline, der wiederum fest mit der Abtriebswelle verbunden ist.

Galaxie-Getriebe

Eine andere Bauform eines koaxialen Hohlwellengetriebes stellt das in Bild 2.105 dargestellte Galaxie-Getriebe der Firma Wittenstein dar. Dieses unterscheidet sich in Aufbau und Funktion von anderen Hohlwellengetrieben. So verzichtet das Getriebe im Gegensatz zu beispielsweise Planetengetrieben auf außenverzahnte Zahnräder. Stattdessen ist der Antriebsstrang als Polygonhohlwelle ausgeführt, auf der über eine Nadellagerung stiftförmige Einzelzähne gelagert sind. Jeder Einzelzahn liegt auf einem Segment des Nadellageraußenringes auf und wird mit Hilfe des Zahnträgers, der gleichzeitig als Abtrieb dient, radial gleitend geführt. Um ein Verdrehen der Segmente zu verhindern sind auf jedem Schwenksegment zwei Zähne hintereinander angeordnet, wodurch sich zwei nebeneinander stehende Zahnreihen ausbilden. Durch die Kontur der Antriebswelle erfahren die Einzelzähne in radialer Richtung einen Hub über eine Umdrehung, wobei die Hubanzahl der Polygonität entspricht. Das umlaufende, in der Regel feststehende Hohlrad weist eine entsprechende Innenverzahnung auf, über die im Eingriff stehende Zähne abgleiten und so eine Rotation des Zahnträgers bewirken. Bei jedem Hub laufen die Einzelzähne im Umlaufrad einen Zahn weiter. Je nach Antriebsvariante können unterschiedliche Drehrichtungen des Abtriebs relativ zur Antriebsdrehrichtung realisiert werden. Die Drehrichtung des Zahnträgers bei stillstehendem Hohlrad ist entgegen der Rotation des Polygons. Wird die Standübersetzung genutzt, so ist die Antriebs- und Abtriebsdrehrichtung dieselbe [o.V.15].

Das Übersetzungsverhältnis i ergibt sich wie in Bild 2.106 dargestellt aus der Zähnezahl des Hohlrades und der Polygonzahl.

Die Kontur der Zahnflanken der Einzelzähne sowie des Hohlrades folgen der Kontur einer logarithmischen Spirale. Bei der radialen Zustellung des Einzelzahns ergibt sich an einem Spiralstück gleicher Steigung der Hohlradverzahnung ein tangentialer Kontakt, der im Idealfall vollflächig ist. Dieser flächige Kontakt lässt einen konvergierenden Schmierspalt entstehen, in dem sich ein hydrodynamischer Schmierfilm ausbildet und zur Reibungsreduktion beiträgt. Da sich zu jedem Zeitpunkt mehrere Zähne gegenüberstehend im Eingriff befinden, ergibt sich ein großer Traganteil wodurch große Momente bei hoher Drehzahl übertragen werden kön-

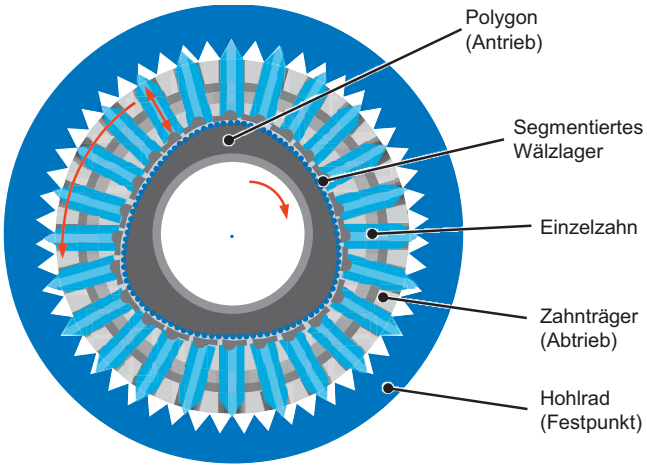


Bild 2.105 Aufbau und Funktion eines Galaxie-Getriebes. Nach Wittenstein

nen. Zusätzlich ist hierdurch die Torsionssteifigkeit des Getriebes sehr hoch. Ein weiterer Vorteil des Getriebes ist die mögliche geringe Baugröße, bei gleichzeitig relativ großer Hohlwelle. Durch eine entsprechende Vorspannung des Getriebes, kann eine spielfreie Verzahnung erreicht werden [o.V.15].

Der Einsatz des Getriebes wird unter anderem im Bereich des Handlings (z. B. für Drehtische) untersucht, wo hohe Positioniergenauigkeiten und Torsionssteifigkeiten gefordert werden. Eine weitere Anwendung des Getriebes stellt der Antriebsstrang von Drehmaschinen dar.

Cyclo-Getriebe

Als weitere Bauart dieser Kompaktgetriebe sind die Exzentergetriebe zu nennen, deren bekanntester Vertreter das Cyclo-Getriebe ist, Bild 2.107. Das Funktionsprinzip der Exzentergetriebe lässt sich wie folgt beschreiben: Eine kreisrunde Scheibe wird über einen Exzenter angetrieben und wälzt sich in einem feststehenden Ring ab. Jeder Punkt der Scheibe beschreibt dabei eine zykloidische Kurve. An der Scheibe entsteht eine Drehbewegung mit einer wesentlich geringeren Drehzahl in entgegengesetzter Richtung. Die tatsächliche Übersetzung hängt vom Verhältnis des Ring- zum Scheibendurchmesser ab.

Um ein Rutschen während des Abrollens zu vermeiden, wird die Scheibe beim Cyclo-Getriebe mit einem geschlossenen Zykloidenzug als Außenform versehen und der Ring durch kreisförmig angeordnete Bolzen ersetzt. Jede Kurvenscheibe hat dabei einen Kurvenabschnitt weniger, als Bolzen im Bolzenring sind. Die Kurvenzüge der Scheibe greifen hier nun formschlüssig in die Rollen des feststehenden Außenrings ein und wälzen sich daran ab. Die reduzierte Drehbewegung der Kurvenscheibe wird über Bolzen, die in Bohrungen derselben eingreifen, auf die Abtriebswelle übertragen. Das Übersetzungsverhältnis wird durch die Anzahl der Kurvenabschnitte der Kurvenscheibe bestimmt.

Auf den Bolzen von Außenring und Abtriebswelle sind Rollen aufgesetzt, die eine rein wälzende Kraftübertragung zwischen Kurvenscheibe und Bolzenring sowie Kurvenscheibe und Mitnehmerbolzen der Abtriebswelle bewirken. Dadurch werden Reibungsverluste, Geräuschentwicklung und Verschleiß auf ein Minimum reduziert. Zwischen Ex-

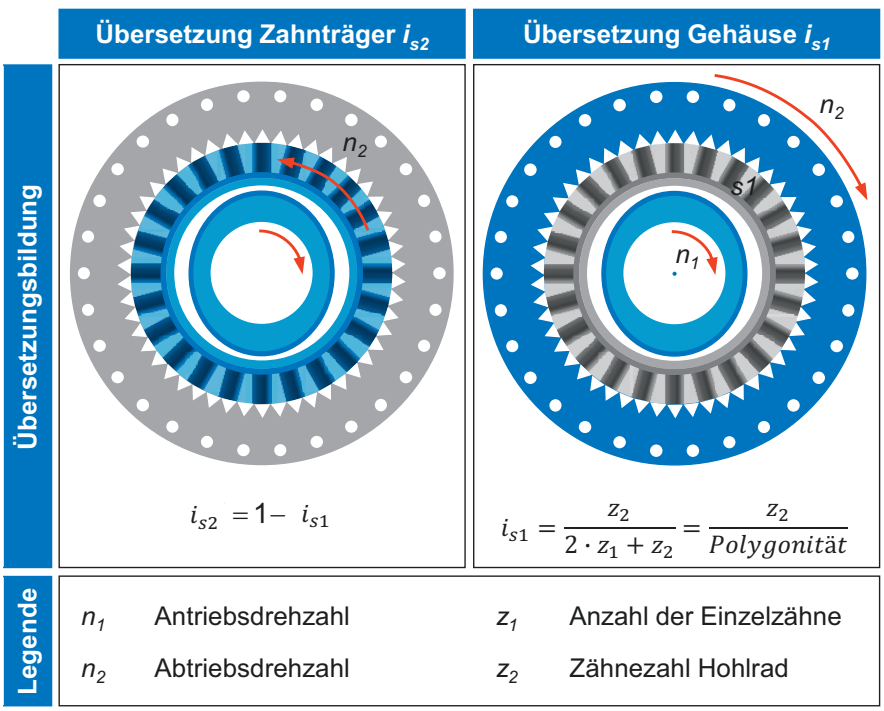


Bild 2.106 Übersetzung eines Galaxie-Getriebes. Nach Wittenstein

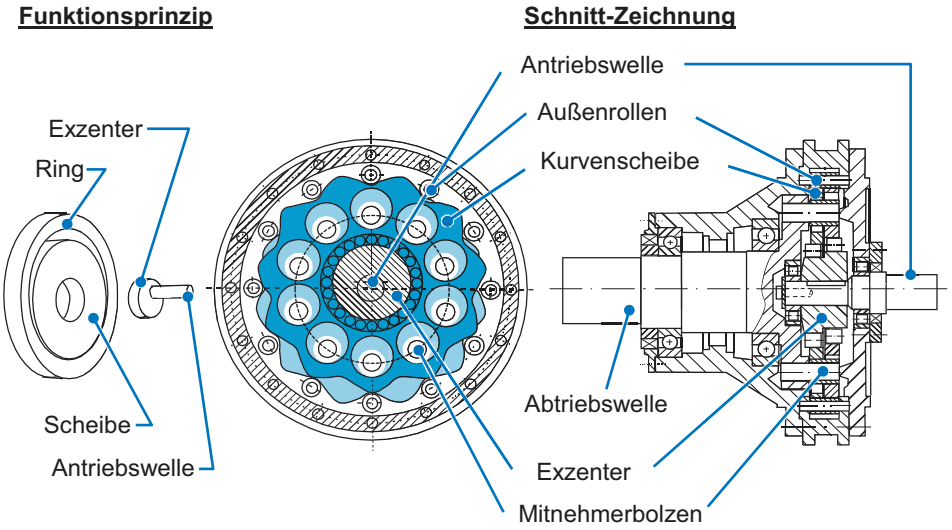


Bild 2.107 Cyclo-Getriebe. Quelle: Sumitomo Drive Technologies

zenterwelle und Kurvenscheibe befinden sich Nadeln, um auch hier die Reibung gering zu halten [LORE26].

Das Cyclo-Getriebe besitzt die vier Hauptbauelemente: Antriebswelle mit Exzenter, Kurvenscheibe, Außenring mit Bolzen und Rollen sowie die Abtriebswelle mit Bolzen und Rollen. Um einen Massenausgleich zu bewirken, sind die Getriebe mit zwei um 180° versetzten Kurvenscheiben versehen, die über einen Doppelexzenter angetrieben werden. Gleichzeitig lässt sich hierdurch das Abtriebsmoment erhöhen.

Exzentergetriebe

Eine andere Bauform des Exzentergetriebes ist in Bild 2.108 dargestellt. Die Zykloiden des Cyclo-Getriebes werden hierbei durch eine Verzahnung ersetzt. Der Eingriff der beiden Verzahnungen findet immer dort statt, wo der Exzenter dem Wälzkreis des Hohlrades am nächsten steht.

Wird der Exzenter um eine halbe Drehung von *K* nach *L* gedreht, so wälzt sich das kleinere Planetenrad im größeren Hohlrad ab. Der Eingriffspunkt bewegt sich damit von *M* nach *N* und um den gleichen Winkel wie der Exzenter. Da das auf dem Exzenter gelagerte kleinere Planetenrad einen entsprechend kleineren Umfang als das Hohlrad aufweist, muss dieses um einen größeren Winkel drehen als der Exzenter. Die Strecke von *M* bis *N* auf dem Hohlrad entspricht somit der Strecke von *M* bis *O* auf dem kleinen Rad. Die Eigenbewegung des

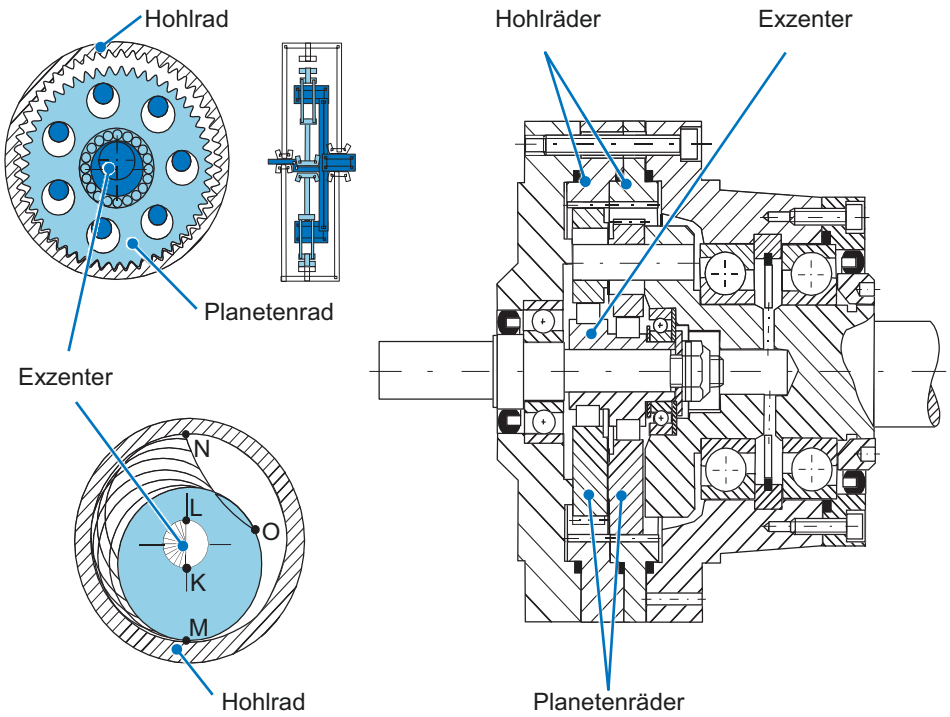


Bild 2.108 Exzentergetriebe. Nach: Akim

Planetenrades ist gegenüber dem Exzenter entgegengesetzt und entspricht der Differenz des Umfanges der beiden Räder.

Um die zykloidische Bewegung in eine Drehbewegung umzusetzen, ist die Zahnscheibe mit Bohrungen ausgerüstet, in die – wie beim Cyclo-Getriebe – entsprechende Mitnehmerbolzen, die in der abtreibenden Flanschwelle befestigt sind, eingreifen. Diese Bohrungen und eingreifenden Bolzen können mit einer Wellenkupplung verglichen werden. Die Übersetzung wird nur durch die Wälzkreisdurchmesser bzw. die Zähnezahlen bestimmt. Durch den Einbau von zwei Zahnscheiben, die um 180° zueinander versetzt sind, wird ein Gewichtsausgleich der Exzenterunwucht und eine Verspannmöglichkeit geschaffen.

Durch gegenseitiges Verdrehen der beiden Hohlräder bei der Montage werden die Zahnscheiben um ihre eigene Achse gedreht und dabei gegenseitig an die Mitnehmerbolzen angelegt. Damit wird sowohl das Zahnspiel als auch das Spiel in der Bolzenkupplung einstellbar. Die beiden Exzenter sind als Rollenlager ausgebildet.

Einen Vergleich des Harmonic-Drive-, Zykloiden- und Planetengetriebes, der im Rahmen umfangreicher Prüfstandsversuche durchgeführt wurde, zeigt ◘ Bild 2.109 [o.V.90]. Bei einem Vergleich der Getriebe ist zu beachten, dass die Baugrößen etwas unterschiedlich sind. Die Messwerte müssen daher auf die Nennmomente bezogen werden, die von 250 Nm (Getriebe 3) bis 340 Nm (Getriebe 2) reichen. Sehr gute Übertragungseigenschaften bei kleinsten Drehzahlen besitzt das Harmonic-Drive-Getriebe. Bei höheren Drehzahlen liegen die Fehler jedoch bei allen Getrieben in der gleichen Größenordnung.

Die statische Nachgiebigkeit wird ermittelt, indem der Abtrieb des Getriebes bei festgesetztem Antrieb mit einem ansteigenden Moment belastet und der resultierende Verdrehwinkel gemessen wird. Wünschenswert ist hier ein linearer Zusammenhang zwischen Lastmoment und Verdrehwinkel mit einer möglichst flach verlaufenden Kennlinie. Besonders gut schneidet dabei das Zykloidengetriebe ab, das bei Nennmoment eine Steifigkeit von 118,5 Nm/arcmin besitzt. Die durch Spiel und Reibung bedingte Hysterese ist bei allen drei Getrieben gering, wenn auch leicht unterschiedlich. Auch bei dynamischen Lasten erzielt das Zykloidengetriebe die besten Ergebnisse, nämlich die geringste dynamische Nachgiebigkeit bei der höchsten Resonanzfrequenz. Der Wirkungsgrad des Planetengetriebes liegt deutlich über dem Wert der beiden anderen. Er verbessert sich bei allen Typen unter Last [ROSE94].

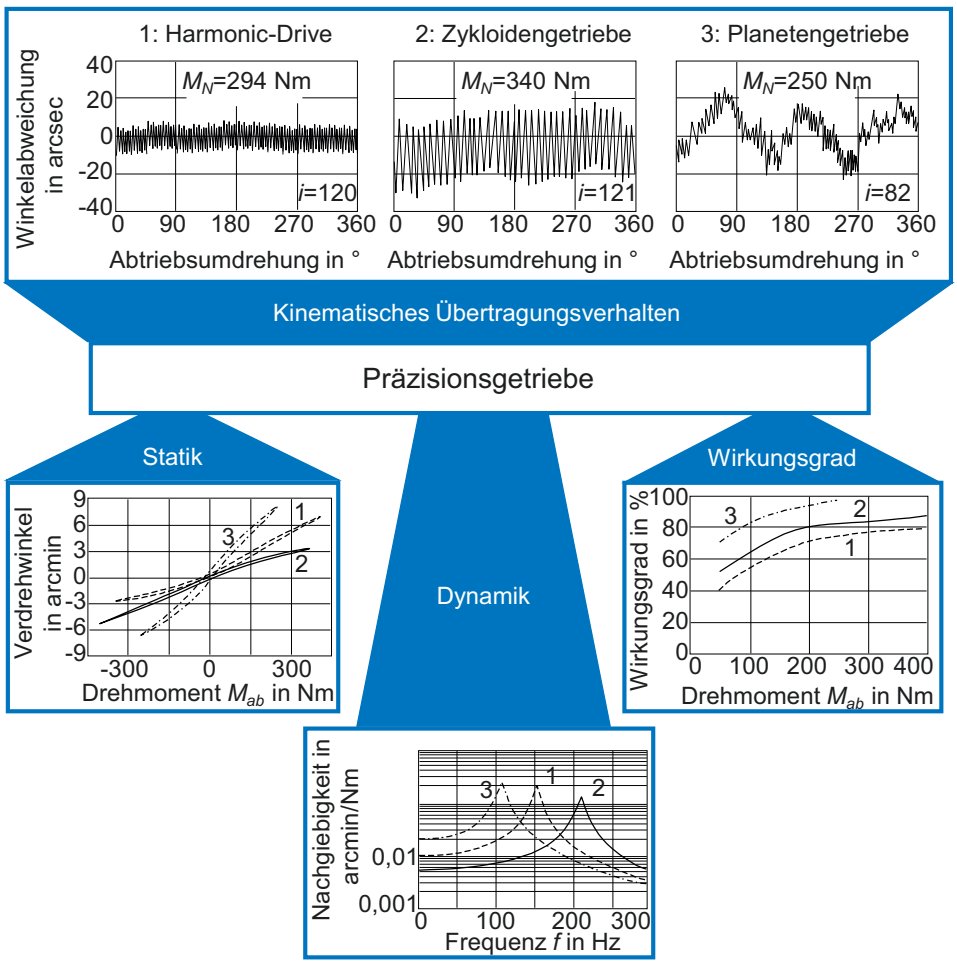


Bild 2.109 Betriebseigenschaften hochuntersetzender Sondervorschubgetriebe

2.4.3 Kupplungen

2.4.3.1 Ausgleichskupplungen

Bei der Montage von mechanischen Komponenten im Antriebsstrang ist radialer, axialer oder auch winkeliger Wellenversatz nicht vermeidbar. Unter Last treten zudem Verformungen zwischen den Komponenten auf, die ausgeglichen werden müssen. Daher werden als Verbindungselemente Ausgleichskupplungen verwendet. In Vorschubantrieben werden drehstarre und elastische Ausgleichskupplungen eingesetzt.

Drehstarre, biegeelastische Kupplungen

In Vorschubantrieben werden zur torsionssteifen und drehwinkelgenauen Verbindung von zwei Wellenenden, bei Direktantrieben insbesondere die Verbindung zwischen Motor und Kugelgewindespindel, Kupplungen eingesetzt. Sie weisen nur in Umfangsrichtung eine hohe Steifigkeit auf. Dadurch wird die Drehbewegung in Umfangsrichtung sehr genau übertragen. Alle anderen Belastungsrichtungen sind mit einer geringeren Federsteifigkeit ausgeführt, sodass innerhalb gewisser Grenzen radiale, axiale oder winklige Fluchtungsfehler zwischen beiden Wellenenden ausgeglichen werden können.

Für hochgenaue Vorschubantriebe werden in der Regel kraftschlüssige Kupplungen verwendet. Sie erfüllen die hohen Anforderungen hinsichtlich Torsionssteifigkeit, Spielfreiheit und kleinem Massenträgheitsmoment am besten. Ihre konstruktive Auslegung erfolgt nach dem zu übertragenden Drehmoment, dem Wellendurchmesser und der Torsionssteifigkeit.

Bild 2.110 zeigt die gebräuchlichste Ausführung einer torsionssteifen, flexiblen Kupplung: die Balgkupplung. Sie besteht aus zwei durch einen Balg miteinander verbundenen, ringförmigen Balgrädern, die mit entsprechenden Wellenenden von Motor und Spindel verschraubt werden können. Durch die einzelnen Wellen des Balgs lassen sich die o. g. Fehler ausgleichen [JAKO83]. Bei größerem Winkelversatz – für Werkzeugmaschinen unüblich – können andere Bauformen, z. B. Bogenverzahnungs-Kupplungen, verwendet werden.

Elastische Kupplungen mit Dämpfung

Bei diskontinuierlichen Bearbeitungsprozessen mit stoßartigen Prozesskräften werden elastische Kupplungen mit Dämpfung verwendet. Durch die Verwendung von elastischen Materialien mit hoher innerer Dämpfung im Kraftfluss können die während des Betriebes auftretenden Drehschwingungen und Stöße gedämpft und abgebaut werden. Dadurch wird der Antrieb vor dynamischer Überbeanspruchung geschützt. Neben der Drehschwingungsdämpfung können elastische Kupplungen meist auch Axial-, Radial- und Winkelverlagerungen der zu verbindenden Wellen ausgleichen.

Bei Verwendung von Zahnkränzen aus Kunststoffen mit hohem E-Modul wird die Kupplung drehsteifer und genügt häufig den Anforderungen in Werkzeugmaschinen. Aufgrund der einfachen und kompakten Bauform und dem günstigen Preis wird sie daher häufig eingesetzt. Bild 2.111 zeigt eine drehelastische Klauenkupplung. Zwei kongruente Kupplungshälften, die innenseitig mit konkav ausgebildeten Klauen versehen sind, stehen in Umfangsrichtung um eine halbe Teilung gegeneinander versetzt und sind so gestaltet, dass in dem Raum zwischen ihnen ein elastischer Kunststoff-Zahnkranz eingelegt werden kann.

Sicherheitskupplungen zum Überlastschutz

Zur wirksamen Absicherung von NC-Werkzeugmaschinen gegen Überlast- und Kollisionsschäden infolge von Werkzeugbruch, Programmier- oder Bedienfehlern werden Sicherheitskupplungen eingesetzt, die das wirksame Dreh-

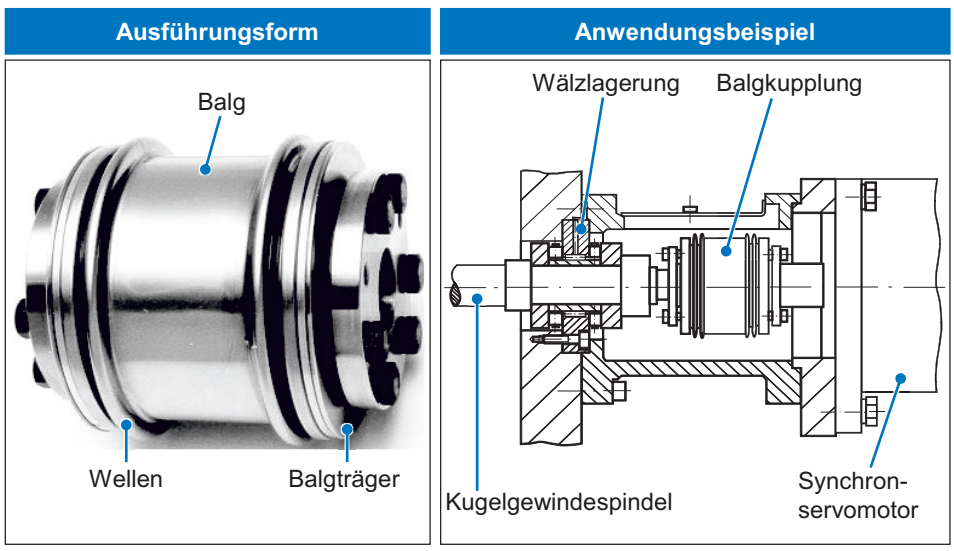


Bild 2.110 Torsionssteife, flexible Balgkupplung. Quelle: Jakob

moment in einem Antriebsstrang auf einen Höchstwert begrenzen. Bei Überschreiten dieses Werts wird der Kraftfluss unterbrochen, um die gefährdeten Bauteile zuverlässig gegen Schäden zu schützen [JAKO79].

Die Anordnung der Sicherheitskupplung im Kraftfluss hängt einerseits von der Lage der zu schützenden Bauteile und andererseits von der Lage der Maschinenkomponenten ab, die die hohen Kollisionskräfte verursachen. Diese Kräfte werden im Wesentlichen durch zwei Mechanismen hervorgerufen: Zum einen müssen im Kollisionsfall bei der plötzlichen Verzögerung einer Maschinenachse große Massenkräfte aufgenommen werden, die von der kinetischen Energie der bewegten Maschinenbauteile (z. B. Schlitten, Werkstück, Spindel, Motor) bestimmt werden. Die gesamte Bewegungsenergie wird in Verformungsenergie umgewandelt. Zum anderen erhöht sich das Motormoment im Kollisionsfall kurzzeitig bis auf etwa das drei- bis zehnfache Nennmoment. Massenkräfte und Spitzenmoment des Motors addieren sich zur resultierenden Gesamtkollisionskraft, die zu elastischen Verformungen, im ungünstigen Fall auch zu bleibenden Deformationen bzw. zu Brüchen der im Kraftfluss liegenden Maschinenbauteile führt. Zur wirksamen Vermeidung von Kollisionsschäden an Werkzeugmaschinen kommt der optimalen Lage einer Sicherheitskupplung daher eine wesentliche Bedeutung zu. Bei der Bewertung ist von Interesse, welche Energien im Augenblick der Kollision zwischen zwei Maschinenbauteilen auftreten.

Bild 2.112 zeigt für eine Fräsmaschine in Fahrständerausführung die Energiebilanz der beteiligten Baugruppen bei einer Kollision. Der translatorisch bewegten Masse des Fahrständers fällt mit 5 % der weitaus geringste Anteil zu. Eine wirkungsvolle Reduzierung der Kollisionsschäden lässt sich hierbei nur erreichen, wenn im Kollisionsfall alle rotierenden Massen von den translatorisch bewegten Massen abgekoppelt werden. Der günstigste Ort für die Anbringung einer Sicherheitskupplung scheint deshalb die Übergangsstelle zwischen Spindelmutter und Vorschubschlitten zu sein. Aus praktischen Erwägungen wird die Kupplung zumeist jedoch zwischen Motor und Spindel angebracht.

Die Wirksamkeit von Sicherheitskupplungen im Kraftfluss von Vorschubantrieben wurde in praktischen Kollisionsversuchen bestätigt [ULRI82]. Bild 2.113 zeigt den Vorschubantrieb des Planschlittens einer Schrägbettdrehmaschine mit den maschinenspezifischen Daten. Des Weiteren sind im rechten Bildteil zwei gemessene Kurvenverläufe für die Kollisionskraft dargestellt, die beim Aufschlag des Schlittens in x-Richtung auf das Spindelgehäuse jeweils ohne und mit Sicherheitskupplung aufgenommen wurden. Durch den Einsatz einer Sicherheitskupplung auf der Motorwelle konnte die Aufschlagwucht um 64 % von 110 kN auf 40 kN reduziert werden.

Sicherheitskupplungen sollten so ausgeführt sein, dass die beiden Kupplungshälften nach dem Ausrücken durch eine mechanische Einrichtung wieder exakt zueinander in Eingriff gebracht werden können, um eine Verschiebung des Referenzpunktes für die Steuerung zu vermeiden.

Sicherheitskupplungen werden als reibschlüssige Rutschkupplungen, zunehmend jedoch als federbelastete Formschlusskupplungen ausgeführt.

Eine Variante formschlüssiger Überlastkupplungen zeigt Bild 2.114. Während viele der bekannten formschlüssigen

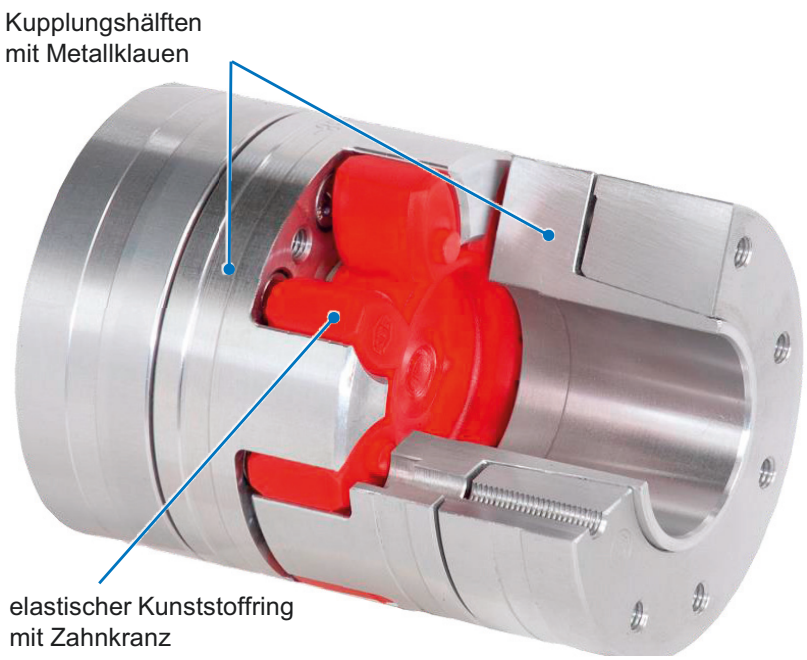
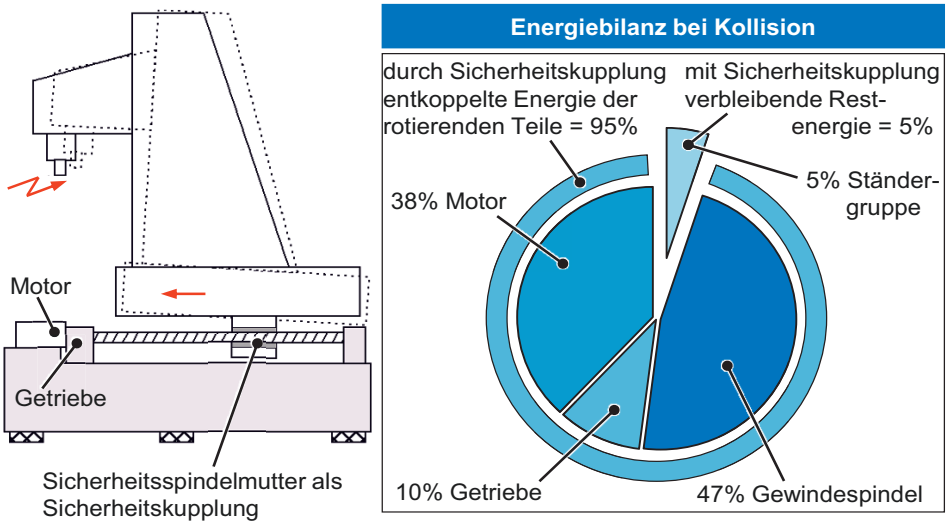


Bild 2.111 Elastische, drehschwingungsdämpfende Klauenkupplung. Quelle: KTR Systems

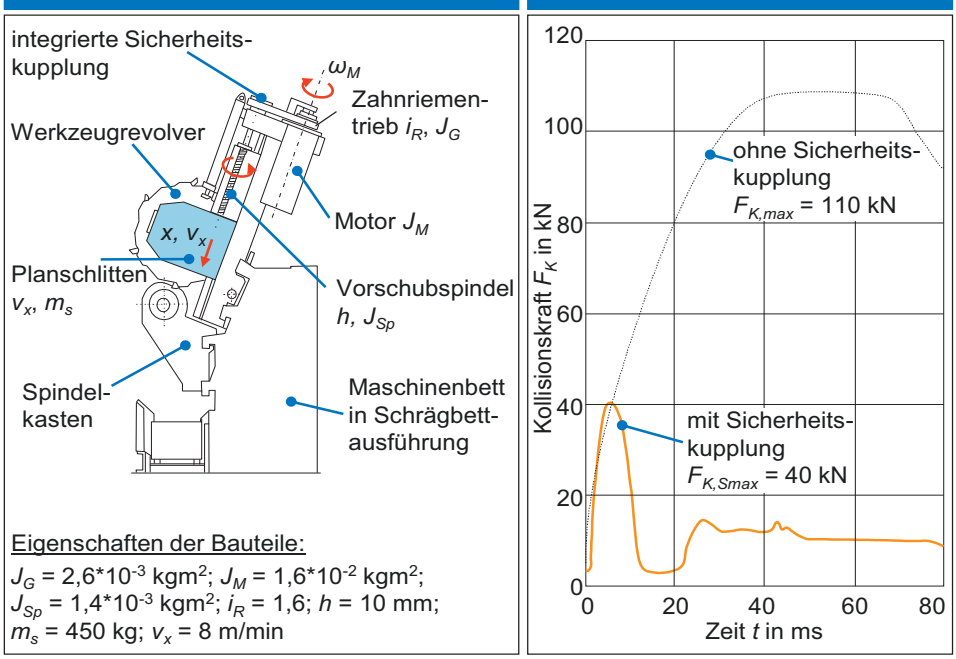
Bild 2.112 Energiebilanz für Kollision einer Fräsmaschine in Fahrständerbauweise.



Überlastkupplungen das Drehmoment mit Hilfe von Kugeln oder Rollen übertragen, nutzt diese Kupplung das Prinzip der Stirnverzahnung, die durch Federkraft im Eingriff gehalten wird. Dabei sind die Flächen der Stirnverzahnung schraubenförmig ausgeführt, sodass an den Kraftübertragungsstellen nicht nur während der normalen Drehmomentübertragung, sondern auch während des Ausschaltvorgangs ein großflächiger Kontakt besteht. Zu hohe Hertz'sche Pressungen werden damit vermieden.

Darüber hinaus ist der axial bewegliche Kupplungsring in mehrere Segmente geteilt. Durch die Kegelform der Stirnverzahnung bedingt, schieben die Druckfedern die einzelnen

Bild 2.113 Gemessene Kollisionskraftverläufe an einer NC-Drehmaschine



Berechnung

Reduzierte Massen:

m_S = 450 kg; $m_{Sp,red}$ = 553 kg; $m_{G,red}$ = 3705 kg; $m_{M,red}$ = 22803 kg

Berechnete Kollisionskräfte:	ohne Kupplung	mit Kupplung
Fall 1: k = 1 kN/µm	F_{K1} = 699,4kN	$F_{K,S1}$ = 133,5 kN
Fall 2: k = 0,1 kN/µm	F_{K2} = 221,2kN	$F_{K,S2}$ = 42,2 kN

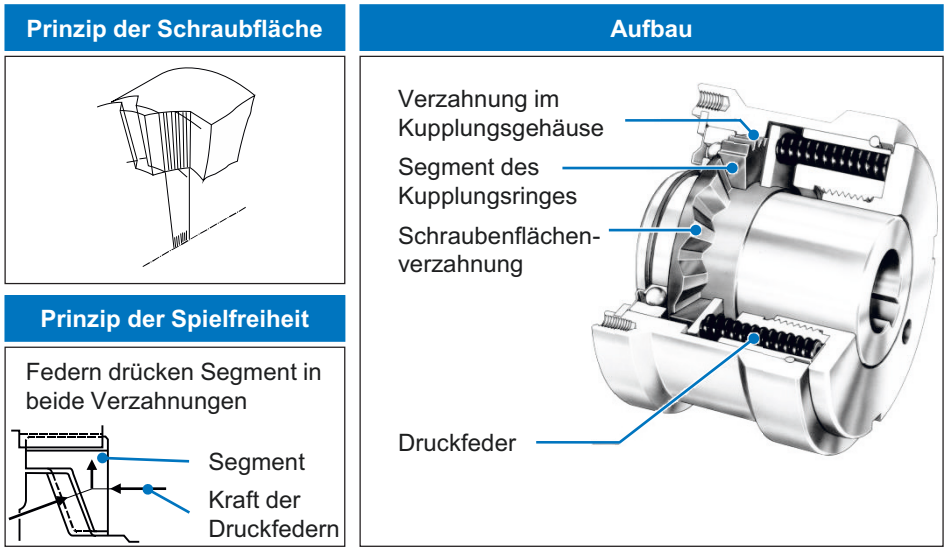


Bild 2.114 Kupplung zur Drehmomentbegrenzung in Vorschubgetrieben. Nach RINGSPANN GmbH

Segmente nach außen in die Innenverzahnung des Kupplungsgehäuses. Die Drehbewegung wird somit zwischen Kupplungsring und Gehäuse absolut spielfrei übertragen.

In Bild 2.115 ist eine Sicherheitskupplung dargestellt, die es ermöglicht, die Wirkung der Massenkräfte im Kollisionsfall auf die Anteile der translatorisch bewegten Massen des Vorschubantriebs zu begrenzen. Hierzu wurde die Trennstelle zwischen Schlitten und Spindelmutter gelegt, sodass im Störfall auch das Trägheitsmoment der Spindel entfällt und nur die kinetische Energie des Schlittens selbst übrig bleibt.

Die Sicherheit-Spindelmutter ist ein hydraulisch belasteter, beidseitig wirkender Kraftbegrenzer. Im eingerückten Zustand geht der Kraftfluss von der Spindel über die Spindelmutter in einen mit ihr verschraubten Flansch. Dieser wird mit Hilfe eines Ringkolbens axial genau zu einem weiteren Flansch fixiert, der unmittelbar mit dem Schlitten verschraubt ist. Der Ringzylinder wird über den P-Anschluß mit Drucköl beaufschlagt. Dadurch wird der Ringkolben auf die genau bearbeiteten Planflächen der beiden Flansche gepresst und der Ringzylinder gegen den drucklosen Tankrücklauf T abgedichtet. Die Kraft, mit der der Ringkolben die beiden Flansche miteinander verbindet, hängt von der Ringkolbenfläche und dem hydraulischen Druck ab. Überschreitet die am Schlitten angreifende, äußere Kraft die Ringkolbenkraft, so wird der Ringkolben von der Planfläche eines der beiden Flansche abgehoben. Über den Ringspalt zwischen Ringkolben und Zylinder ist damit der Durchfluss zum drucklosen Tankrücklauf freigegeben. Sofort fällt am Ringzylinder der

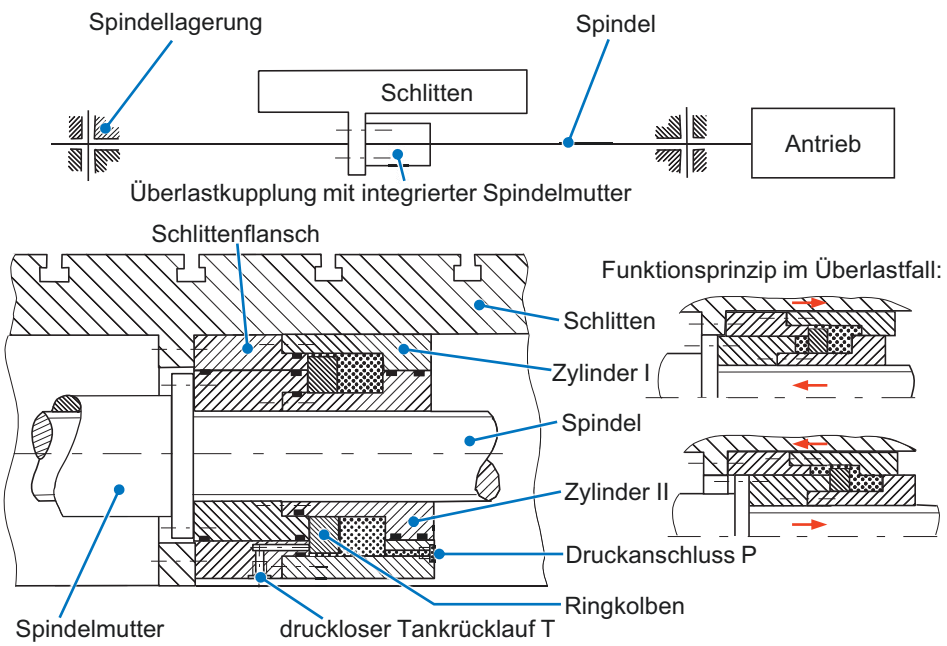


Bild 2.115 Hydraulische Sicherheitsspindelmutter. Nach Jakob

Hydraulikdruck ab, und die kraftschlüssige Verbindung zwischen beiden Flanschen bzw. Spindelmutter und Schlitten ist unterbrochen.

Der Beginn des Ausrückhubes wird mit Hilfe von Schaltern erfasst. Daraufhin wird der Servomotor abgebremst. Durch einfache Drehrichtungsumkehr der Antriebsspindel kann die Kupplung nach einer Kollision wieder vorgespannt und funktionstüchtig gemacht werden.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A/D	Analog zu digital Wandler
AC	Wechselstrom
AlNiCo	Aluminium-Nickel-Cobalt
AT	Antriebstelegramm
CCD	Charge-Coupled Device
D/A	digital zu analog Wandler
DC	Gleichstrom
DIN	Deutsche Industrienorm
DSP	Digitaler Signalprozessor
ED	Einschaltdauer Elektromotor
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
EWOTeK	Forschungsprojekt: Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb
HSC	High Speed Cutting
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
KGT	Kugelgewindetrieb
LED	lichtemittierende Diode
MDT	Masterdatentelegramm
MST	Mastersynchrontelegramm
N	Magnetischer Nordpol
NC	Numerische Steuerung
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PI-Regler	Proportional-Integral-Regel
PRC	Pseudo-Random-Code
PWM	Pulsweitenmodulation
RGT	Rollengewindetrieb
S	magnetischer Südpol
S1	Motorbetriebsart Dauerbetrieb
S2	Motorbetriebsart Kurzzeitbetrieb
S3	Motorbetriebsart periodisch mit lastfreien Abschnitten
S6	Motorbetriebsart periodisch ohne lastfreie Abschnitte
SB	Strombegrenzungsphase
SERCOS	Serial Realtime Communication System
Simodrive	Produkt (Niederspannungsumrichter) der
611D	Firma Siemens AG
Sinumerik	Produkt (Numerische Steuerung)
840D	der Siemens AG
SmCo	Samarium-Cobalt
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDW	Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e. V.
WZM	Werkzeugmaschinen
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\overline{M_B}$	Nm	Mittelwert des Beschleunigungsmoments
$\overline{M_L}$	Nm	Lastmomentmittelwert
$\overline{N_M}$	Nm	Motormomentmittelwert
$\underline{Z}^*$	beliebig	konjugierte komplexe Zahl
$\dot{\omega}_{SB}$	rad/s²	Winkelbeschleunigung in der Strombegrenzungsphase
$\underline{U}$	V/m	komplexe Amplitude (Phasor)
$\underline{Z}$	beliebig	komplexe Zahl
$\dot{\omega}$	rad/s²	Winkelbeschleunigung
A	–	Abtaststelle
A	V/m	Amplitude der elektrischen Feldstärke
A	V	maximale Amplitude der Messspannungen
A_n, B_n	–	Zusammenfassung
A_{Sp}	mm²	Querschnitt Spindel
B	T	magnetische Flussdichte
B	A/m	magnetische Feldstärke
b	mm	Gitterbreite
c	Nms/rad	Laständerungsfaktor
CM		drehzahlreduzierender Lastanteil
d	mm	Stegdicke
d	mm	Durchmesser
E	V/m	elektrische Feldstärke
f	Hz	Speisefrequenz
f	Hz	Trägerfrequenz
f_{ein}	Hz	Eingangsfrequenz
f_{Netz}	Hz	Netzfrequenz
f_{Soll}	Hz	Sollfrequenz
F	N	Kraft
F_{Ki}, $F_{Ki,\,Si}$	N	Kollisionskraft i
g	mm	Wicklungsabstand

h	beliebig	Analoge Messgröße
h_0	beliebig	Maximalwert einer analogen Messgröße
i	A	Strom
I	A	Strom
i	–	imaginäre Einheit
i	–	Übersetzung
I_1, I_2, I_3	A	Außenleiterströme
I_A	A	Ankerstrom
$I_{A\,max}$	A	Maximaler Ankerstrom
I_{AN}	A	Anfahrstrom
i_E	A	Wechselstrom
I_f	A	Erregerstrom
I_{max}	A	Maximalstrom
$I_{max,zul}$	A	zulässiger maximaler Motorstrom
I_N	A	Nennstrom
I_s	A	Statorstrom
I_{sa}, i_{sa}	A	reelle Stromkomponente nach Clarke Transformation
I_{sb}, i_{sb}	A	imaginäre Stromkomponente nach Clarke Transformation
I_{sd}, i_{sd}, i_d	A	flussbildende Stromkomponente
I_{sq}, i_{sq}	A	momentbildender Strom
I_u, I_v, I_w	A	Ständerstrom
i_u, i_v, i_w	A	Ständerstrom
I_Z	A	Zwischenkreisstrom
i_μ, I_μ	A	Magnetisierungsstrom
J_{ges}	kgm²	Gesamtmassenträgheismoment
J_i	kgm²	Massenträgheitsmoment
$J_{M,rot.}$	kgm²	Massenträgheitsmoment des Motors
k	–	Spurnummer
k	V	Amplitudenfaktor
k	N/µm	Steifigkeit
K	V/A	elektromagnetischer Kopplungsfaktor
k_1	A	Motorkonstante
k_2	A	Motorkonstante
k_{Li}	N/µm	Festlagersteifigkeit
k_M	N/µm	Mutter/Spindel-Steifigkeit
k_{Si}	N/µm	Spindelsteifigkeit
K_V	m/(min·mm)	Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor
L	H	Induktivität
L	mm	Spindelsteigung
L	mm	Spindellänge
L'_2	H	auf Statorwindungszahl umgerechnete Rotorinduktivität
L_{1h}	H	Hauptinduktivität
L_2	H	Rotorinduktivität
L_D	H	Ersatzinduktivität
L_h	H	Rotorinduktivität
L_h	H	Hauptinduktivität

M	Nm	Drehmoment
M	Nm	Motormoment
m	–	Modul Zahnrad
$M_\sim$	Nm	Motorabtriebsmoment
M_1	Nm	Belastungsmoment bei Strombegrenzung
M_1	Nm	Belastungsmoment bei Kurzzeitbetrieb
M_{1max}	Nm	Maximalmoment ohne Strombegrenzung
M_A, M_{AN}	Nm	Anfahrmoment
M_{ab}	Nm	Abtriebsdrehmoment
M_B	Nm	Betriebsmoment
M_B	Nm	Beschleunigungsmoment
M_{el}	Nm	Abtriebsmoment des feldorientiert geregelten Asynchronmotors
M_i	Nm	inneres Drehmoment
M_{kipp}, M_K	Nm	Kippmoment
M_L, M_{Last}	Nm	Lastmoment
M_M	Nm	Motormoment
M_{max}	Nm	Maximales Motormoment
M_{Mmax}	Nm	Maximalmoment mit Strombegrenzung
M_n	Nm	Nenndrehmoment
M_N	Nm	Nenndrehmoment
M_{soll}	Nm	Sollmoment
M_{Soll}	Nm	gefordertes Gesamtmoment
M_V	Nm	Verspannmoment
n	1/min; 1/s	Drehzahl
n	–	Brechungsindex
n	–	Zählerstand
N	–	Zyklenzahl
N	–	Anzahl erforderliche Spuren
n_0, n_d	1/min	Leerlaufdrehzahl
n_1	1/min	Kenndrehzahl aufgrund der Strombegrenzung
n_B	Nm	Betriebsdrehzahl
n_i	1/min	Drehzahl
n_{ist}	1/min	Istdrehzahl
n_k	1/min	Knickdrehzahl
n_{kipp}, n_K	1/min	Kippdrehzahl
n_{max}	1/min	Maximaldrehzahl
n_N	1/min	Nenndrehzahl
n_s	1/min	synchrone Drehzahl
n_{soll}	1/min	Solldrehzahl
$n_{x,auf}$	1/min	Drehzahlaufschaltwert
$n_{y,auf}$	1/min	Drehzahlaufschaltwert
P	W	Leistung
p	–	Polpaarzahl
p	mm	Gliedlänge Kette
P_{auf}	W	aufgenommene Leistung
P_{FE}	W	Eisenverluste

P_{ges}	mm	Gesamtsteigung
P_M	W	geforderte Motornennleistung
P_{max}	W	Aufgenommene elektrische Leistung
P_{max}	W	maximale Leistung
P_{mech}	W	mechanische Leistung
$P_{mech,max}$	W	maximale mechanische Leistung
$P_{Prozess}$	W	vom Prozess benötigte Leistung
P_u	W	Strangleistung
P_V	W	Kupferverluste
P_v	W	Strangleistung
P_{verl}	W	Verlustleistung
$P_{verl,max}$	W	Maximale Verlustleistung
P_w	W	Strangleistung
R	V	Netzspannung
R', S', T'	V	Spannungen am Umrichterausgang
R'_R	Ω	auf Statorwindungszahl umgerechneter Rotorwiderstand
R_A	Ω	Ankerwiderstand
R_f	Ω	Erregerwiderstand
R_R	Ω	Rotorwiderstand
R_S	Ω	Statorwiderstand
R_S	Ω	Shuntwiderstand
R_{Str}	Ω	Ersatzwiderstand
S	V	Netzspannung
s	–	Schlupf
s_B	–	Betriebsschlupf
s_{kipp}	–	Kippschlupf
s_N	–	Nennschlupf
t	s	Zeit
T	V	Netzspannung
T	s	Hochlaufzeitkonstante
T_2	s	Läuferzeitkonstante
T_{32}, T_φ	–	Transformationsmatrix
T_{an}	s	Anregelzeit
t_B	s	Belastungszeit
t_L	s	Leerlaufzeit
t_r	–	relative Einschaltdauer
T_r	s	elektrische Rotorzeitkonstante
t_s	s	Spieldauer
t_{St}	s	Stillstandszeit
T_t	s	Totzeit
T_{UP}	s	Umschaltzeitpunkt
U	V	Spannung
u	V	Spannung
$U–$	V	niedriges Spannungsniveau
$U+$	V	hohes Spannungsniveau
U_0	V	Quellenspannung
U_{12}, U_{23}, U_{31}	V	Außenleiterspannungen
U_A	V	Ankerspannung
u_A	V	induzierte Spannung

u_A	V	Brückenausgangsspannung
$U_{A\,max}$, U_{A1}	V	maximale Ankerspannung
$U_{A\,min}$	V	minimale Ankerspannung
U_A, U_B, U_C	V	Phasenspannungen
U_{A1}, U_{A2}	V	Ausgangsspannung
U_d, U_q	V	Spannungen nach Park-Transformation
U_f	V	Erregerspannung
U_i	V	induzierte Spannung
U_n	V	Ausgangsspannung
U_S	V	Spannung Shuntwiderstand
U_{uv}, U_{vw}, U_{wu}	V	Klemmenspannungen
U_{ZK}, U_Z	V	Zwischenkreisspannung
v	m/s	Geschwindigkeit
v_u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
v_K	m/s	Kettengeschwindigkeit
V	V	Spannung
$V–$	V	niedriges Spannungsniveau
$V+$	V	hohes Spannungsniveau
V_{in}	V	Eingangsspannung
W	V	Spannung
$W–$	V	niedriges Spannungsniveau
$W+$	V	Hohes Spannungsniveau
W_M	J	magnetische Energie im Motor
x	mm	Weg
x	mm	Verfahrweg
x_{ges}	mm	Maßstabslänge
x_{soll}	mm	Positionssollwert
y_{soll}	mm	Positionssollwert
z	mm	Phasengitterabstand
z	–	Zähnezahl
α	rad	elektrischer Drehwinkel
γ	Grad	Rotorpositionswinkel
Δt_i	s	Dauer des Winkelgeschwindigkeitsbereichs
Δx	mm	Weginkrement
$\Delta\omega_i$	rad/s	Winkelgeschwindigkeitsbereich
ϑ	°C	Temperatur
λ	µm	Wellenlänge
λ_n	rad	Phasenverschiebung
σ_2	–	Streuziffer
τ	s	Periodendauer
τ	mm	Teilungsperiode
τ'	s	Teilung der Impulsfolgen
φ	Grad	Flusskoordinatenwinkel
φ	Grad	Flusskoordinatenwinkel
ϕ	Wb	magnetischer Fluss
ϕ	rad	Phasenverschiebung
ϕ_{max}	Wb	maximaler magnetischer Fluss
ϕ_{min}	Wb	minimaler magnetischer Fluss
ϕ_r	Wb	Läuferfluss

ψ_{PM}	Wb	magnetischer Fluss
ω	rad/s	Kreisfrequenz
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit des Rotors
Ω	rad	Phasenverschiebung
ω_{μ}	rad/s	Winkelgeschwindigkeit des Läuferflusses
ω_{1max}	rad/s	Koordinatenschnittwert der Motorkennlinie
ω_{AP}	rad/s	Winkelgeschwindigkeit im Arbeitspunkt
ω_{E}	rad/s	Eckkreisfrequenz
ω_{M}	rad/s	Motorkreisfrequenz
ω_{R}	rad/s	Läuferstromkreisfrequenz
ω_{SB}	rad/s	Winkelgeschwindigkeit in der Strombegrenzungsphase
ω_{SB0}	rad/s	theoretische Arbeitswinkelgeschwindigkeit
ω_{UP}	rad/s	Winkelgeschwindigkeit im Umschaltpunkt

Literaturverzeichnis

[BEIK00] Beikrich, H.: Automatisierungstechnik 2. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000

[BRAA97] Braasch, J.: Genügen Drehgeber zur Positionierung von Werkzeugmaschinen? In: MSR Magazin, 1997, Nr. 7–8

[BRAA00] Braasch, J.; Fa. Heidenhain: Genauigkeit von Vorschubantrieben. Traunreut, Juni 2000. Firmenschrift

[BREC12] Brecher, C. (Hrsg.): Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb – EWOTeK. Aachen: Apprimus, 2012

[BREC02] Brecher, C.: Vergleichende Analyse von Vorschubantrieben für Werkzeugmaschinen. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik. Bd 2002,17). Aachen: Shaker, 2002

[CONR15] Conrad, K.-J.: Taschenbuch der Werkzeugmaschinen. München: Hanser, Carl, 2015

[DIN71] DIN 1319 (1971). Grundbegriffe der Meßtechnik

[DIN88] DIN 32876 (1988). Elektrische Längenmessung

[ERNS98] Ernst, A.: Digitale Längen- und Winkelmesstechnik. Positionsmesssysteme für den Maschinenbau und die Elektronikindustrie. (Reihe: Die Bibliothek der Technik. Bd. 165). 3. Aufl. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1998

[FORS10] Forstmann, J.: Kugelgewindetriebe im Einsatz an Kunststoffspritzgießmaschinen. Lebensdauerprognose und Optimierung. Diss. Universität Duisburg-Essen, 2010

[GROS06] Gross, H.; Hamann, J.; Wiegärtner, G.: Technik elektrischer Vorschubantriebe in der Fertigungs- und Automatisierungstechnik. Mechanische Komponenten, Servomotoren, Messergebnisse. Erlagen: Publicis Corporate Pub., 2006

[HAMA19] Hamacher,S.: Der Trommelmotor. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019

[HAME06] Hameyer, K.: Elektrische Maschinen 2. Vorlesungsskript RWTH Aachen, 2006

[HEID00] Heidenhain: Positionsmeßsysteme für elektrische Antriebe. Traunreut, März 2000. Firmenschrift

[HEID89] Heidenreich, W.: Aufbautechniken für Halbleiter-Magnetfeldsensoren. In: Technisches Messen. 56. Jg., 1989, Nr. 11, S. 436–443

[HENN99] Henneberger, G.: Elektrische Maschinen I – Grundlagen, Wirkungsweise, Aufbau, Betriebsverhalten. Vorlesungsskript RWTH Aachen, 1999

[HEWL76] Hewlett-Packard: Laser-Transducer-System. System operating and service booklet. Santa Clara, CA, 1976. Firmenschrift

[HEWL92] Hewlett-Packard: Magnetisches Längenmeßsystem ML01, Band 30-05. Kirchzarten, 1992. Firmenschrift

[ISER99] Isermann, R.: Mechatronische Systeme. Grundlagen. Berlin: Springer, 1999

[JAKO79] Jakob, L.: Sicherheitskupplungen in Achsantrieben von NC-Maschinen. Konstruktion, Elemente, Methoden. Stuttgart: Konradin, 1979

[JAKO83] Jakob, L.: Anwendungen drehstarrer, flexibler Kupplungen. In: Der Zuliefermarkt, Sept. 1983

[LAGE13] Lageder, F.: Entwicklung von Harmonic Drive Getriebe für Raumfahrtantriebe. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2013

[LARS03] Larsen, R. M.: Fieldbus Technology. Industrial Network Standards for Real-time Distributed Control. Berlin Heidelberg: Springer, 2003

[MENZ73] Menzel; Mirande; Weingärtner: Fourier-Optik und Holographie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1973

[MILL90] Miller, W.: Bezeichnungen für Weg- und Winkelmeßsysteme, Verwirrende Begriffe. In: Industrieanzeiger 78, 1990

[ROSE94] Rosenbauer, T.: Getriebe für Industrieroboter – Beurteilungskriterien, Kenndaten, Einsatzhinweise. Diss. RWTH Aachen, 1994

[SCHM09] Schmitt, G.: Ansteuerung von Hochvolt-IGBTs über optimierte Gatestromprofile. Diss. Uni Wuppertal, 2009

[SCHÖ09] Schöder, D.: Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2009

[SCHÖ13] Schöder, D.: Elektrische Antriebe – Grundlagen. 5. Aufl. Heidelberg: Springer, 2013

[SESS91] Sesselmann, T.: Maßstäbe für interferentielles Abtasten ermöglichen Nanometer-Meßschritte. In: WB Werkstatt und Betrieb, 1991, Nr. 124-2

[SPIE90] Spies, A.: Längen in der Ultrapräzisionstechnik messen. In: Feinwerktechnik & Meßtechnik. 98. Jg., 1990

[TRÄN14] Tränkler, H.-R.; Reindl, L. M.: Sensortechnik. Berlin: Springer, 2014

[ULRI82] Ulrich, H.-J.: Verhütung von Kollisionsschäden an NC-Drehmaschinen. In: Industrie-Anzeiger 104. 45. Jg., 1982

[VDI73] VDI/VDE 2600-2 (1973). Metrologie (Meßtechnik) – Grundbegriffe

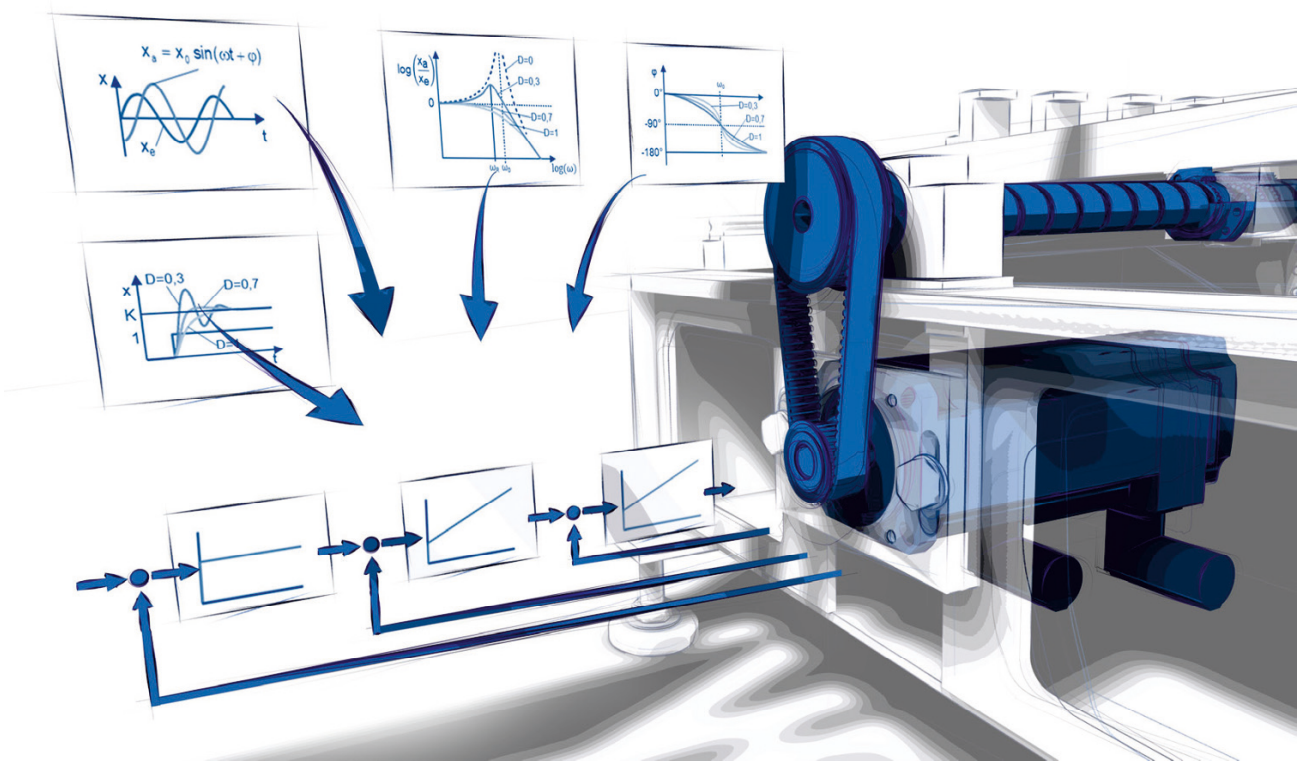
[WALC74] Walcher, H.: Digitale Lagemeßtechnik. Düsseldorf: VDI, 1974

[WECK90] Weck, M.; Eversheim, W.; König, W.; Pfeifer, T. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: VDI-Verlag, 1990

[WECK99] Weck, M.; Krüger, P.; Brecher, C.; Wahner, U.: Components of the HSC-Machine. In: Schulz, H.; u. a. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International German and French Conference on High Speed Machining. Darmstadt, 10.–11. März 1999, S. 269–278

[WITT88] Wittman, G.: Spieleinstellbare Getriebe mit konischen Verzahnungen. In: Zuliefermarkt. 36. Jg., 1988

Kapitel 3

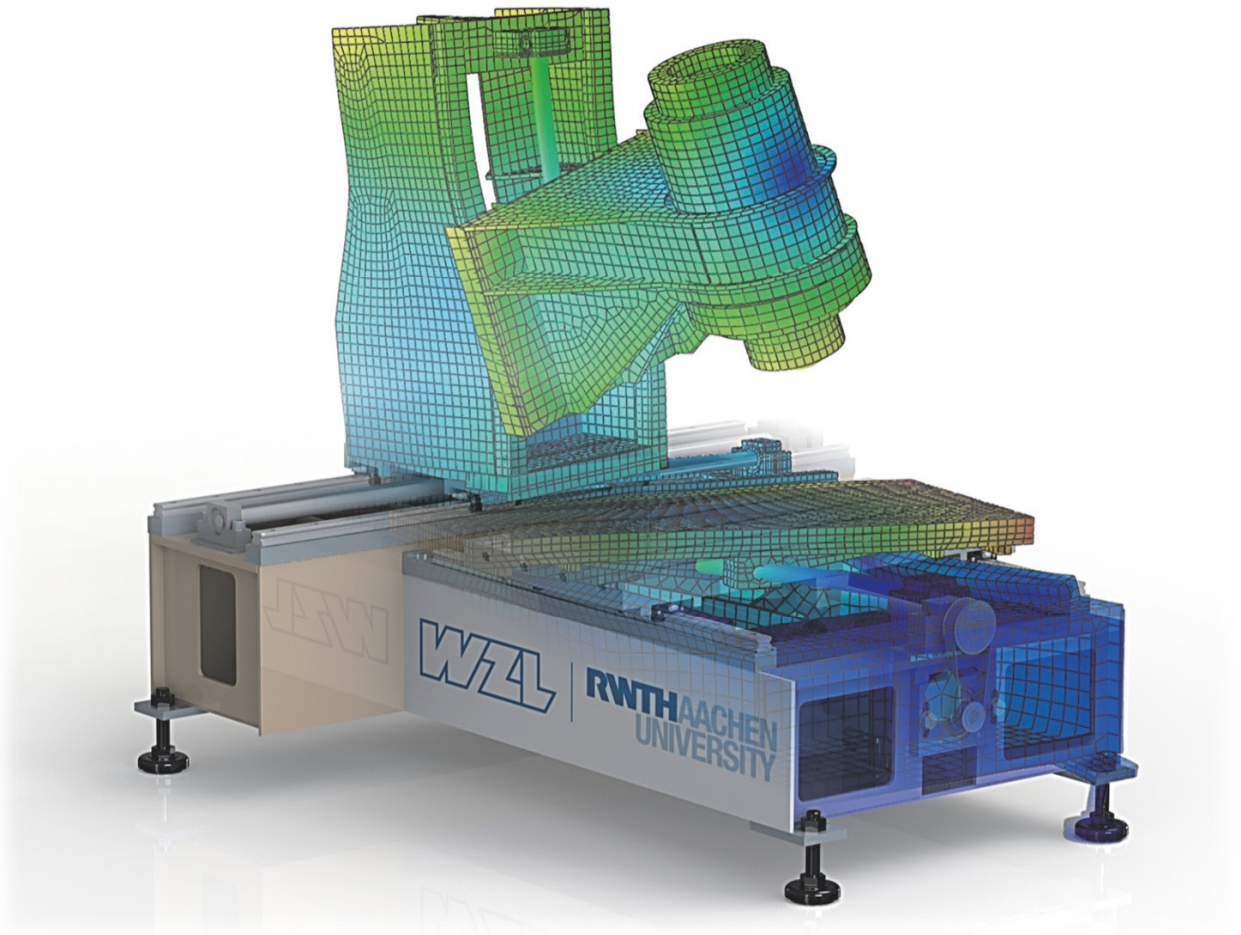


Dynamisches Verhalten von Vorschubachsen

Ich danke meinen Mitarbeitern Dr.-Ing. Thomas Berners, Dipl.-Ing. Christian Ecker, Dr.-Ing. Alexander Epple, Christian Fimmers M.Sc. und Dr.-Ing. Frederik Wellmann für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

www.wzl.rwth-aachen.de

Simulation von Produktionsanlagen



- **Simulative Schwachstellenanalyse**
- **Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen**
- **Topologieoptimierung**

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Steinbachstr. 19
52074 Aachen
+49 241 80 27409
Maschinentechnik@wzl.rwth-aachen.de

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Abteilung Maschinentechnik

Dynamisches Verhalten von Vorschubachsen

3.1 Regelungstechnische Grundlagen – 116
3.1.1 Lineare zeitkontinuierliche Übertragungssysteme – 118
3.1.2 Lineare zeitdiskrete Übertragungssysteme – 126
3.1.3 Feedforward-Controller zur Schleppfehlerkorrektur – 131
3.1.4 Zustandsregelung – 132

3.2 Regelung von Vorschubantrieben – 136
3.2.1 Vorschubantrieb als Regelkreis – 136
3.2.2 Berechnung von zeitkontinuierlichen Lageregelkreisen – 137
3.2.3 Übertragungsverhalten des linearen Lageregelkreises – 137
3.2.4 Simulation von Vorschubantrieben – 140

3.3 Übertragungsverhalten der Mechanik – 142
3.3.1 Physikalische Grenzen des mechanischen und elektrischen Systems – 143
3.3.2 Übertragungsverhalten elektromechanischer Antriebssysteme – 144
3.3.3 Übertragungsverhalten linearer Direktantriebe – 147

3.4 Einflüsse des Messsystems auf die Vorschubregelung – 149
3.4.1 Verhalten von elektromechanischen Achsen bei Regelung über indirektes und direktes Messsystem – 149
3.4.2 Einfluss des Messsystems bei linearen Direktantrieben – 151
3.4.3 Verbesserung der Vorschubregelung durch Verwendung eines Ferraris-Sensors – 151
3.4.4 Kleinste verfahrbare Schrittweite – 153

3.5 Statische und dynamische Steifigkeit von Vorschubachsen – 154
3.5.1 Statische Steifigkeit – 155
3.5.2 Dynamische Steifigkeit – 156

Abkürzungsverzeichnis – 161

Formelzeichenverzeichnis – 161

Literaturverzeichnis – 163

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_3

Bedingt durch hohe geforderte Werkstückgenauigkeit müssen die Vorschubantriebe so beschaffen sein, dass die von der Steuerung vorgegebenen Lage- und Geschwindigkeitswerte mit höchster Genauigkeit und möglichst ohne Verzögerung in die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück umgewandelt werden. Diese Forderung gilt besonders für mehrachsige, bahngesteuerte Werkzeugmaschinen, bei denen die einzelnen Achsbewegungen funktional abhängig sind und jede Achse mit einem eigenen Vorschubantrieb ausgestattet ist. Dabei müssen alle Antriebe zusätzlich das gleiche dynamische Übertragungsverhalten aufweisen, da sonst Fehler bei der Erzeugung ebener und räumlicher Konturen auftreten.

Die Forderungen an Vorschubantriebe lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- *Verzerrungsfreie Signalübertragung:* Der Übergang von einer Position in die andere muss ohne Schwingungen ausgeführt werden; mechanische Übertragungselemente sind ohne Umkehrspanne und Spiel mit ausreichender Steifigkeit zu realisieren.
- *Hohe Dynamik:* Schnelle Änderungen der Führungsgröße müssen mit geringer Verzögerung vom zu bewegenden Maschinenteil ausgeführt werden.
- *Ausregeln von Störgrößen:* Reib- und Schnittkräfte und deren Schwankungen erfordern eine hohe statische und dynamische Steifigkeit des Antriebs bzw. der gesamten Regelung.
- *Anpassung der einzelnen Achsen:* Bei mehrachsigen Maschinen muss das Übertragungsverhalten aller Vorschubantriebe gleich sein, d. h. die reaktionsschnelleren Antriebe sind den langsameren anzupassen.

In diesem Kapitel werden zunächst regelungstechnische Grundlagen eingeführt, dies betrifft die linearen zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Übertragungssysteme. Im Anschluss daran werden weiterführende Möglichkeiten zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens erläutert. Dies sind Feedforward-Verfahren oder die Zustandsregelung. Des Weiteren wird die Regelungstechnik in einer Vorschubachse beleuchtet. Dies betrifft die Darstellung der Lageregelkreise und die Handhabung der wichtigsten Kenngrößen. Neben der Regelung hat auch das Übertragungsverhalten der Mechanik einen wesentlichen Einfluss auf die Bewegung der Vorschubachse. Das lineare und nichtlineare Verhalten der mechanischen und elektrischen Bauelemente werden daher ebenfalls beschrieben.

3.1 Regelungstechnische Grundlagen

Die numerische Steuerung (engl. Numerical Control, NC) einer Werkzeugmaschine hat unter anderem die Aufgabe, aus den Informationen über die zu verfahrenden Wege und Geschwindigkeiten geeignete Führungsgrößen an die Vorschubantriebe auszugeben.

Die Umsetzung dieser Führungsgrößen in Lage- und Geschwindigkeitswerte vollzieht sich entweder mit Hilfe eines stetigen Antriebs innerhalb eines übergeordneten Lageregelkreises oder mit Hilfe eines Schrittmotors in offener Steuerkette, vgl. Bild 3.1. Jede Achse verfügt über einen eigenen, von den anderen Achsen meist unabhängigen Lageregelkreis bzw. eine eigene Steuerkette.

In der Regelungstechnik wird zwischen den Begriffen „Steuerung“ und „Regelung“ unterschieden, wobei man den Verlauf des Signalflusses zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße betrachtet. Im englischen Sprachgebrauch besteht begrifflich keine klare Trennung zwischen Steuerung und Regelung (control, feedback control).

Kennzeichen einer Steuerkette ist der offene Wirkungsablauf, bei dem keine Rückführung von Messwerten vorgesehen ist. Für einen Vorschubantrieb mit einer Lagesteuerung bedeutet dies, dass der Lageistwert nicht mit der Führungsgröße, dem Lagesollwert, verglichen wird. Zur Lagesteue-

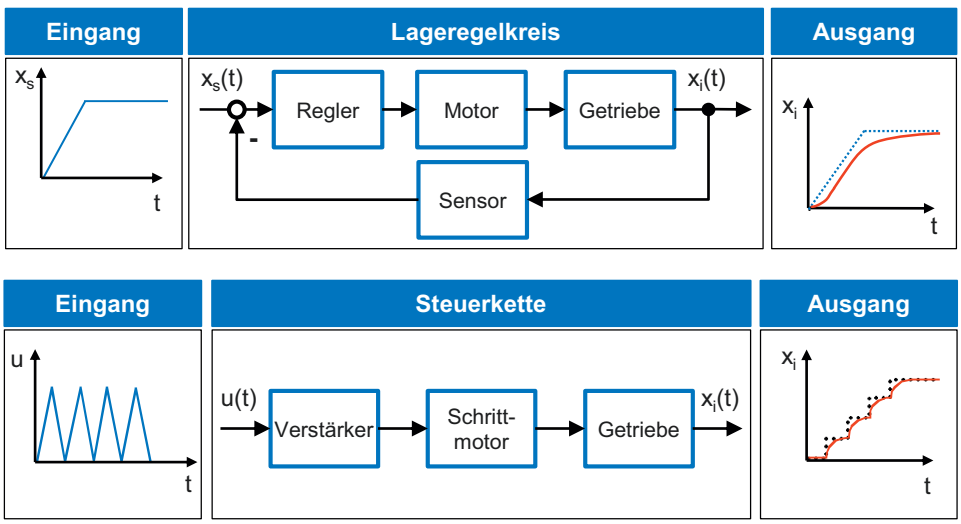


Bild 3.1 Gegenüberstellung von Regelkreis und Steuerkette

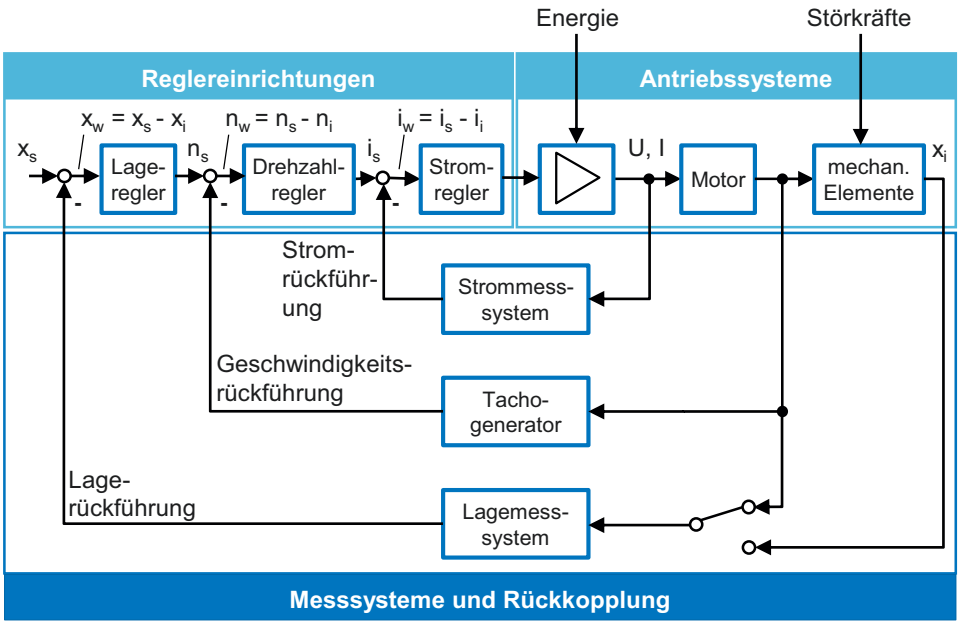


Bild 3.2 Komponenten des Lageregelkreises mit unterlagerter Geschwindigkeits- und Stromrückführung

rung finden Schrittmotoren als Antriebsmotoren Anwendung, da der Rotor dieses Motortyps bei einem Steuerimpuls eine definierte Winkeldrehung ausführt und die Anzahl der Impulse direkt proportional einem bestimmten Drehwinkel bzw. Vorschubweg ist. Die Winkelgeschwindigkeit ist über die Frequenz der Steuerimpulse steuerbar, Bild 3.1 unten. Bei stetigen Antrieben ist ein Lageregelkreis erforderlich, Bild 3.1 oben. Eine detailliertere Darstellung eines stetigen Vorschubregelkreises zeigt Bild 3.2. Zur Erhöhung der Antriebsdynamik sind dem Lageregelkreis hier ein Drehzahl- und ein Stromregelkreis unterlagert.

Der Lageregelkreis erlaubt es, die Drehung und die Winkelgeschwindigkeit des stetigen Antriebsmotors nach der Führungsgröße zu regeln. Der Lageregelkreis besteht aus folgenden Komponenten:

- Regeleinrichtung,
- Antriebssystem (Verstärker, Motor und mechanische Übertragungselemente) und
- Messsystem.

In der Regeleinrichtung wird der aktuelle Drehwinkel des Motors oder die Istlage x_i des Maschinentisches von der Führungsgröße x_s, dem Lagesollwert, subtrahiert. Das Ergebnis ist die Regelabweichung x_w.

$$x_w = x_s - x_i \tag{3.1}$$

Diese Größe wird dem Lageregler zugeführt. Im Regler wird aus der Differenz zwischen Soll- und Istwert zur Ausregelung der Abweichung eine zeitlich modifizierte Stellgröße für den Antriebsmotor gebildet. Wird die Regelabweichung x_w null, so hat der Antrieb seine Sollposition erreicht.

Das Antriebssystem besteht aus dem Leistungsverstärker, dem Servomotor und den mechanischen Übertragungselementen. Der Leistungsverstärker stellt die notwendige Energie für den Antrieb zur Verfügung. Als stetige Antriebsmotoren verwendet man heute überwiegend Synchronmotoren. Die rotatorische Bewegung des Motors wird meist über ein Spindel-Mutter-System in die translatorische Bewegung des Tisches umgewandelt (vgl. ▶ Kap. 3.3). Bei hohen Anforderungen an die Achsdynamik werden auch lineare Direktantriebe eingesetzt, hierbei entfallen die mechanischen Übertragungselemente.

Das Messsystem schließt über die Lagerückführung den Regelkreis. Die Lage x_i des Schlittens wird mit einem Winkel- oder Lagemesssystem (vgl. ▶ Kap. 2.4) erfasst und der Regeleinrichtung zur Bildung des Soll-/Istwert-Vergleichs zugeführt. Mit Hilfe des Lageregelkreises wird die Istposition des Tisches der Sollposition nachgeführt und der Einfluss von Störkräften eliminiert.

Die Forderung, dass der Lage-Istwert des Maschinentisches der Sollposition möglichst fehler- und verzögerungsfrei folgt, lässt sich realisieren durch:

- hohe Kreisverstärkung des Regelkreises,
- hohe Dämpfung zur Vermeidung von Instabilitäten und Überschwingen,
- geringe Zeitkonstanten des Antriebs,
- kleine Massenträgheitsmomente der rotierenden Teile,
- hohe mechanische Eigenfrequenz,
- hohe Steifigkeit der im Kraftfluss liegenden mechanischen Elemente,
- Spielfreiheit bei den mechanischen Übertragungselementen und
- ein Verhältnis der Eckkreisfrequenzen des mechanischen Übertragungssystems und des Regelkreises von $\omega_{0,Mechanik} / \omega_{0,Regelkreis} > 2$.

Die in ◘ Bild 3.2 zusätzlich dargestellten unterlagerten Geschwindigkeits- und Stromrückführungen dienen der Verbesserung des dynamischen Verhaltens des Antriebs, d. h. der Kreisverstärkung bei gleichzeitiger Verbesserung des Dämpfungsverhaltens. Hierauf wird in ▶ Kap. 3.2 noch detailliert eingegangen.

Zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Lageregelung muss außer dem Signalfluss das Übertragungsverhalten des Gesamtsystems und der Einzelsysteme bekannt sein. Eine genaue Analyse des dynamischen Verhaltens der Lageregelkreise erfordert einige regelungstechnische Grundkenntnisse, die im Folgenden in kurzer Form zusammengestellt sind.

3.1.1 Lineare zeitkontinuierliche Übertragungssysteme

3.1.1.1 Zeitverhalten von Regelkreisgliedern

Das Verhalten von Regelkreisgliedern, d. h. die zeitliche Abhängigkeit der Ausgangsgröße x_a von der Eingangsgröße x_e, lässt sich mit Hilfe einer Differenzialgleichung (DGL) beschreiben. Dabei spielen nicht nur die Augenblickswerte x_e und x_a eine Rolle, sondern auch deren zeitliche Ableitungen $\dot{x}_e$ und $\dot{x}_a$, $\ddot{x}_e$, $\ddot{x}_a$ usw.

$$\begin{aligned} &a_n x_a^{(n)}(t) \ldots + a_2 \ddot{x}_a(t) + a_1 \dot{x}_a(t) + a_0 x_a(t) \\ &= b_0 x_e(t) + b_1 \dot{x}_e(t) + b_2 \ddot{x}_e(t) + \ldots + b_m x_e^{(m)}(t) \end{aligned} \tag{3.2}$$

In Gleichung (3.2) sind x_e und x_a beliebige physikalische Größen, z. B. Wege, Kräfte oder elektrische Spannungen. Die Größen a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 und b_2 sind systembestimmende konstante Beiwerte. Die Berechnung bzw. Messung dieser Beiwerte muss von Fall zu Fall nach dem gerätetechnischen Aufbau der Regelkreisglieder vorgenommen werden [ABEL06, LUNZ08].

Eine Möglichkeit, das Zeitverhalten eines linearen Regelkreisglieds zu untersuchen, ist die Lösung der Differenzialgleichung. Zur Beurteilung und zum Vergleich von Regelkreisgliedern werden spezielle Eingangssignale herangezogen und die entstehenden Ausgangssignale bewertet. Die wichtigsten normierten Eingangssignale sind die Sprungfunktion und die Impulsfunktion. Am häufigsten findet die Sprungfunktion Anwendung; dabei springt das Systemeingangssignal zum Zeitpunkt $t = 0$ von einem Ausgangs- auf einen Zielwert.

Durch Normierung auf die Sprunghöhe Δx_e des Eingangssignals erhält man die Übergangsfunktion $h(t)$:

$$h(t) = \frac{x_a(t)}{\Delta x_e} = \frac{\text{Sprungantwort}(t)}{\text{Höhe des Eingangssprungs}} \tag{3.3}$$

Sprunghöhe, Verstärkungsfaktor, Zeitkonstante, Totzeit, Überschwingweite (Dämpfung), Periodendauer (Ausschwingfrequenz) und Ausschwingdauer sind die wichtigsten systembeschreibenden Parameter, die man aus der Differenzialgleichung berechnen bzw. aus der gemessenen Übergangsfunktion entnehmen kann.

In ◘ Bild 3.3 ist exemplarisch die Übergangsfunktion für einen Einmassenschwinger für verschiedene Dämpfungen dargestellt.

Lineare Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten für vorgegebene Anfangsbedingungen lassen sich einfach mit Hilfe der Laplace-Transformation lösen. Die Laplace-Transformation ordnet einer Funktion $x(t)$ im Zeitbereich eine Funktion $X(s)$ im Bildbereich umkehrbar eindeutig zu, Gleichung (3.4). Der Vorteil der Transformation liegt darin, dass Differenziation und Integration der Zeitfunktion, sowie die Aneinanderreihung und Vermaschung von Systemblöcken durch Lösung einfacher algebraischer Gleichungen im Bildbereich ersetzt werden.

Zur Lösung einer Differenzialgleichung wird die Zeitfunktion zunächst mittels Laplace-Transformation in den Bildbereich übertragen, ◘ Bild 3.3 [MATH17].

$$X(s) = \mathfrak{L}\{x(t)\} \tag{3.4}$$

Definition: s ist eine komplexe Frequenz: $s = \sigma + j\omega$.

In den meisten Fällen lässt sich die Transformation mit Hilfe sogenannter Korrespondenztafeln realisieren. Es entsteht eine algebraische Gleichung, die einfach gelöst werden kann. Für die Rücktransformation sind meist wieder die Korrespondenztafeln ausreichend, eventuell muss zuvor eine Partialbruchzerlegung durchgeführt werden, Gleichung (3.5).

$$x(t) = \mathfrak{L}^{-1}\{X(s)\} \tag{3.5}$$

Die Transformation einer Differenzialgleichung in den Bildbereich ergibt eine algebraische Gleichung folgender Form:

$$X_a(s) = \underbrace{G(s) \cdot X_e(s)}_{A} + \underbrace{K_1 \cdot X_{a,t=0}}_{B} \tag{3.6}$$

Der Term A wird vom komplexen Eingangssignal $X_e(s)$ bestimmt; der Term B hängt von den Anfangsbedingungen $X_{a,t=0}$ ab. Werden bei dieser Darstellungsform die Anfangsbedingungen zu Null gesetzt, d. h. $X_{a,t=0}$, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$X_a(s) = G(s) \cdot X_e(s) \tag{3.7}$$

Dabei wird das Verhältnis von komplexer Ausgangsgröße zu komplexer Eingangsgröße als Übertragungsfunktion $G(s)$ bezeichnet:

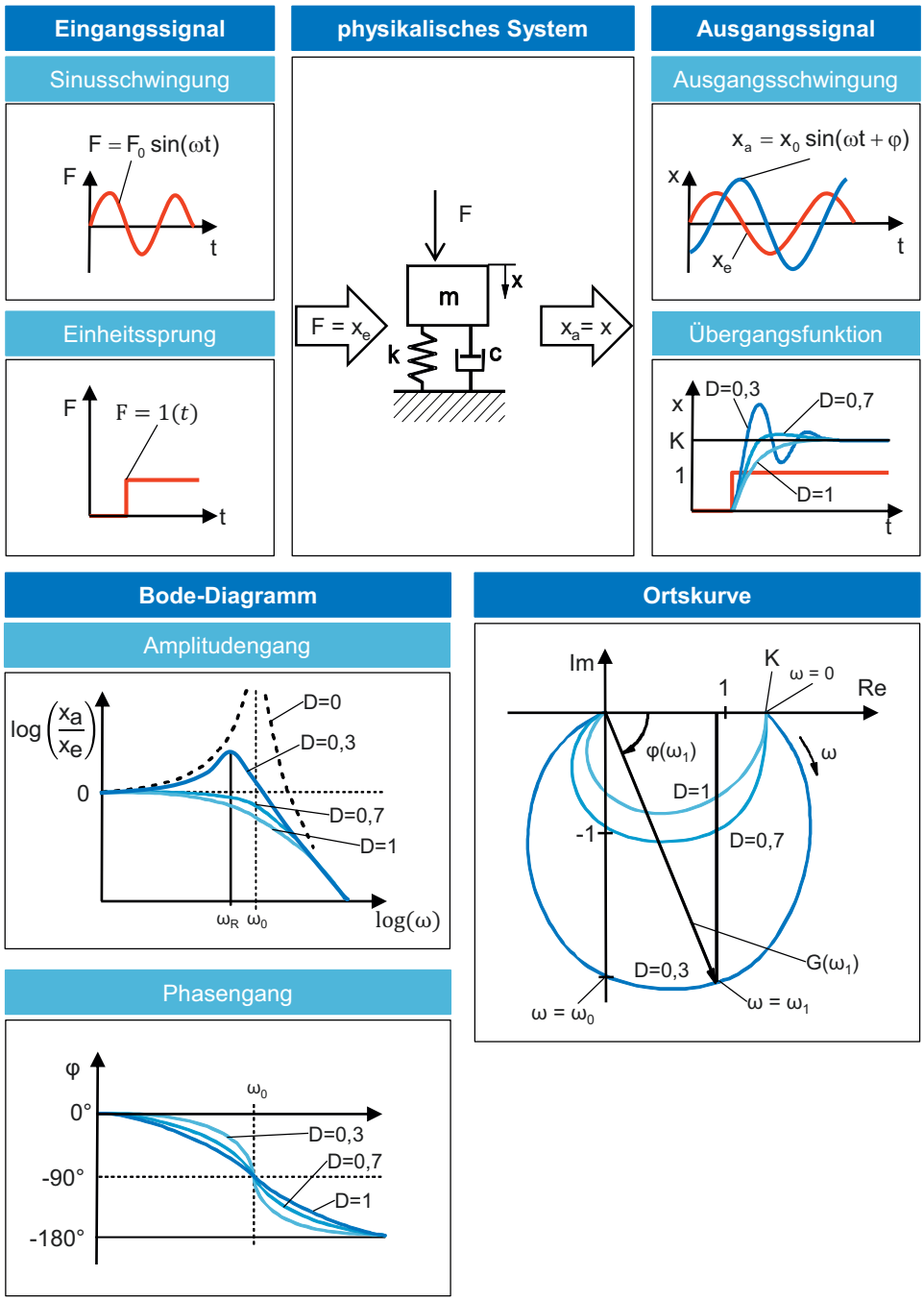


Bild 3.3 Verschiedene Darstellungsformen für einen Einmassenschwinger

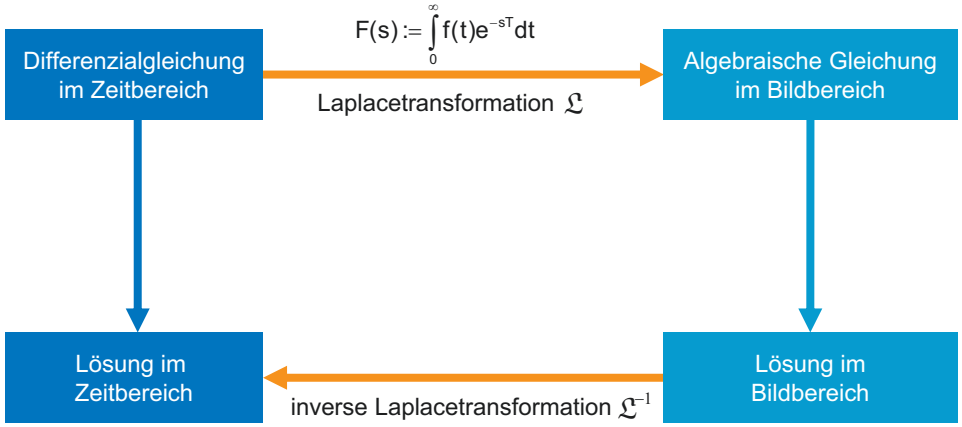


Bild 3.4 Möglichkeiten zur Lösung von Differenzialgleichungen

$$G(s)=\frac{X_a(s)}{X_e(s)} \tag{3.8}$$

Die Übertragungsfunktion $G(s)$ ist die Laplacetransformierte der normierten Impulsantwort (Gewichtsfunktion):

$$G(s)=\mathfrak{L}\{g(t)\} \tag{3.9}$$

mit:

$$g(t)=\frac{d}{dt}h(t); \qquad h(t)=\text{Übergangsfunktion} \tag{3.10}$$

Die Übertragungsfunktion ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschreibung der dynamischen Eigenschaften von Übertragungssystemen [ABEL14]. In ihrer Struktur ist die Übertragungsfunktion identisch mit der häufiger verwendeten Systembeschreibungsform, dem Frequenzgang.

Die Übertragungsfunktion $G(s)$ beschreibt vollständig die dynamischen Eigenschaften des jeweiligen Übertragungselements. Nachteilig ist jedoch, dass sie als Funktion der komplexen Frequenz s wenig anschaulich und kaum messbar ist. Daher wird die komplexe Frequenz „s“ oft durch „ $j\omega$“ substituiert, was einer Vernachlässigung des Realteils σ entspricht.

Der Frequenzgang $G(j\omega)$ indessen ist eine komplexe Funktion von reellen Frequenzwerten. Als Systemeingangsfunktionen werden im Bild- und Zeitbereich leicht darzustellende Signale verwendet, nämlich harmonische Signale mit rein sinusförmigem Verlauf, $x_e=\hat{x}_e\sin(\omega t)$.

Wird die Eingangsgröße sinusförmig geändert, so hat die Ausgangsgröße nach einem Einschwingvorgang ebenfalls einen Sinusverlauf, $x_a=\hat{x}_a\sin(\omega t+\varphi)$. Nach diesem Einschwingvorgang ist die Frequenz der Ausgangsgröße gleich der Eingangsgröße. Das Amplitudenverhältnis von Eingangs- und Ausgangsschwingung sowie die Phasenverschiebung zwischen den beiden Schwingungen sind im eingeschwungenen Zustand eine Funktion der Frequenz, ◘ Bild 3.3 oben.

Der Frequenzgang eines Übertragungssystems ist die Funktion, die das Amplitudenverhältnis von Ausgangs- und Eingangsgröße (Amplitudengang) und die Phasenverschiebung (Phasengang) in Abhängigkeit von der Frequenz beschreibt.

Man ermittelt den Frequenzgang entweder messtechnisch oder bei vorliegender Differenzialgleichung des Systems, indem die sinusförmigen Schwingungen von Eingangs- und Ausgangsgröße sowie deren zeitliche Ableitungen in die entsprechende Differenzialgleichung eingesetzt und das Verhältnis von Ausgangsgröße zu Eingangsgröße gebildet wird:

$$\begin{aligned} G(j\omega)&=\frac{X_a(j\omega)}{X_e(j\omega)}=\frac{b_0+b_1\cdot j\omega+b_2\cdot(j\omega)^2+\ldots}{a_0+a_1\cdot j\omega+a_2\cdot(j\omega)^2+\ldots}\\ &=\frac{\hat{x}_a(\omega)}{\hat{x}_e(\omega)}e^{j\varphi(\omega)} \end{aligned} \tag{3.11}$$

Die Differenzialgleichung des in ◘ Bild 3.3 dargestellten Einmassenschwingers lautet beispielsweise:

$$m\cdot\ddot{x}+c\cdot\dot{x}+k\cdot x=F \tag{3.12}$$

Daraus ergibt sich nach einigen Umformungen der Frequenzgang

$$\begin{aligned} G(\omega)&=\frac{\hat{x}(\omega)}{\hat{F}(\omega)}e^{j\varphi(\omega)}\\ &=\frac{1}{m(j\omega)^2+c(j\omega)+k}\\ &=\frac{K}{1+\frac{2D}{\omega_0}j\omega+\frac{1}{\omega_0^2}(j\omega)^2} \end{aligned} \tag{3.13}$$

mit $K=\frac{1}{k}$, $\omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}}$ und $D=\frac{c}{2\cdot m\cdot\omega_0}$

Ortskurve, Bode-Diagramm

Der Frequenzgang ist eine komplexe Funktion und kann in der komplexen Ebene darstellt werden. Die grafische Darstellung des Realteils als Funktion des Imaginärteils des Frequenzgangs bezeichnet man als Ortskurve. Dabei wird die Frequenz von $\omega = 0$ bis $\omega \to \infty$ variiert. Sie stellt sich als Parameter auf dem Verlauf der Ortskurve dar.

Das Bode-Diagramm ist die grafische Darstellung des Frequenzgangs in einem rechtwinkligen Koordinatensystem. Es sind zwei Diagramme notwendig, eines zur Darstellung des Amplituden- bzw. des Betragsverlaufs und eines zur Darstellung des Phasenverlaufs. Mit Ausnahme des Phasenverlaufs sind die Koordinaten logarithmisch aufgetragen.

Die Amplitude und Phase sind wie folgt aus der Gleichung (3.11) ermittelbar:

$$\begin{aligned} \hat{G}(\omega)&=|G(j\omega)|\\ &=\sqrt{(Re\{G(j\omega)\})^2+(Im\{G(j\omega)\})^2} \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\varphi(\omega)=\arctan\left\{\frac{Im\{G(j\omega)\}}{Re\{G(j\omega)\}}\right\} \tag{3.15}$$

◘ Bild 3.3 zeigt verschiedene Darstellungsformen für ein schwingungsfähiges Proportionalsystem mit Verzögerung zweiter Ordnung (Einmassenschwinger) bei verschiedenen Dämpfungsgraden D.

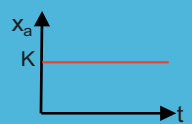
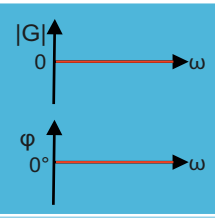
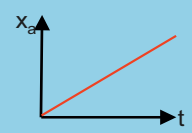
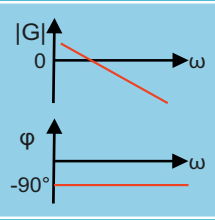
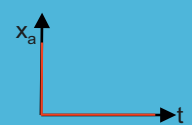
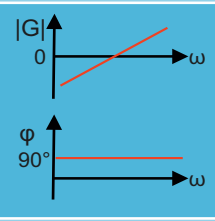
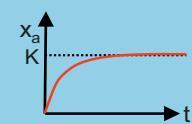
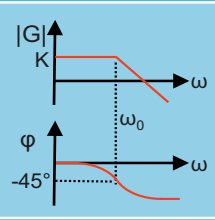
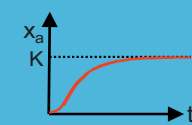
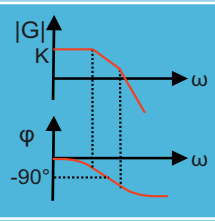
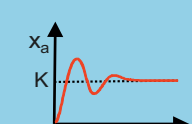
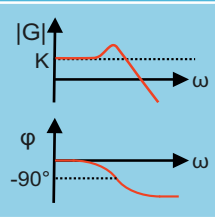
3.1.1.2 Grundsysteme von Regelkreisgliedern und ihre Darstellung

In ◘ Tab. 3.2 sind einige Grundsysteme von Regelkreisgliedern aufgelistet und durch Differenzialgleichung und Übertragungsfunktion beschrieben:

- Verzögerungsfreies P-Verhalten (Proportional): Die Ausgangsgröße ist der Eingangsgröße stets proportional. Es liegen keine frequenzabhängigen Amplituden- und Phasenveränderungen vor.
- Verzögerungsfreies I-Verhalten (Integral): Die Ausgangsgröße entspricht dem zeitlichen Integral der Eingangsgröße.
- Verzögerungsfreies D-Verhalten (Differenzial): Die Ausgangsgröße entspricht dem zeitlichen Differenzialquotienten der Eingangsgröße.
- PT_1-Verhalten (Proportional mit Verzögerung erster Ordnung),
- PT_2-Verhalten (Proportional mit Verzögerung zweiter Ordnung), hoch gedämpft (Hintereinanderschaltung von zwei PT_1-Systemen) und
- PT_2-Verhalten, schwach gedämpft.

Die entsprechenden Bode-Diagramme und Übergangsfunktionen sind in ◘ Tab. 3.1 dargestellt. Die Ausgangsgröße ist der Eingangsgröße exakt proportional für $\omega = 0$ bzw. $t \to \infty$,

◘ **Tab. 3.1** Übergangsfunktion und Bode-Diagramm von Regelkreisgliedern

Bezeichnung (Beispiel)	Übergangsfunktion	Bode-Diagramm
P-Glied Übertragungsfunktion: K		
I-Glied Übertragungsfunktion: $\frac{K}{(j\omega)}$		
D-Glied Übertragungsfunktion: $K(j\omega)$		
PT_1-Glied Übertragungsfunktion: $\frac{K}{1+T(j\omega)}$		
PT_2-Glied, D>1 Übertragungsfunktion: $\frac{K}{1+(T_1+T_2)j\omega+T_1T_2(j\omega)^2}$		
PT_2-Glied, D<1 Übertragungsfunktion: $\frac{K\omega_0^2}{(j\omega)^2+2D\omega_0(j\omega)+\omega_0^2}$		

Bezeichnung (Beispiel)	Differentialgleichung	Übertragungsfunktion
P-Glied (Hebel)	$x_a = Kx_e$	K
I-Glied (Beziehung zwischen Geschw. und Weg)	$x_a = K\int x_e dt$	$\frac{K}{(j\omega)}$
D-Glied (Umkehrung des I-Systems)	$x_a = K\dot{x}_e$	$K(j\omega)$
PT_1-Glied (vereinfachter Elektromotor)	$T\dot{x}_a + x_a = Kx_e$	$\frac{K}{1+T(j\omega)}$
PT_2-Glied, gut gedämpft (Einmassenschwinger)	$T_1T_2\ddot{x}_a + (T_1+T_2)\dot{x}_a + x_a = Kx_e$	$\frac{K}{1+(T_1+T_2)j\omega+T_1T_2(j\omega)^2}$
PT_2-System, schwach gedämpft (Einmassenschwinger)	$\ddot{x}_a + 2D\omega_0\dot{x}_a + \omega_0^2 x_a = K\omega_0^2 x_e$	$\frac{K\omega_0^2}{(j\omega)^2+2D\omega_0(j\omega)+\omega_0^2}$

Tab. 3.2 Grundsysteme von Regelkreisgliedern und ihre Übertragungsfunktion

d. h. im eingeschwungenen Zustand. Mit steigender Frequenz treten zunehmend Zeitverzögerungen auf, was durch eine Phasenverschiebung und Amplitudenveränderung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße einhergeht.

3.1.1.3 Aufbau eines Regelkreises

Die Aufgabe eines Regelkreises besteht darin, eine physikalische Größe innerhalb einer Anlage entweder konstant zu halten oder nach einem vorgeschriebenen Programm zu ändern und dabei den Einfluss einwirkender Störgrößen zu kompensieren. Ein Regelkreis hat allgemein den in Bild 3.5 gezeigten Aufbau, wobei die folgenden regelungstechnischen Fachbegriffe üblich sind [ABEL14]:

- *Regelstrecke:*
  Die zu regelnde Anlage, in der eine oder mehrere Größen (Regelgrößen) gegen äußere Einflüsse möglichst konstant gehalten werden oder vorgegebenen Sollwerten möglichst fehlerfrei folgen sollen.
- *Regler:*
  Apparatur zur Bildung der Differenz zwischen Soll- und Istwert, d. h. der Regelabweichung und Betätigung des Stellglieds nach einem vorgegebenen dynamischen Eigenverhalten (z. B. P-, I- oder PI-Verhalten).
- *Regelkreis:*
  Verkettung von Regelstrecke mit Regler.
- *Regelgröße:*
  Veränderliche, die für den bestimmungsgemäßen Betrieb der Regelstrecke konstant gehalten oder gezielt verändert werden soll.
- *Istwert:*
  Momentanwert der Regelgröße.
- *Regelabweichung:*
  Differenz zwischen Führungs- und Regelgröße.
- *Führungsgröße:*
  Vorgegebener, zeitlich konstanter oder variabler Sollwert der Regelgröße.
- *Stellgröße:*
  Veränderliche zur Beeinflussung des Energiestroms der Strecke und damit der Regelgröße. Die Stellgröße ist der Reglerausgang.
- *Stellglied:*
  In der Regelstrecke eingebautes Element zur Steuerung des Energiestroms (z. B. Ventil).

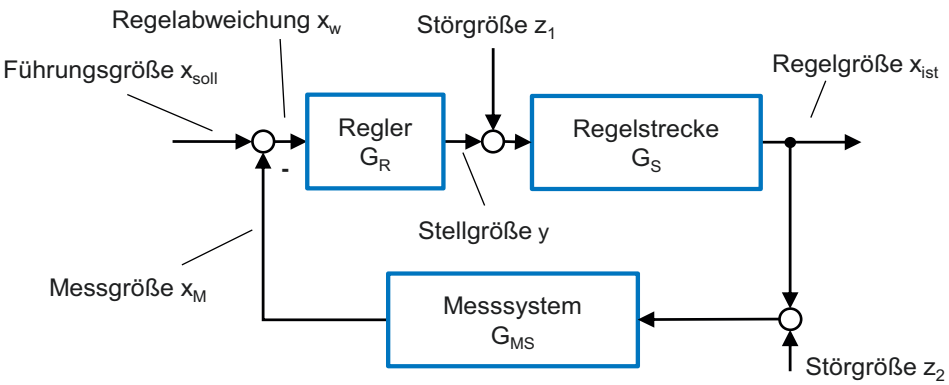


Bild 3.5 Strukturbild eines Regelkreises

- *Störgröße:*
  Jede Einflussgröße, welche die vorgegebene Regelgröße zu ändern versucht (z. B. Belastung).

3.1.1.4 Wirkungsplan (Blockschaltbild)

Der Ablauf eines Regelungsvorgangs wird durch das Zeitverhalten der einzelnen Regelkreisglieder und durch die Art ihrer Zusammenschaltung (Struktur der Regelanlage) bestimmt.

Der Wirkungsplan zeigt in schematischer Form die Verknüpfung der einzelnen Kreiselemente, ◘ Bild 3.6. Zur Kennzeichnung des Zeitverhaltens der einzelnen Elemente werden die zugehörigen Gleichungen oder die einzelnen Übergangsfunktionen mit in die jeweiligen Blöcke eingezeichnet. Die Signallinien können sich innerhalb eines Regelkreises verzweigen oder zusammentreffen. So entstehen Verzweigungs- und Additionsstellen im Wirkungsplan. Bei Verzweigungsstellen wird die Wirkungslinie im Wirkungsplan geteilt und läuft von dort gleichzeitig zu verschiedenen Regelkreisgliedern weiter. Jeder Pfad erhält dasselbe Signal.

In Additionsstellen treffen verschiedene Signale zusammen und überlagern sich dort vorzeichengerecht. Die abgehende Größe ergibt sich aus Subtraktion bzw. Addition der ankommenden Größen. Bei den Additionsstellen sind immer die Vorzeichen für die eingehenden Größen anzugeben.

In einem Regelkreis sind mehrere Einzelübertragungssysteme miteinander verbunden, wobei jedes einzelne in seinem Zeitverhalten durch seinen Frequenzgang beschrieben wird. Zum Ermitteln des Gesamtfrequenzgangs sind einige Rechenregeln erforderlich, ◘ Bild 3.7. Der Vorteil der Frequenzgangdarstellung liegt darin, dass die in Regelkreisen vorkommenden Serienschaltungen und Gegenkopplungen durch einfache Additionen und Multiplikationen der komplexen Einzelfrequenzgänge berechnet werden können.

3.1.1.5 Stabilität von Regelkreisen

Die Feststellung, ob ein Regelkreis stabil ist oder nicht, ist eine der wichtigsten Aufgaben bei der mathematischen Untersuchung von Regelkreisen. Stabilität im regelungstechnischen Sinn bedeutet, dass ein von außen „angestoßenes" System nach Wegfall der Anregung Schwingungen mit abklingender Amplitude ausführt, also zur Ruhe kommt. Ein instabiles System antwortet auf ein Eingangssignal mit einem monoton oder oszillierend ansteigenden Ausgangssignal. Dabei wird das Gesamtsystem funktionsuntüchtig; dies führt in manchen Fällen zur Zerstörung der Anlage. Für die Beurteilung der Stabilität oder Instabilität eines Regelkreises sind eine Reihe von Stabilitätskriterien entwickelt worden.

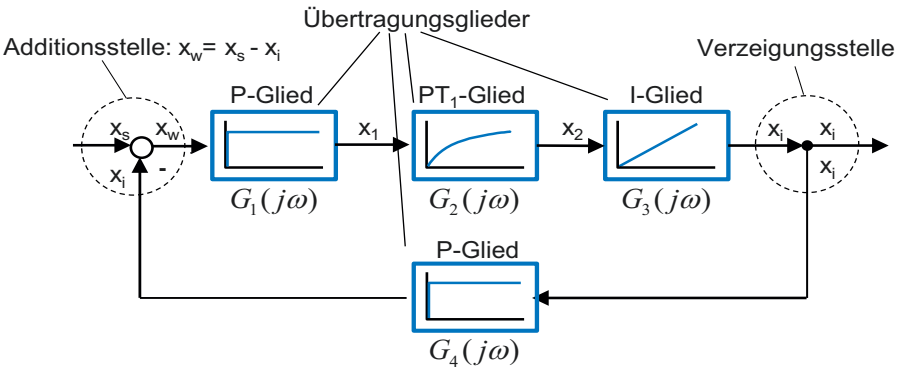
Für lineare Systeme gilt: Ein stabiler Regelkreis ist für jedes beliebige Eingangssignal stabil und ein instabiler Regelkreis ist auch für jedes Eingangssignal instabil. Die Stabilität eines Systems hängt dabei nur vom homogenen Teil der Differenzialgleichung ab, in dem die Regelgröße x_a und ihre zeitlichen Ableitungen auftreten (linker Teil von Gleichung (3.2)).

Zur Lösung der homogenen Differenzialgleichung eines Systems n-ter Ordnung mit konstanten Koeffizienten werden die Nullstellen der „charakteristischen Gleichung" benötigt [LUNZ08]:

$$a_n\lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + ... + a_1\lambda + a_0 = 0$$
$$x_h(t) = \sum_{i=1}^{n} C_i e^{\lambda_i t} \quad \text{(Lösung der homogenen DGL)} \tag{3.16}$$

Die Koeffizienten C_i ergeben sich aus Anfangs- und Randbedingungen. Ein Übertragungssystem ist dann stabil, wenn die Lösung der homogenen Differenzialgleichung für t gegen ∞ gegen Null strebt, d. h. jeder Summand von Gleichung (3.16) muss für große Zeitwerte verschwinden:

$$\lim_{t\to\infty} C_i \cdot e^{\lambda_i \cdot t} = 0 \text{ für i = 1,..., n} \tag{3.17}$$



◘ **Bild 3.6** Darstellung eines Regelkreises im Wirkungsplan

$$G_{ges}(j\omega) = \frac{G_1(j\omega)G_2(j\omega)G_3(j\omega)}{1 + G_1(j\omega)G_2(j\omega)G_3(j\omega)G_4(j\omega)}$$

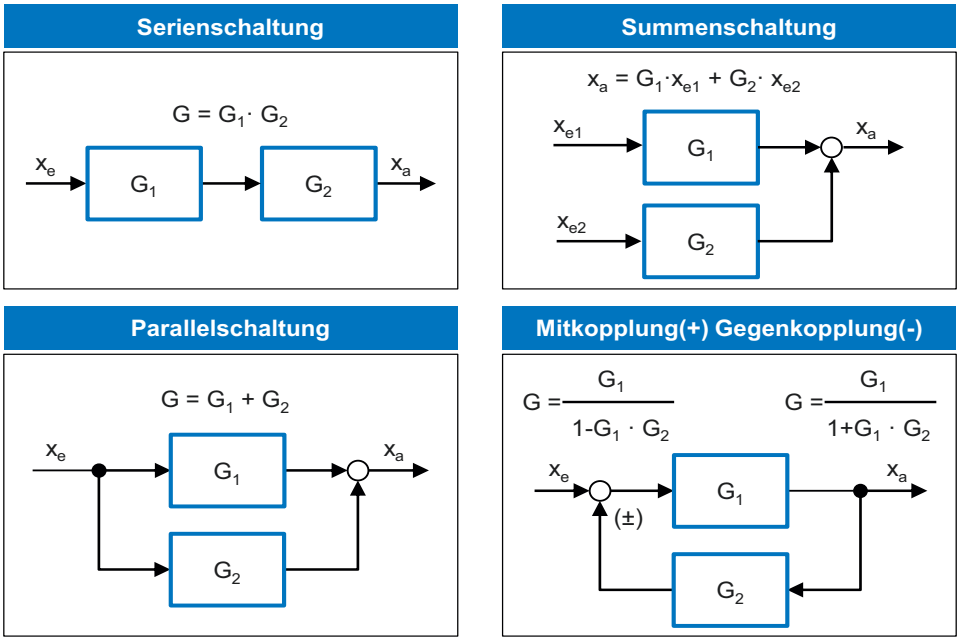


Bild 3.7 Verknüpfungsmöglichkeiten von Regelkreisgliedern

Damit lautet die Stabilitätsbedingung:

$$Re\{\lambda_i\} < 0 \text{ für i} = 1,\ldots, \text{n} \tag{3.18}$$

Ein Regelkreis ist folglich stabil, wenn alle Nullstellen der charakteristischen Gleichung negative Realteile aufweisen. Durch die Gleichheit der Nullstellen des charakteristischen Polynoms und den Pollstellen der Übertragungsfunktion, ist die Aussage auch auf die Polstellen der Übertragungsfunktion übertragbar.

Algebraische Stabilitätskriterien sind nur anwendbar, wenn die Differenzialgleichung oder ein analytischer Ausdruck für den Frequenzgang oder die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises bekannt sind. Vielfach sind solche Ausdrücke aber nicht vorhanden. Eine wesentliche Vereinfachung bietet das Stabilitätskriterium von Nyquist.

Dieses Stabilitätskriterium geht vom Frequenzgang $G_0(j\omega)$ des offenen Regelkreises aus. Dazu wird der Regelkreis an beliebiger Stelle, z. B. vor dem Regler, aufgetrennt, Bild 3.8, sodass eine Reihenschaltung von Regler und Strecke entsteht. Der Frequenzgang $G_0(j\omega)$ des offenen Kreises ergibt sich dann durch Multiplikation der Einzelfrequenzgänge.

Stabilitätsprüfung mit Hilfe der Ortskurve:

Zur Stabilitätsprüfung wird der Frequenzgang $G_0(j\omega)$ des aufgeschnittenen Regelkreises als Ortskurve dargestellt. Es wird geprüft, an welcher Stelle die Ortskurve die reelle Achse schneidet. Die Lage des Schnittpunkts ist das Kriterium für Stabilität oder Instabilität des Systems. Für alle Punkte auf der positiven reellen Achse haben Eingangs- und Ausgangsschwingungen gleiche Phasenlage. Ist für diesen Fall die Amplitude der Ausgangsschwingung kleiner als die der Eingangsschwingung, so ist der Regelkreis stabil. Geht die Ortskurve $G_0(j\omega)$ durch den kritischen Punkt P_k ($Re\{G_0(j\omega)\} = -1$; $Im\{G_0(j\omega)\} = 0$), d. h. haben Eingangs- und Ausgangsschwingung des aufgetrennten Regelkreises gleiche Amplituden, so befindet sich das System am Stabilitätsrand. Liegt der Schnittpunkt der Ortskurve mit der reellen Achse links vom kritischen Punkt P_k, so ist der Regelkreis instabil (Bild 3.8).

Die vereinfachte Stabilitätsbedingung nach Nyquist gilt, wenn der aufgeschnittene Regelkreis $G_0(j\omega)$ stabil ist oder integrierendes Verhalten aufweist. Die Bedingung lautet [ABEL14]:

$$\begin{aligned} \text{Stabilität:} \quad & Re\{G_0(j\omega)\} > -1 \\ \text{Stabilitätsgrenze:} \quad & Re\{G_0(j\omega)\} = -1 \text{ bei } Im\{G_0(j\omega)\} = 0 \\ \text{Instabilität:} \quad & Re\{G_0(j\omega)\} < -1 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Stabilitätsprüfung mit Hilfe des Bode-Diagramms, Amplituden- und Phasenreserve

Analog zur Stabilitätsuntersuchung mit Hilfe der Ortskurve können auch dem Bode-Diagramm des Frequenzgangs $G_0(j\omega)$ Informationen entnommen werden, rechts im Bild 3.8. Zur Kennzeichnung des Schwingungsverhaltens können die Amplitudenreserve A_R und die Phasenreserve α_R eingeführt werden. Sie beschreiben den Abstand der Ortskurve vom kritischen Punkt.

Die Amplitudenreserve A_R ist der Faktor, mit dem der statische Übertragungsfaktor des aufgeschnittenen Regelkreises $G_0(j\omega)$ multipliziert werden muss, damit der zugehörige geschlossene Regelkreis $G(j\omega)$ am Stabilitätsrand ist,

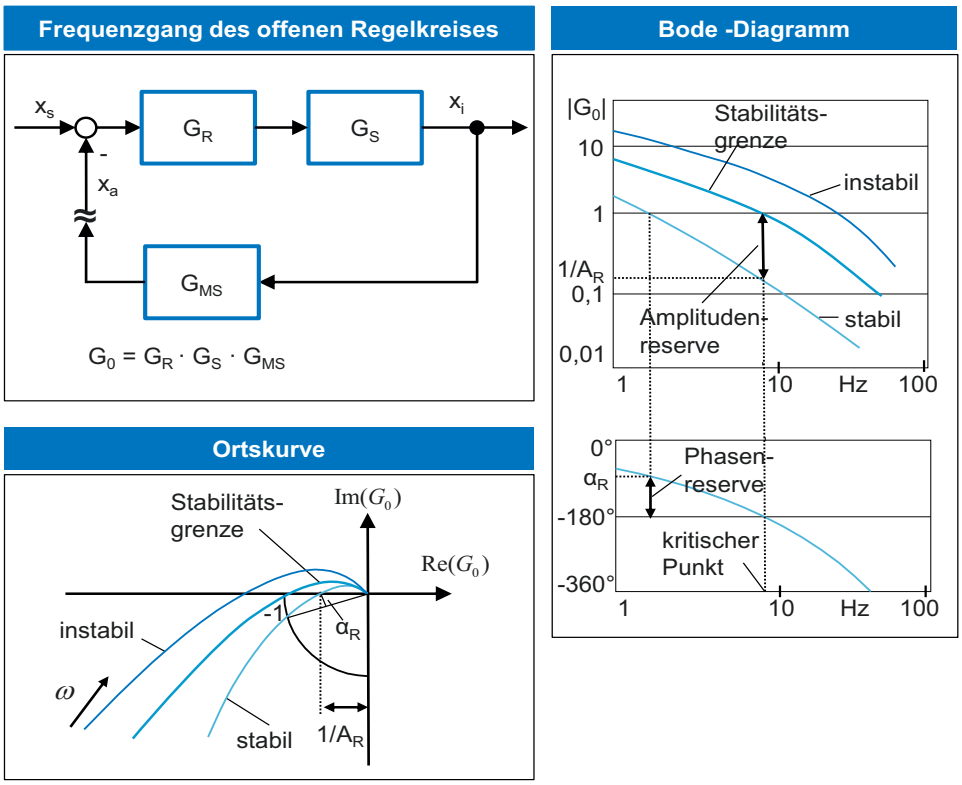


Bild 3.8 Stabilitätskriterium nach Nyquist

Gleichung (3.20).

$$A_R = \frac{1}{|G_0(j\omega_\pi)|} \quad \text{mit } \varphi_0(\omega_\pi) = -\pi \tag{3.20}$$

Die Phasenreserve α_R ist der Winkel, den ein Zeiger zu dem Punkt, bei dem die Ortskurve einen Kreis um den Ursprung mit dem Radius 1 schneidet, mit der negativ reellen Achse bildet, Gleichung (3.21), Bild 3.8, [ABEL14].

$$\alpha_R = \varphi_0(\omega_d) + \pi \quad \text{mit } |G_0(j\omega_d)| = 1 \tag{3.21}$$

Für einen Regelkreis am Stabilitätsrand gilt $A_R = 1$ und $\alpha_R = 0$. Stabile Regelkreise haben eine Amplitudenreserve $A_R > 1$ und eine positive Phasenreserve α_R. Dieses Kriterium ist für den geschlossenen Regelkreis G_1 mit seiner Ortskurve des aufgeschnittenen Regelkreises $G_{0,1}$ in Bild 3.9 erfüllt.

3.1.1.6 Einstellregeln für analog arbeitende Regler

Zur Optimierung des dynamischen Verhaltens des Regelkreises versucht man, die dynamischen Eigenschaften des Reglers auszulegen. Tab. 3.3 zeigt eine Zusammenstellung der am häufigsten verwendeten Reglertypen und deren beschreibende Kenngrößen.

Die Aufgabe beim Aufbau von Regelkreisen besteht hauptsächlich darin, den gesamten Regelkreis so zu dimensionieren, dass das Gesamtsystem betriebsfähig ist, d. h. ausreichend schnell, ohne zu großes Überschwingen oder Instabilität. Die Abstimmung des Reglers kann zum Einen mit den in ▶ Kap. 3.1.1.5 beschriebenen analytischen Verfahren vorgenommen werden. Eine andere Vorgehensweise besteht darin, aus zu messenden Kennwerten der Strecke der zu regelnden Anlage die optimalen Einstellparameter für den Regler zu ermitteln.

Ein Verfahren geht von der gemessenen oder berechneten Übergangsfunktion der Regelstrecke aus. Das Prinzip des Messvorgangs ist im Bild 3.9 dargestellt. In den Messvorgang sind auch die Stellglieder und Messwertgeber mit einbezogen. Der Sprung wird an der Auftrennstelle hinter dem Reglerausgang angelegt und die Sprungantwort der Regelstrecke vor Eintritt in den Regler aufgezeichnet.

Wie Bild 3.9 zeigt, werden durch die Konstruktion der Wendetangente die Ersatzgrößen Verzugszeit T_u und Ausgleichszeit T_g gewonnen, die zusammen mit dem Übertragungsfaktor der Strecke

$$K_s = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{3.22}$$

das dynamische und statische Verhalten der Regelstrecke ausreichend genau beschreiben. Für die Zeitverhältnisse $T_g/T_u > 3$ können die Einstellparameter für Regler mit Hilfe von Tab. 3.4 berechnet werden.

Ein anderer Weg zur Ermittlung der Reglerparameter basiert auf praktischen Untersuchungen an einem geschlosse-

nen Regelkreis. Unabhängig vom Typ des zu realisierenden Reglers wird das zu regelnde System zunächst in einem Regelkreis mit P-Regler betrieben. Ausgehend vom stabilen Betrieb wird der Verstärkungsfaktor K_R des P-Reglers so weit vergrößert, bis der Regelkreis gerade beginnt, Dauerschwingungen auszuführen. Der dabei erreichte Verstärkungsfaktor K_{Rkrit} und die Periodendauer T_{krit} der sich ergebenden Dauerschwingung bilden die Grundlagen zur Berechnung der Reglerparameter. Für verschiedene Reglertypen können die Einstellwerte nach dem Schwingversuch aus ◘ Tab. 3.5 entnommen werden [ABEL06].

3.1.2 Lineare zeitdiskrete Übertragungssysteme

Lageregler, Drehzahlregler und seit einigen Jahren auch Stromregler werden in modernen Steuerungen und Antriebsverstärkern über Software auf Mikroprozessoren oder Mikrocontrollern realisiert. Durch die sequenzielle Abarbeitung der entsprechenden Programmteile arbeiten diese Regler nicht kontinuierlich, sondern in einem festgelegten Zeittakt. Systeme dieser Art werden als zeitdiskrete Systeme bezeichnet.

◘ **Tab. 3.3** Zusammenstellung häufig verwendeter Reglerstrukturen und deren Kenngrößen

Regler	Differentialgleichung	Übertragungsfunktion
P	$x_a(t) = K_R x_e(t)$	$\frac{X_a(j\omega)}{X_e(j\omega)} = K_R$
I	$x_a(t) = K_I \int x_e(t)dt$	$\frac{X_a(j\omega)}{X_e(j\omega)} = K_I \frac{1}{j\omega}$
PI	$x_a(t) = K_R\left[x_e(t) + \frac{1}{T_n}\int x_e(t)dt\right]$	$\frac{X_a(j\omega)}{X_e(j\omega)} = K_R\left[1 + \frac{1}{T_n \cdot (j\omega)}\right]$
PID	$x_a(t) = K_R\left[x_e(t) + \frac{1}{T_n}\int x_e(t)dt + T_v \frac{dx_e(t)}{dt}\right]$	$\frac{X_a(j\omega)}{X_e(j\omega)} = K_R\left[1 + \frac{1}{T_n \cdot (j\omega)} + T_v \cdot (j\omega)\right]$

P: Proportional
I: Integral
D: Differenzial

K_I: integraler Verstärkungsfaktor
K_R: proportionaler Verstärkungsfaktor
T_n: Nachstellzeit
T_v: Vorhaltzeit

◘ **Tab. 3.4** Einstellwerte für Reglereinstellung nach Sprungantwort der Regelstrecke für $T_g/T_u \geq 3$. Nach: Chien, Hrones und Reswick

Regler	Parameter	Aperiodischer Regelverlauf	Regelverlauf mit 20% Überschwingen
P	K_R	$\frac{0{,}3}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0{,}7}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
PI	K_R	$\frac{0{,}35}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0{,}6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
	T_n	$1{,}2 \cdot T_g$	$1 \cdot T_g$
PID	K_R	$\frac{0{,}6}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$	$\frac{0{,}95}{K_S} \cdot \frac{T_g}{T_u}$
	T_n	$1 \cdot T_g$	$1{,}35 \cdot T_g$
	T_v	$0{,}5 \cdot T_u$	$0{,}47 \cdot T_u$

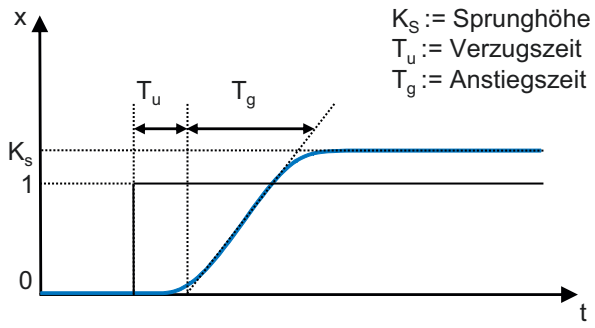
Reglerkenngrößen:
K_R: Verstärkungsfaktor
T_n: Nachstellzeit
T_v: Vorhaltzeit

Kenngrößen aus der Sprungantwort:
K_S: Verstärkungsfaktor der Regelstrecke
T_g: Ausgleichszeit
T_u: Verzugszeit

3.1.2.1 Darstellung zeitdiskreter Systeme

Da die Mehrzahl der zu regelnden Systeme (Regelstrecken) zeitkontinuierlich arbeitet, ist es zweckmäßig, für zeitdiskret arbeitende Übertragungssysteme eine Ersatzdarstellung zu definieren, bei der Eingangs- und Ausgangsgrößen ebenfalls wie zeitkontinuierliche Signale zu behandeln sind, ◘ Bild 3.10.

Im Unterschied zu analog arbeitenden Systemen, auf die das zeitkontinuierliche Eingangssignal kontinuierlich einwirkt, wird bei zeitdiskreten Systemen das Eingangssignal $f_e(t)$ in diskreten, äquidistanten Intervallen T_0 abgefragt. Diese Diskretisierung wird als „Abtastung" bezeichnet. So entsteht eine Folge von Signalwerten $f_e(k \cdot T_0)$. Benötigt das nachgeschaltete Übertragungssystem wieder zeitkontinuierliche Signale, erfolgt eine Rückumsetzung mittels eines Halteglieds. Das Halteglied erzeugt aus einem Eingangsimpuls $f_e(k \cdot T_0)$ eine betragsgleiche Ausgangsgröße $f_a(t)$ und hält diese bis zum Eintreffen des nächsten Eingangsimpulses $f_e((k+1) \cdot T_0)$ konstant. Es entsteht ein treppenförmiger Verlauf der Ausgangsgröße, deren äquivalenter kontinuierlicher Verlauf um näherungsweise $T_0/2$ im Vergleich zur Eingangsfunktion zeitlich versetzt ist.



◘ **Bild 3.9** Messmethode zur Identifikation der Übergangsfunktion

Man unterscheidet bei der regelungstechnischen Behandlung zeitdiskreter Systeme im Hinblick auf eine Analyse des dynamischen Übertragungsverhaltens sowie bei Stabilitätsbetrachtungen zweckmäßigerweise zwei Fälle:

$$T_0 \leq T_g / 10 \quad \text{quasi kontinuierlich,} \tag{3.23}$$

$$T_0 > T_g / 10 \quad \text{zeitdiskret.} \tag{3.24}$$

Ist die Ausgleichszeit der Regelstrecke T_g (◘ Bild 3.9) mehr als zehnfach so groß wie die Abtastzeit T_0 ($T_g \geq 10\, T_0$), so hat der Abtastprozess keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtdynamik des Systems. Diese sogenannten quasikontinuierlichen Abtastsysteme können folglich wie kontinuierliche Systeme mit den Regeln aus ▶ Kap. 3.1.1 behandelt werden. Lediglich bei der Funktion von Abtaster und Halteglied ist ein zwischengeschaltetes Totzeitglied mit der Totzeit $T_t = T_0/2$ zu berücksichtigen.

Liegen andere Verhältnisse von Abtastzeit T_0 und Ausgleichszeit T_g vor ($T_g < 10 T_0$), so bestimmt der Abtastvorgang wesentlich die Dynamik des Gesamtsystems. Dieser Einfluss ist daher nicht zu vernachlässigen. In diesem Fall sind andere mathematische Hilfsmittel heranzuziehen, insbesondere die z-Transformation, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

3.1.2.2 z-Transformation

Zur Analyse des dynamischen Verhaltens zeitdiskreter Systeme mit $T_g < 10\, T_0$ wendet man die z-Transformation an [ABEL14]. Diese ermöglicht analog zur Laplace-Transformation eine vereinfachte mathematische Beschreibung diskret arbeitender Systeme.

◘ **Tab. 3.5** Einstellwerte für Reglereinstellung nach einem Schwingversuch am Stabilitätsrand. Nach: Ziegler und Nichols

Regler	Verstärkungsfaktor	Nachstellzeit	Vorhaltezeit
P	$0{,}5 \cdot K_{Rkrit}$	-	-
PI	$0{,}45 \cdot K_{Rkrit}$	$0{,}85 \cdot T_{krit}$	-
PID	$0{,}6 \cdot K_{Rkrit}$	$0{,}5 \cdot T_{krit}$	$0{,}12 \cdot T_{krit}$

Reglerkenngrößen:
K_R: Verstärkungsfaktor
T_n: Nachstellzeit
T_v: Vorhaltzeit

Kenngrößen aus Schwingversuch:
K_{Rkrit}: Verstärkungsfaktor am Stabilitätsrand
T_{krit}: Schwingungsperiodendauer

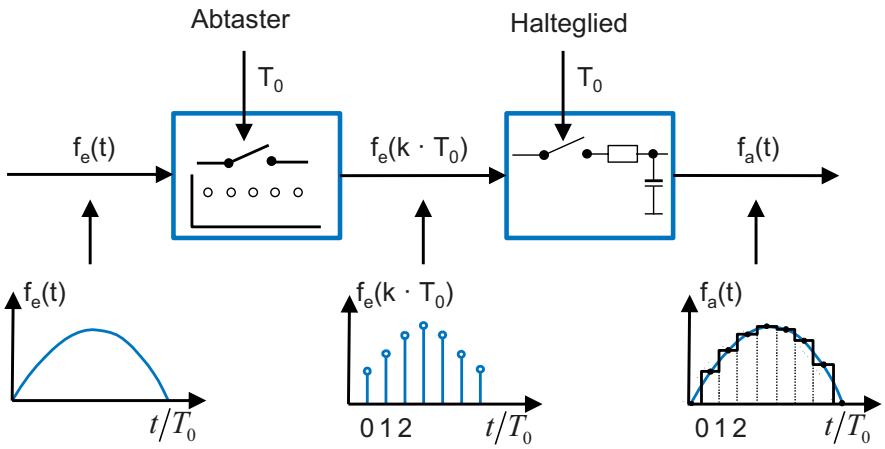


Bild 3.10 Funktionsweise eines Abtast- und Halteglieds

Eine stetige, zeitkontinuierliche Funktion $f^*(t)$ wird durch den Abtaster in Impulswerte (Gewichtsfunktion) digitalisiert und in Verbindung mit dem Halteglied in einen treppenförmigen Verlauf $f(t)$ umgeformt. Die Beschreibung des stufenförmigen Verlaufs wird durch eine Addition und Subtraktion von Sprungfunktionen $\sigma(t)$ ermöglicht, deren Höhe durch die Funktionswerte f_k bestimmt ist. Somit folgt für $f(t)$:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f_k \left(\sigma(t - k \cdot T_0) - \sigma(t - (k+1) \cdot T_0) \right) \tag{3.25}$$

In den Laplace-Bereich transformiert ergibt sich:

$$\begin{aligned} \mathfrak{L}\{f(t)\} &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{s} f_k \left(e^{-k \cdot T_0 \cdot s} - e^{-(k+1) \cdot T_0 \cdot s} \right) \\ &= \frac{1 - e^{-T_0 \cdot s}}{s} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} f_k \cdot e^{-k \cdot T_0 \cdot s} \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\mathfrak{L}\{f(t)\} = G_H(s) \cdot F_k(s) \tag{3.27}$$

$G_H(s)$ stellt den Frequenzgang der Haltefunktion dar, $F_k(s)$ gibt die Wertefolge der abgetasteten Funktion im Laplace-Bereich wieder. Ersetzt man im Ausdruck

$$F_k(s) = \sum_{k=0}^{\infty} f_k \cdot e^{-k \cdot T_0 \cdot s} \tag{3.28}$$

$e^{T_0 \cdot s}$ durch z, so erhält man die z-Transformierte der Impulsfolge f_k

$$F(z) = \mathfrak{Z}\{f_k\} = \sum_{k=0}^{\infty} f_k \cdot z^{-k} \tag{3.29}$$

Diese setzt sich aus den Funktionswerten f_k sowie einem Faktor z^{-k} zusammen. Der Ausdruck $z{-}k$ entspricht einer Verschiebung um k Abtastschritte, also um die Zeit $k \cdot T_0$. Daher kann z^{-1} als Operator interpretiert werden, der eine Verschiebung um einen Abtastschritt bewirkt.

Eine Zusammenstellung der Rechenoperationen mit diskreten Funktionen im Zeitbereich und den zugehörigen Operationen im z-Bereich zeigt Tab. 3.6.

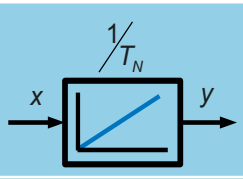
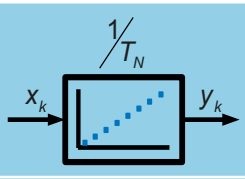
Eigenschaft	Rechenregel
Definition	$F(z) = \mathfrak{Z}\{f_k\} = \sum_{k=0}^{\infty} f_k \cdot z^{-k}$
Linearität	$\mathfrak{Z}\{a_1 \cdot f_k + a_2 \cdot g_k\} = a_1 \cdot F(z) + a_2 \cdot G(z)$
Linksverschiebung	$\mathfrak{Z}\{f_{k+m}\} = z^{+m} \cdot \left[F(z) - \sum_{i=0}^{m-1} f_i \cdot z^{-i} \right]$
Rechtsverschiebung	$\mathfrak{Z}\{f_{k-m}\} = z^{-m} \cdot \left[F(z) + \sum_{i=1}^{m} f_{-i} \cdot z^{i} \right]$
Summenregel	$\mathfrak{Z}\left\{ \sum_{i=0}^{k} f_i \right\} = \frac{z}{z-1} \cdot F(z)$
Faltung	$\mathfrak{Z}\left\{ \sum_{i=0}^{k} f_i \cdot g_{k-i} \right\} = F(z) \cdot G(z)$
Anfangswert	$f_0 = \lim_{z \to \infty} F(z)$
Endwert	$\lim_{k \to \infty} f_k = \lim_{z \to 1} ((z-1) \cdot F(z))$

Tab. 3.6 Rechenregeln der z-Transformation

3.1.2.3 Lineare Differenzengleichungen

Analog zur Beschreibung kontinuierlicher Systeme durch eine Differenzialgleichung (Gleichung (3.2)) lässt sich das Verhalten eines zeitkontinuierlichen Systems zum Zeitpunkt k durch eine Differenzengleichung mit der Eingangsfolge u_k und der Ausgangsfolge y_k beschreiben.

Tab. 3.7 Darstellung eines kontinuierlichen und eines zeitdiskreten Integrators

zeitkontinuierlich	zeitdiskret
	
$y(t) = \frac{1}{T_N} \cdot \int_0^t x(t)dt$ Nachstellzeit: T_N	$y_k = \frac{T_0}{T_N} \cdot \sum_{i=0}^{k} x_i = y_{k-1} + \frac{T_0}{T_N} \cdot x_k$ Nachstellzeit: T_N Abtastzeit: T_0
Differentialgleichung: $\dot{y} = \frac{1}{T_N} \cdot x$ Laplace-Transformation: $s \cdot Y(s) = \frac{1}{T_N} \cdot X(s)$	Differenzengleichung: $\frac{y_k - y_{k-1}}{T_0} = \frac{1}{T_N} \cdot x_k$ z-Transformierte: $\frac{Y(z) - Y(z)z^{-1}}{T_0} = \frac{1}{T_N} \cdot X(z)$
Übertragungsfunktion: $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{T_N} \cdot \frac{1}{s}$	z-Übertragungsfunktion: $G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{T_0}{T_N} \cdot \frac{1}{1-z^{-1}} = \frac{T_0}{T_N} \cdot \frac{z}{z-1}$

$$a_m y_{k-m} + a_{m-1} y_{k-m+1} + \ldots + a_1 y_{k-1} + a_0 y_k = b_n u_{k-n} + b_{n-1} u_{k-n+1} + \ldots + b_1 u_{k-1} + b_0 u_k \quad (3.30)$$

Dabei muss auch im zeitdiskreten Fall die Stabilität des Systems gesichert sein. Die Stabilität ist – ähnlich der zeitkontinuierlichen Betrachtung – gegeben wenn alle Pole des Charakteristischenpolynoms in einem Einheitskreis um den Ursprung liegen. Somit gilt für ein stabiles System (vgl. ▶ Kap. 3.1.1.5):

$$\|\lambda_i\|_2 \leq 1 \quad (3.31)$$

Tab. 3.7 stellt am Beispiel eines kontinuierlichen und eines zeitdiskreten Integrators die verschiedenen Beschreibungsformen dar.

Löst man die Differenzengleichung eines zeitdiskreten Systems nach der Größe y_k auf, so erhält man direkt die Berechnungsvorschrift, die z. B. als Programm für eine Softwarerealisierung implementiert werden kann.

Für den zeitdiskreten PID-Regler mit der Eingangsfunktion x_k und der Ausgangsfolge y_k ergibt sich damit die folgende Differenzengleichung:

$$y_k = y_{k-1} + K_R \left(x_k \left(1 + \frac{T_v}{T_0} + \frac{T_0}{T_n} \right) - x_{k-1} \left(1 + 2\frac{T_v}{T_0} \right) + x_{k-2} \frac{T_v}{T_0} \right) \quad (3.32)$$

Für den Fall kleiner Abtastzeiten $T_0 < T_g/10$ lassen sich die Reglerparameter aus den Kriterien für K_R, T_n, T_v analoger PID-Regler berechnen. Damit können die Berechnungsmethoden für zeitkontinuierliche Regelkreise angewandt werden (▶ Kap. 3.1.1.6).

Der Rechner als Regler nutzt Gleichung (3.32), um die Stellgröße nach dem PID-Algorithmus zu berechnen. Dabei wird nicht nur die aktuelle Regelabweichung während des Abtastzeitpunktes x_k berücksichtigt, sondern auch die Werte der Stellgröße y_{k-1} vor einem Abtastzeitpunkt und die Regelabweichungen x_{k-1} und x_{k-2} vor einem bzw. zwei Abtastzeitpunkten.

Mit einer solchen Vorgehensweise ist man in der Lage, das Verhalten zeitkontinuierlicher PID-Regler im Rechner nachzubilden.

3.1.2.4 Einstellregeln für zeitdiskret arbeitende Regler

In Analogie zu den in ▶ Kap. 3.1.1.6 behandelten Einstellregeln für kontinuierliche Regler gibt es entsprechende Regeln für zeitdiskrete Regler. Die notwendigen Einstellparameter K_R, K_I und K_D werden aus Kenngrößen der Übergangsfunktion der Regelstrecke abgeleitet, Tab. 3.8. Dazu wird in einem Versuch die Sprungantwort der Regelstrecke aufgezeichnet, Bild 3.9, und daraus der Übertragungsfaktor K_S, die Verzugszeit T_u und die Ausgleichszeit T_g bestimmt.

Regler	Verstärkungs-faktor	Nachstellzeit	Vorhaltezeit
P	$\frac{1}{K_S}\frac{T_g}{T_u+T_0}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{K_S}\frac{T_g}{T_u+0,5\cdot T_0}-0,5\cdot K_I$	$\frac{0,27}{K_S}\frac{T_0\cdot T_g}{(T_u+0,5\cdot T_0)^2}$	-
PID	$\frac{1,2}{K_S}\frac{T_g}{T_u+T_0}-0,5\cdot K_I$	$\frac{0,6}{K_S}\frac{T_0\cdot T_g}{(T_u+0,5\cdot T_0)^2}$	$\frac{0,5}{K_S}\frac{T_g}{T_0}$

Reglerkenngrößen:
K_R: Verstärkungsfaktor
T_n: Nachstellzeit
T_v: Vorhaltzeit
T_0: Abtastzeit

Kenngrößen aus Schwingversuch:
K_S: Verstärkungsfaktor
T_g: Ausgleichszeit
K_I: integraler Verstärkungsfaktor
T_u: Verzugszeit

Tab. 3.8 Einstellregeln für zeitdiskrete Regler nach der Sprungantwort der Regelstrecke (für $T_u/T_g > 0{,}25$). Nach Takahashi

Regler	Verstärkungs-faktor	Nachstellzeit	Vorhaltezeit
P	$0,5\cdot K_{krit}$	-	-
PI	$0,45\cdot K_{krit}-0,5\cdot K_I$	$0,54\cdot\frac{K_{krit}}{T_{krit}}$	-
PID	$0,6\cdot K_{krit}-0,5\cdot K_I$	$1,2\cdot\frac{K_{krit}}{T_{krit}}$	$0,075\cdot K_{krit}\frac{T_{krit}}{T_0}$

Reglerkenngrößen:
K_R: Verstärkungsfaktor
T_n: Nachstellzeit
T_v: Vorhaltzeit
T_0: Abtastzeit

Kenngrößen aus Schwingversuch:
K_{krit}: Verstärkungsfaktor
T_{krit}: Periodendauer
K_I: integraler Verstärkungsfaktor

Tab. 3.9 Einstellregeln für zeitdiskrete Regler nach einem Schwingversuch am Stabilitätsrand (für $T_u/T_g > 0{,}25$). Nach Takahashi

Man kann die einzustellenden Parameter für den diskreten Regler auch einem Schwingversuch entnehmen. Dazu werden der kritische Reglerübertragungsfaktor K_{krit} und die zugehörige Periodendauer T_{krit} bestimmt, bei der der Kreis gerade instabil wird, Tab. 3.9.

3.1.2.5 z-Übertragungsfunktion

In Analogie zur Umwandlung der Differenzialgleichung eines Übertragungssystems mit der Laplace-Transformation in den Frequenzbereich $G(s)$ lässt sich die Differenzengleichung eines Systems mit Hilfe der z-Transformation in die Übertragungsfunktion $G(z)$ umwandeln. Die Übertragungsfunktion $G(z)$ ist wie folgt definiert:

$$G(z)=\frac{X_a(z)}{X_e(z)}=\frac{b_0+b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\ldots+b_mz^{-m}}{a_0+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+\ldots+a_nz^{-n}} \tag{3.33}$$

mit $X_a(z)$ als Ausgangsgröße des Systems,
$X_e(z)$ als Eingangsgröße des Systems,
a_i, b_i als Systemparameter.

Die Parameter a_i und b_i dieser Übertragungsfunktion lassen sich z. B. aus einem vorliegenden Ein- und Ausgangsgrößenverlauf ermitteln. Stellt man mit den jeweils zusammengehörenden Ein- und Ausgangsgrößen ein Gleichungssystem mit $m + n + 2$ Differenzengleichungen nach Gleichung (3.30) für verschiedene Abtastzeitpunkte auf, so erhält man ein lineares Gleichungssystem, aus dem sich die $m + n + 2$ unbekannten Parameter a_i und b_i berechnen lassen. Voraussetzung ist, dass die Gleichungen nicht linear abhängig sind, wie dies z. B. bei konstantem Ein- und Ausgangssignal der Fall ist.

Tab. 3.10 z-Transformation und zugehörige Laplace-Transformation

f(t)	F(s)	f(k)	F(z)
1	$\frac{1}{s}$	1	$\frac{z}{z-1}$
t	$\frac{1}{s^2}$	$k \cdot T_0$	$\frac{T_0 \cdot z}{(z-1)^2}$
t^2	$\frac{2}{s^3}$	$k^2 \cdot T_0^2$	$\frac{T_0^2 \cdot z \cdot (z+1)}{(z-1)^3}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$	e^{-akT_0}	$\frac{z}{z-e^{-aT_0}}$
$t \cdot e^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$	$k \cdot T_0 \cdot e^{-akT_0}$	$\frac{T_0 \cdot z \cdot e^{-aT_0}}{(z-e^{-aT_0})^2}$
$\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\sin(\omega k T_0)$	$\frac{z \cdot \sin(\omega \cdot T_0)}{z^2 - 2z\cos(\omega \cdot T_0)+1}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\cos(\omega k T_0)$	$\frac{z \cdot (z - \cos(\omega_0))}{z^2 - 2z\cos(\omega T_0)+1}$
$e^{-at}\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-akT_0}\sin(\omega k T_0)$	$\frac{z \cdot e^{-aT_0}\sin(\omega T_0)}{z^2 - 2ze^{-aT_0}\cos(\omega T_0)+e^{-2aT_0}}$
$e^{-at}\cos(\omega t)$	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$	$e^{-akT_0}\cos(\omega k T_0)$	$\frac{z^2 - ze^{-aT_0}\cos(\omega T_0)}{z^2 - 2ze^{-aT_0}\cos(\omega T_0)+e^{-2aT_0}}$

Stammen die Werte des Ausgangssignals aus einer Messung, so ist eine direkte Aufstellung und Lösung des Gleichungssystems in der Regel nicht zu empfehlen, da die unvermeidlichen Messungenauigkeiten das Ergebnis stark verfälschen. Parameteridentifikationsverfahren z. B. aus [ISER83] liefern hier bessere Ergebnisse. Diese ermitteln die gesuchten Parameter aus einer wesentlich größeren Anzahl von Messwerten und vermindern so den Einfluss von Messungenauigkeiten und Störgrößen. So minimiert z. B. das Least-Square-Verfahren das Quadrat des Fehlers zwischen dem mittels geschätzter Parameter berechneten Ausgangswert und dem tatsächlich gemessenen Ausgangswert.

Zusammenschaltungen diskreter Übertragungssysteme lassen sich unter Verwendung von z-Übertragungsfunktionen G(z) mit denselben Regeln wie bei kontinuierlichen Systemen berechnen, vgl. Bild 3.7. Für die z-Übertragungsfunktion eines Abtastsystems, bestehend aus Abtaster, Halteglied und kontinuierlicher Regelstrecke, ergibt sich die z-Übertragungsfunktion

$$G_z(z) = \frac{z-1}{z} Z\left\{\frac{G_s(s)}{s}\right\} = \frac{z-1}{z} Z\{H_s(s)\} \tag{3.34}$$

wobei $H_s(s)$ die laplacetransformierte Übergangsfunktion der Strecke darstellt. In den meisten Fällen ist analog zur Laplace-Transformation die z-Transformation mit Hilfe sogenannter Korrespondenztabellen leicht durchführbar, Tab. 3.10.

3.1.3 Feedforward-Controller zur Schleppfehlerkorrektur

Gängige Methoden zur Kompensation des Schleppfehlers basieren weitestgehend auf den Verfahren des Feedforward-Controllers. Der Unterschied zwischen dem Feedback- (hier sind alle bisher bekannten Verfahren wie P-Regler und andere Zustandsregler gemäß ▶ Kap. 3.1.4 eingeschlossen) und dem Feedforward-Controller besteht darin, dass anstelle der Soll-Ist-Abweichung die Solleingangsgröße mit einem im Vorwärtszweig liegenden zweiten Regler verarbeitet wird. Der eigentliche Regler (Feedback-Controller) bleibt erhalten. Der zweite Regler hat die Aufgabe, das Verzögerungsverhalten der Strecke bzw. des ganzen Lageregelkreises durch eine invertierte Modellsteuergröße zu kompensieren. Dies setzt

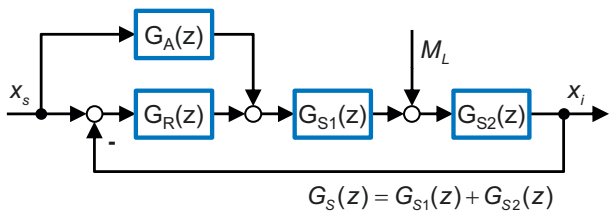
einerseits die genaue Kenntnis des Systems voraus, andererseits muss auch die Möglichkeit einer digitalen Signalverarbeitung vorhanden sein, da in einer analogen Schaltung die Umkehrung eines Systemmodells kaum realisierbar ist.

Man kann die Modellbildung des geschlossenen Regelkreises entweder anhand der bekannten Maschinendaten oder auch durch experimentelle Messungen an der Maschine gewinnen. Die Signalverarbeitung geschieht in diesem Fall durch den Steuerungsrechner. Es reicht in der Regel aus, den digitalen Lageregelkreis in Form einer z-Übertragungsfunktion zweiter Ordnung modellseitig zu beschreiben:

$$G(z)=\frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})}=\frac{b_0+b_1z^{-1}+\ldots}{a_0+a_1z^{-1}+a_2z^{-1}} \tag{3.35}$$

Bild 3.11 zeigt zwei grundsätzliche Schaltungen zur Korrektur des Bahnfehlers nach dem Prinzip des Feedforward-Controllers. Oben im Bild ist der Regelkreis durch ein Aufschaltelement erweitert, welches das dynamische Verhalten der Strecke exakt kompensieren soll. Dies ist genau dann der Fall, wenn das Übertragungsverhalten der Aufschaltung gleich dem Kehrwert des Übertragungsverhaltens der Strecke ($G_A(z)=G^{-1}{}_S(z)$) ist. In ähnlicher Weise zielt der Ansatz in der unteren Bildhälfte auf die Kompensation der Trägheit des Lageregelkreises ab, wenn $G_v(z)=1+G_R{}^{-1}(z)\cdot G_S{}^{-1}(z)$ ist. Ohne Berücksichtigung der Stellgrößenbegrenzung ist theoretisch eine hundertprozentige Kompensation in beiden Fällen möglich. In der Praxis wird jedoch die Verbesserung des Bahnverhaltens durch den Genauigkeitsgrad der Modellbildung bestimmt. Da keine absolut genaue Modellbildung möglich ist, kann auch nur eine Verbesserung der Bahnfehlerkorrektur erreicht werden, die so gut wie das Modell ist. Weiter treten Probleme wie Instabilität bei Invertierung des Systemmodells auf, die nur mit Hilfe spezieller mathematischer Verfahren gelöst werden können.

Aufschaltung



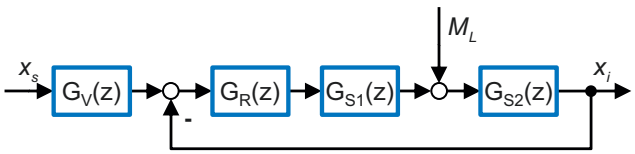
$$G_S(z)=G_{S1}(z)+G_{S2}(z)$$

$$G(z)=\frac{X_i(z)}{X_s(z)}=\frac{G_R(z)G_S(z)+G_A(z)G_S(Z)}{1+G_R(z)G_S(z)}$$

$$G_A(z)=G_S^{-1}(z)\Rightarrow G(z)=1$$

$$G_{stör}(z)=\frac{X_i(z)}{M_L(z)}=\frac{G_{S2}(z)}{1+G_R(z)G_{S1}(z)G_{S2}(z)}$$

Vorsteuerung



$$G_S(z)=G_{S1}(z)+G_{S2}(z)$$

$$G(z)=\frac{X_i(z)}{X_s(z)}=G_V(z)\frac{G_R(z)G_S(z)}{1+G_R(z)G_S(z)}$$

$$G_V(z)=1+G_R^{-1}(z)G_S^{-1}(z)\Rightarrow G(z)=1$$

$$G_{stör}(z)=\frac{X_i(z)}{M_L(z)}=\frac{G_{S2}(z)}{1+G_R(z)G_{S1}(z)G_{S2}(z)}$$

Bild 3.11 Grundschaltungen zur Bahnfehlerkorrektur nach dem Prinzip des Feedforward-Controllers

Wie das Bild 3.11 zeigt, ist eine Verbesserung des Folgeverhaltens bzw. Führungsverhaltens durch den Feedforward-Controller möglich. Das Störverhalten hingegen wird durch diese Maßnahme nicht verändert.

Für die Stabilität des invertierten Modells ist die Lage der Nullstellen von $G(z)$ entscheidend. Liegen diese innerhalb des Einheitskreises, so ist die sogenannte Inversstabilität gegeben. Man kann somit nach Bild 3.11 unten einen Feedforward-Controller entwerfen. Es empfiehlt sich die Anwendung eines zusätzlichen Tiefpassfilters, das zu der Vorsteuerung hinzugeschaltet wird, da der Lageregelkreis den hochfrequenten Ausgangssignalen aus der Vorsteuerung zur Kompensation der Systemträgheit aufgrund seiner begrenzten Bandbreite nur bis zu einer gewissen Frequenz folgen kann.

3.1.4 Zustandsregelung

Ein Übertragungssystem oder auch der gesamte Regelkreis lässt sich durch ein System von gewöhnlichen Gleichungen und Differenzialgleichungen, meist höherer Ordnung, im Zeitbereich beschreiben, die sich zu einer einzigen, das gesamte Systemverhalten beschreibenden zusammenfassen lassen. Neben der Darstellung dieser Differenzialgleichung in Form einer Übertragungsfunktion (Gleichung (3.11)) wird zu regelungstechnischen Untersuchungen auch die Zustandsraumdarstellung eingesetzt. Bei dieser wird der Zusammenhang zwischen den Ausgangsgrößen des Systems und den inneren, die Systemdynamik ebenfalls beeinflussenden Zustandsgrößen deutlich gemacht.

Dazu werden die Differenzialgleichungen in ein System gekoppelter Differenzialgleichungen erster Ordnung und gewöhnlicher Gleichungen umgewandelt. Dies geschieht durch Einführen von Zwischengrößen, den Zustandsgrößen [LUNZ08]. Zustandsgrößen haben die Eigenschaft, dass ihr

Verlauf über der Zeit nur von den Eingangsgrößen des Systems sowie den Anfangswerten der Zustandsgrößen, d. h. den Anfangsbedingungen, abhängen. So lassen sich die einzelnen Ableitungen der Ausgangsgröße, die in der systembeschreibenden Differenzialgleichung (Gleichung (3.2)) auftreten, als Zustandsvariablen verwenden.

Im Folgenden wird die Zustandsraumdarstellung zunächst anhand eines SISO-Systems (SISO: single input-single output) dargestellt.

3.1.4.1 Darstellung im Zustandsraum

Der Einfachheit halber erfolgt die Darstellung für ein System mit einer Differenzialgleichung n-ter Ordnung mit einer Eingangsgröße ohne zeitliche Ableitungen. Mit Hilfe einer geeigneten Transformation lässt sich jedes System mit einer Ordnung des Eingangspolynoms $\leq n$ in diese Form bringen, sodass die Darstellung allgemein anwendbar wird. Aus dem gleichen Grund wird an dieser Stelle auf die Darstellung eines Durchgriffs der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen verzichtet.

Aus der systembeschreibenden Differenzialgleichung n-ter Ordnung mit einer Eingangsgröße $u(t)$, der Ausgangsgröße $y(t)$ und ihrer zeitlichen Ableitung $y^{(n)}(t)$

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \ldots + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_0 u(t) \quad (3.36)$$

wird durch Einführen der Zwischengrößen $x_1(t)$, $x_2(t)$, … , $x_n(t)$

$$\begin{aligned} x_1(t) &= y(t) \\ x_2(t) &= \dot{y}(t) \\ x_3(t) &= \ddot{y}(t) \\ &\vdots \\ x_n(t) &= y^{(n-1)}(t) \\ \dot{x}_n(t) &= y^{(n)}(t) \end{aligned} \quad (3.37)$$

ein System von n-1 Differenzialgleichungen erster Ordnung

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) &= x_n(t) \end{aligned} \quad (3.38)$$

und einer Differenzialgleichung erster Ordnung der Form

$$\begin{aligned} \dot{x}_n(t) = &-\frac{a_0}{a_n} x_1(t) - \frac{a_1}{a_n} x_2(t) - \ldots \\ &- \frac{a_{n-1}}{a_n} x_n(t) + \frac{b_0}{a_n} u(t) \end{aligned} \quad (3.39)$$

ermittelt.

Das systembeschreibende Gleichungssystem setzt sich nunmehr aus Differenzialgleichungen (Gleichung (3.38) und Gleichung (3.39)) zusammen, die die Ableitungen der Zwischengrößen $x_i(t)$ und die Eingangsgröße $u(t)$ enthalten. Die Ausgangsgröße $y(t)$ tritt in den Differenzialgleichungen nicht auf, sie wird durch eine Zwischengröße ausgedrückt:

$$y(t) = x_1(t) \quad (3.40)$$

Fasst man die Zustandsgrößen x_1 … x_n in einem Vektor $\mathbf{x}$ zusammen, so lassen sich die Gleichung (3.38) bis Gleichung 3.40 in Vektorschreibweise darstellen (Regelungsnormalform):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & & 0 \\ & & \vdots & & \ddots & \vdots \\ -\frac{a_0}{a_n} & -\frac{a_1}{a_n} & -\frac{a_2}{a_n} & -\frac{a_3}{a_n} & \cdots & -\frac{a_{n-1}}{a_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \frac{b_0}{a_n} \end{bmatrix} \cdot u(t) \quad (3.41)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1\,0\,0 \cdots 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = x_1(t) \quad (3.42)$$

oder in zusammengefasster Matrizenschreibweise:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} \cdot u(t) \\ y(t) &= \mathbf{c} \cdot \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Die Vektordifferenzialgleichung Gleichung (3.41) wird als Zustandsdifferenzialgleichung bezeichnet, Gleichung (3.42) als Ausgangsgleichung; beide Gleichungen zusammen (Gleichung (3.43), als Zustandsgleichungen. Die Komponenten des Zustandsvektors $x_i(t)$ bestimmen für jeden Zeitpunkt t das System im n-dimensionalen Raum, dem Zustandsraum. Zur Darstellung eines Mehrgrößensystems im Zustandsraum werden die Ableitungen der n Zustandsgrößen $\dot{x}_i(t)$ als Funktion der n Zustandsgrößen $x_i(t)$ und der p Eingangsgrößen $u_i(t)$ dargestellt:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1\left(x_1(t), \ldots, x_n(t); u_1(t), \ldots, u_p(t)\right) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n(t) &= f_n\left(x_1(t), \ldots, x_n(t); u_1(t), \ldots, u_p(t)\right) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Die q Ausgangsgrößen $y_i(t)$ bilden ein Gleichungssystem gewöhnlicher Gleichungen als Funktion der Zustandsgrößen:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= g_1\left(x_1(t),\ldots,x_n(t)\right) \\ &\vdots \\ y_q(t) &= g_q\left(x_1(t),\ldots,x_n(t)\right) \end{aligned} \tag{3.45}$$

Für die Zustandsdarstellung in Matrizenschreibweise ergibt sich:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\cdot\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\cdot\mathbf{x}(t) \end{aligned} \tag{3.46}$$

mit:
$\dot{x}_i(t)$ als $n \times 1$ Ableitungsvektor der Zustandsgrößen,
$x(t)$ als $n \times 1$ Vektor der Zustandsgrößen,
$u(t)$ als $p \times 1$ Vektor der Eingangsgrößen,
$y(t)$ als $q \times 1$ Vektor der Ausgangsgrößen,
A als $n \times n$ Systemmatrix,
B als $n \times p$ Eingangsmatrix,
C als $q \times n$ Ausgangsmatrix.

Bild 3.12 zeigt die Blockschaltbilddarstellung von Gleichung (3.46). Die dort zusätzlich gezeigte Matrix **D** (bei SISO-Systemen der Skalar d) stellt einen direkten Durchgriff der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen dar. Ein solches Systemverhalten tritt bei realen Systemen nur in Ausnahmefällen auf. Daher wird die Matrix **D** im Weiteren nicht berücksichtigt.

Als Beispiel soll im Folgenden die Zustandsraumdarstellung eines Einmassenschwingers mit der Dämpfung D und der Eigenkreisfrequenz ω_0 ermittelt werden.

Ausgehend von der Differenzialgleichung zweiter Ordnung des Systems

$$\ddot{y} + 2D\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = \omega_0^2 u \tag{3.47}$$

erhält man mit Einführung der Zustandsgrößen

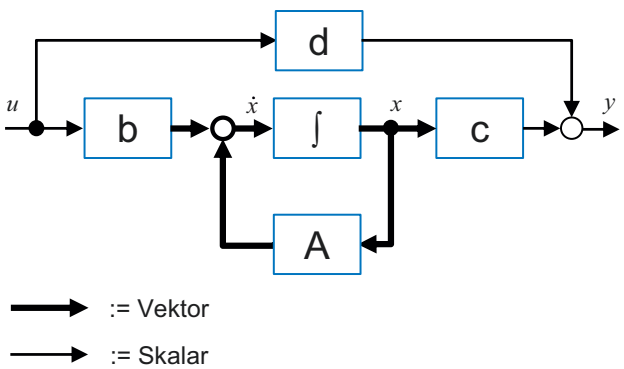


Bild 3.12 Zustandsraumdarstellung eines Eingrößensystems

$$\begin{aligned} x_1 &= y \\ x_2 &= \dot{y} \end{aligned} \tag{3.48}$$

die zwei gekoppelten Differenzialgleichungen erster Ordnung

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0^2 x_1 - 2D\omega_0 x_2 + \omega_0^2 u \end{aligned} \tag{3.49}$$

oder in Matrizenschreibweise:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2D\omega_0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}}\cdot\mathbf{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \omega_0^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{b}}\cdot\mathbf{u} \\ y &= \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}}\cdot\mathbf{x} \end{aligned} \tag{3.50}$$

3.1.4.2 Entwurf des Zustandsreglers

Ein Zustandsregler ist ein Regler, der die Zustandsgrößen des zu regelnden Systems über eine Reglermatrix **R** auf den Systemeingang zurückführt. Die Struktur des Regelkreises mit Regler zeigt Bild 3.13. Neben der Reglermatrix **R** wird noch eine Vorfiltermatrix **S** eingesetzt, welche ebenfalls das Verhalten des Gesamtsystems bestimmt.

Zur Dimensionierung der Reglermatrix **R** wurden eine Vielzahl verschiedener Verfahren entwickelt, die sich durch den Entwurfsansatz, die Anzahl der zurückgeführten Zustandsgrößen und das Entwurfsziel unterscheiden. Drei Verfahren für Eingrößensysteme (SISO-Systeme), die auf einer Rückführung aller Zustandsgrößen basieren, werden hier kurz vorgestellt.

Entwurf durch Polvorgabe

Bei einer Reglerauslegung durch Polvorgabe wird der Reglervektor **r** so bestimmt, dass die Pole der Übertragungsfunktion der Regelstrecke durch den Regler auf vorgegebene Werte verschoben werden. Bei Eingrößensystemen ist dies ohne Einschränkung möglich, d. h. jede beliebige Lage der Pole des Gesamtsystems kann (theoretisch) erreicht werden. Ausgangspunkt der Entwurfsaufgabe ist somit die Festlegung der Pole und damit die Aufstellung der Differenzialgleichung des gewünschten Systemverhaltens.

Die Pole der Übertragungsfunktion der Regelstrecke ergeben sich aus den Nullstellen des Nennerpolynoms:

$$\begin{aligned} &a_n\cdot y^{(n)}(t) + a_{n-1}\cdot y^{(n-1)}(t) + \ldots \\ &+ a_1\cdot\dot{y}(t) + a_0\cdot y(t) \end{aligned} \tag{3.51}$$

Soll das Nennerpolynom der Übertragungsfunktion von Regelstrecke und Regler die Form

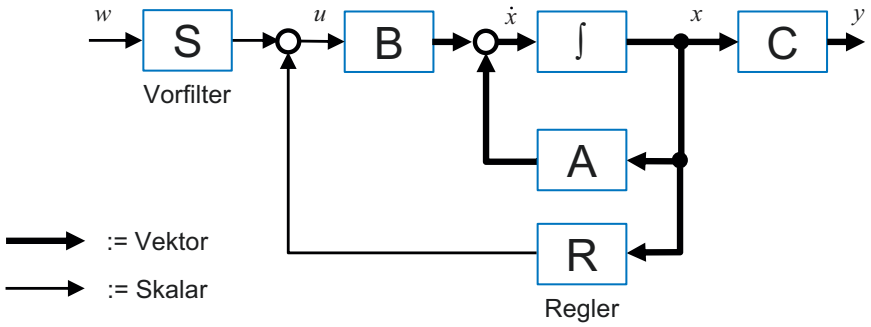


Bild 3.13 Regelstrecke mit Zustandsregler

$$p_n \cdot y^{(n)}(t) + p_{n-1} \cdot y^{(n-1)}(t) + \ldots + p_1 \cdot \dot{y}(t) + p_0 \cdot y(t) \tag{3.52}$$

haben, so gilt für den Reglervektor **r** nach [ACKE83]:

$$\mathbf{r}_R = [(p_0 - a_0) \quad (p_1 - a_1) \ \ldots \ (p_{n-1} - a_{n-1})] \tag{3.53}$$

Ein Problem dieses Verfahrens liegt darin, dass zwar immer ein Reglervektor für ein vorgegebenes Systemverhalten berechnet werden kann, aber das Entwurfsverfahren keine Möglichkeiten bietet, z. B. Stellgrößenbegrenzungen zu berücksichtigen, wie sie in realen Systemen immer vorhanden sind.

Am Beispiel des Einmassenschwingers mit der Zustandsraumdarstellung nach Gleichung (3.47) soll eine weitere Eigenschaft dieses Entwurfsverfahrens aufgezeigt werden. Wählt man für das Gesamtsystem die Lage der Pole so, dass das resultierende System die Dämpfung 1 sowie die Eigenkreisfrequenz ω_1 besitzt, so lautet die Differenzialgleichung für das Gesamtsystem:

$$\ddot{y} + 2\omega_1 \dot{y} + \omega_1^2 y = \omega_1^2 u \tag{3.54}$$

Für den Regler folgt damit aus Gleichung (3.53) und Gleichung (3.47):

$$\mathbf{r}_R = [(\omega_1^2 - \omega_0^2) \quad (2(\omega_1 - D\omega_0))] \tag{3.55}$$

Ausgeschrieben lautet das Regelgesetz:

$$u_r = \left(\omega_1^2 - \omega_0^2\right) y + 2(\omega_1 - D\omega_0)\, \dot{y} \tag{3.56}$$

Dieses Regelgesetz beschreibt einen PD-Regler, da sich die Reglerausgangsgröße aus der gewichteten Reglereingangsgröße sowie der gewichteten Ableitung der Reglereingangsgröße ergibt. Stationäre Genauigkeit kann mit einem solchen Reglertyp nicht immer erreicht werden. Dazu ist der Vorfilter S oder ein integrierender Regleranteil erforderlich.

Entwurf durch Optimierung eines quadratischen Gütemaßes

Wenn nicht direkt ein bestimmtes dynamisches Verhalten des Gesamtsystems, sondern z. B. die Minimierung der Regelabweichung Ziel der Entwurfsaufgabe ist, lässt sich die Reglermatrix **R** durch Lösung eines Optimierungsproblems ermitteln. Anstelle der Systemdynamik muss hierbei eine geeignete Kostenfunktion vorgegeben werden, die durch das Optimierungsverfahren minimiert wird. Typische Kostenfunktionen bewerten z. B. das Quadrat der Regelabweichung sowie das Quadrat der Eingangsgröße u, um auch die benötigte Stellenergie zu minimieren. Die Lösung dieses Optimierungsproblems führt auf eine quadratische Vektorgleichung, die Riccati-Gleichung, aus der sich die Reglermatrix ermitteln lässt [ACKE83].

Entwurf auf endliche Einstellzeit

Ist der Regler als Abtastsystem (d. h. zeitdiskret) aufgebaut, so lässt sich zeigen, dass es immer möglich ist, die Regelstrecke aus jedem Anfangszustand in endlich vielen Abtastschritten in jeden beliebigen Endzustand zu bringen. Die Entwurfsaufgabe dieses sogenannten Dead-Beat-Entwurfs besteht darin, zunächst eine optimale Eingangsfolge u_k zu bestimmen, die diese Anforderung erfüllt. Zu dieser Folge wird anschließend ein Regler entworfen, der die gewünschte Folge aus den Zustandsgrößen erzeugt. Theoretisch lässt sich ein System n-ter Ordnung in n Abtastschritten auf einen neuen Endzustand bringen. Natürlich können auch hier physikalische Begrenzungen des Systems durch den Regler nicht überwunden werden. Wird die optimale Stellgrößenfolge allerdings auf mehr als n Schritte ausgedehnt, so entstehen im Entwurf zusätzliche Freiheitsgrade, durch die zusätzliche Randbedingungen, z. B. die Berücksichtigung einer Stellgrößenbegrenzung, erfüllt werden können. Nachteil des Dead-Beat-Entwurfs ist die Parameterempfindlichkeit des Reglers. Weicht das tatsächliche Verhalten der Regelstrecke nur geringfügig von dem zum Entwurf verwendeten Modell ab, so sinkt die Regelungsqualität zumeist deutlich. Dies ist der Grund dafür, dass man die Dead-Beat-Regelung bei Werkzeugmaschinen-Vorschubantrieben selten antrifft. Variation der Position von Schlitten, Ständer usw. sowie die veränder-

ten Massen durch wechselnde Vorrichtungs- und Werkstückgewichte verändern das Streckenverhalten merklich.

3.2 Regelung von Vorschubantrieben

3.2.1 Vorschubantrieb als Regelkreis

3.2.1.1 Aufbau und Wirkungsweise der Lageregelung

Im Bild 3.14 ist der gerätetechnische Aufbau einer einzelnen Vorschubachse schematisch dargestellt. Der Motor treibt über eine Kupplung und einen Zahnriemen eine Gewindespindel an. Die Kugelrollmutter wandelt die rotatorische Bewegung der Kugelrollspindel in eine translatorische des Maschinenschlittens um.

Die Winkellage des Motors wird über einen Drehgeber erfasst. Mit Hilfe der Getriebeübersetzung (z. B. Übersetzungsverhältnis i des Zahnriemens oder Steigung h der Spindel) kann aus diesem Signal indirekt auch die Lage des Maschinenschlittens errechnet werden. Bei heutigen digitalen Antriebsverstärkern wird aus dem Lagesignal auch die Drehgeschwindigkeit des Motors abgeleitet. Auf einen zusätzlichen Tachogenerator kann daher verzichtet werden.

Heute üblich wird die Lage des Maschinentisches über ein direktes lineares Längenmesssystem ermittelt. Dies steigert die Genauigkeit der Bewegung, da Einflüsse wie Reibung, Spiel und geometrische Fehler im Antriebsstrang vom Messsystem erfasst werden können. Zur besseren Unterscheidung wird das direkt gemessene Lagesignal als x_m bezeichnet, das aus dem Drehgeber des Antriebs berechnete Signal als x_a. Bei heute üblichen Vorschubsystemen in Werkzeugmaschinen kann für die Lageregelung entweder das direkte oder das indirekte Messsystem verwendet werden.

Bild 3.15 zeigt die Regelungsstruktur, wie sie heute in den meisten Vorschubachsen in Werkzeugmaschinen zum Einsatz kommt. In dieser Darstellung werden die Wirkzusammenhänge im Antrieb dargestellt. Der mechanische Aufbau rückt hierbei in den Hintergrund. Die Geräte und elektrischen Antriebskomponenten finden sich jedoch auch in der Regelungsstruktur wieder.

Bei der Betrachtung der Regelkreise steht nicht das dynamische Verhalten der Mechanik im Vordergrund, sondern das der Regelung. Daher wird die Mechanik hier vereinfacht als ideal steif angenommen. Dazu muss lediglich das auf die Motorwelle reduzierte Massenträgheitsmoment J_{ges} berücksichtigt werden. Außerdem findet sich das Übersetzungsverhältnis der mechanischen Transferelemente (Spindelsteigung h und Übersetzung i) in der Konstanten K_G wieder.

Die Führungsgröße x_{soll} des Lageregelkreises wird zunächst mit der aktuellen Lage des Maschinenschlittens x_{ist} verglichen. Die Differenz dieser beiden Signale wird vom proportionalen Lageregler verstärkt. Die Stellgröße des Lagereglers wird an den unterlagerten Geschwindigkeitsregelkreis weitergegeben, dem wiederum ein Stromregelkreis unterlagert ist. Durch die Geschwindigkeitsrückführung und den Stromregler wird die Dynamik des Antriebs erheblich gesteigert und ein Überschwingen durch einen verbesserten Dämpfungsgrad vermieden.

Der Geschwindigkeitsregler im dargestellten Beispiel hat einen PI-Charakter, um kleinste Regelabweichungen ohne bleibenden Fehler ausregeln zu können. Der dem Geschwindigkeitsregler nachgeschaltete Stromregler erlaubt eine Beschleunigungssteuerung des Motors. Dadurch wird ein Überschwingen beim Beschleunigen und Abbremsen vermieden. Aus der Differenz zwischen dem

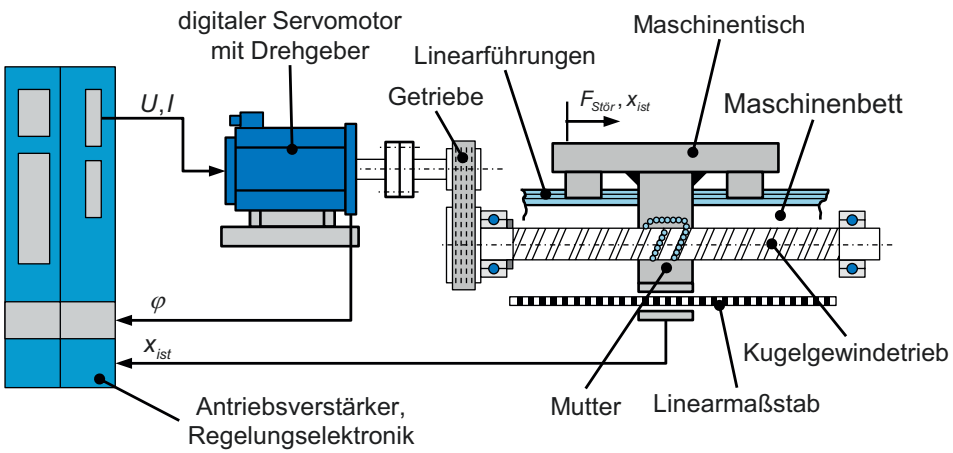


Bild 3.14 Schematischer Aufbau einer Vorschubachse

Sollwert des Geschwindigkeitsreglers v_{soll} und dem Drehzahlistwert v_{ist} wird – verknüpft mit der aktuellen Motorbelastung (Stromregelung) – die Stellgröße für den Motor gebildet. Der Leistungsverstärker wandelt die so gebildete Stellgröße in eine entsprechende Motorspannung U (vgl. Bild 3.14) um, die an den Wicklungen des Motors anliegt.

Entsprechend den elektrischen Kenngrößen der Motorwicklung (Widerstand R_A und Induktivität L_A) wird ein Strom aufgebaut. Diesem proportional (Faktor K_M) wird auch das Motormoment gebildet, das zusammen mit dem Lastmoment auf die Massenträgheit J_{ges} (vgl. Bild 3.14) der gesamten Vorschubachse wirkt. Nach dem Drallsatz stellt sich eine Drehbeschleunigung ein, die über eine formale Integration und entsprechende Umrechnung die Drehzahl n des Motors beeinflusst. Eine weitere formale Integration ergibt die Winkellage der Motorwelle φ_a. Eine Multiplikation mit der Getriebeübersetzung führt zur Lage x_{ist} (vgl. Bild 3.14) des Maschinenschlittens.

Der gesamte Vorschubantrieb ist ein System höherer Ordnung. Die Berechnung von Systemen mit einer Ordnung größer zwei gestaltet sich jedoch schwierig. Daher werden oft Vereinfachungen im Modell der Regelkreise vorgenommen, wenn bestimmte Eigenschaften für die Betrachtungen vernachlässigt werden können. Bild 3.16 zeigt eine mögliche Vereinfachungen des Regelkreises aus Bild 3.15. Der Einfachheit halber wird nur die direkte Lagemessung betrachtet. Die Messsysteme weisen in der Regel keine signifikanten Fehler auf. Daher können sie als P-Glieder mit Verstärkungsfaktor 1 angenommen bzw. vernachlässigt werden. Bei kleinen Geschwindigkeiten ist die induzierte Gegenspannung gering, daher kann die Rückwirkung über die elektromotorische Konstante vernachlässigt werden, Bild 3.16. Der Stromregelkreis kann damit in der Regel zu einem Verzögerungsglied erster Ordnung (PT_1-Glied) vereinfacht werden. Als Eckfrequenz kann hier bei modernen Antrieben etwa 1 kHz angenommen werden. Meistens ist das dynamische Verhalten des Regelkreises bei so hohen Frequenzen vernachlässigbar. In diesem Fall kann der Stromregelkreis auch als ideal angenommen werden ($G_{SRK} = 1$, entspricht einem P-Glied mit $K = 1$). Für überschlägige Betrachtungen des Regelverhaltens wird oft auch der Integralanteil des Geschwindigkeitsreglers vernachlässigt. Der Geschwindigkeitsregler wird damit (wie der Lageregler) zu einem P-Regler.

Betrachtet man den Drehzahlregelkreis in seiner stark vereinfachten Form analytisch, lässt dieser sich nach den Rechenregeln in Bild 3.7 unter Zuhilfenahme von Tab. 3.1 leicht zusammenfassen. Wird der Stromregelkreis als PT_1-Glied angenommen, ergibt sich für den Drehzahlregelkreis ein Verzögerungsglied zweiter Ordnung (PT_2-Glied). Bei einem als ideal angenommenen Stromregelkreis lässt sich der Drehzahlregelkreis zu einem PT_1-Glied zusammenfassen.

3.2.2 Berechnung von zeitkontinuierlichen Lageregelkreisen

Für die qualitative Behandlung des Lageregelkreises werden oft eine oder mehrere Vereinfachungen benutzt. Die Einzelübertragungssysteme können mit Hilfe von Tab. 3.1 in Form von Frequenzgängen beschrieben werden. Der Vergleich zwischen Lagesoll- und -istwert sowie der Lageregler sind in modernen NC-Steuerungen digital realisiert und müssen somit genau genommen als zeitdiskrete Regler berechnet werden. Wird jedoch nur der untere Frequenzbereich betrachtet, kann die Lageregelung als quasikontinuierlich angenommen werden. Die Beschreibungen der Regelkreisglieder in Tab. 3.1 sind somit anwendbar.

Zum Aufstellen des Führungsfrequenzgangs $G(j\omega)$ sei an die Rechenregeln im Bild 3.7 erinnert. Der Frequenzgang eines Regelkreises $G_{ges}(j\omega)$, bestehend aus einem Vorwärtszweig $G_V(j\omega)$ und einem Rückwärtszweig $G_R(j\omega)$, lässt sich mit Hilfe von Gleichung 3.57 aufstellen.

$$G_{ges}(j\omega) = \frac{G_V(j\omega)}{1 + G_V(j\omega) \cdot G_R(j\omega)} \tag{3.57}$$

Um die Funktion der unterlagerten Geschwindigkeitsregelung zu zeigen, ist in Tab. 3.11 die Berechnung für einen Lageregelkreis ohne und mit Geschwindigkeitsregelung durchgeführt. Der Regelkreis ist dazu gemäß Bild 3.16 vereinfacht worden. Das Verhalten des Motors mit angekoppelter Masse wurde durch ein PT_1-Glied approximiert. Für die Umrechnung der Drehzahl n_s in die Sollspannung U_s wird dieselbe Konstante K_p verwendet wie für den Drehzahlregler.

3.2.3 Übertragungsverhalten des linearen Lageregelkreises

Der Lageregelkreis ist vereinfacht im Wirkungsplan (Bild 3.15) dargestellt. Das Übertragungsverhalten des Lageregelkreises lässt sich mit den im Folgenden aufgeführten Parametern beschreiben.

Der wichtigste lineare und für das Verhalten des Lageregelkreises maßgebende Kennwert ist die Geschwindigkeitsverstärkung K_V (K_V-Faktor). Er ist das Verhältnis der Istgeschwindigkeit zur Lageabweichung (Schleppabstand) x_w im eingeschwungenen Zustand,

$$K_V = \frac{\dot{x}}{x_w} \tag{3.58}$$

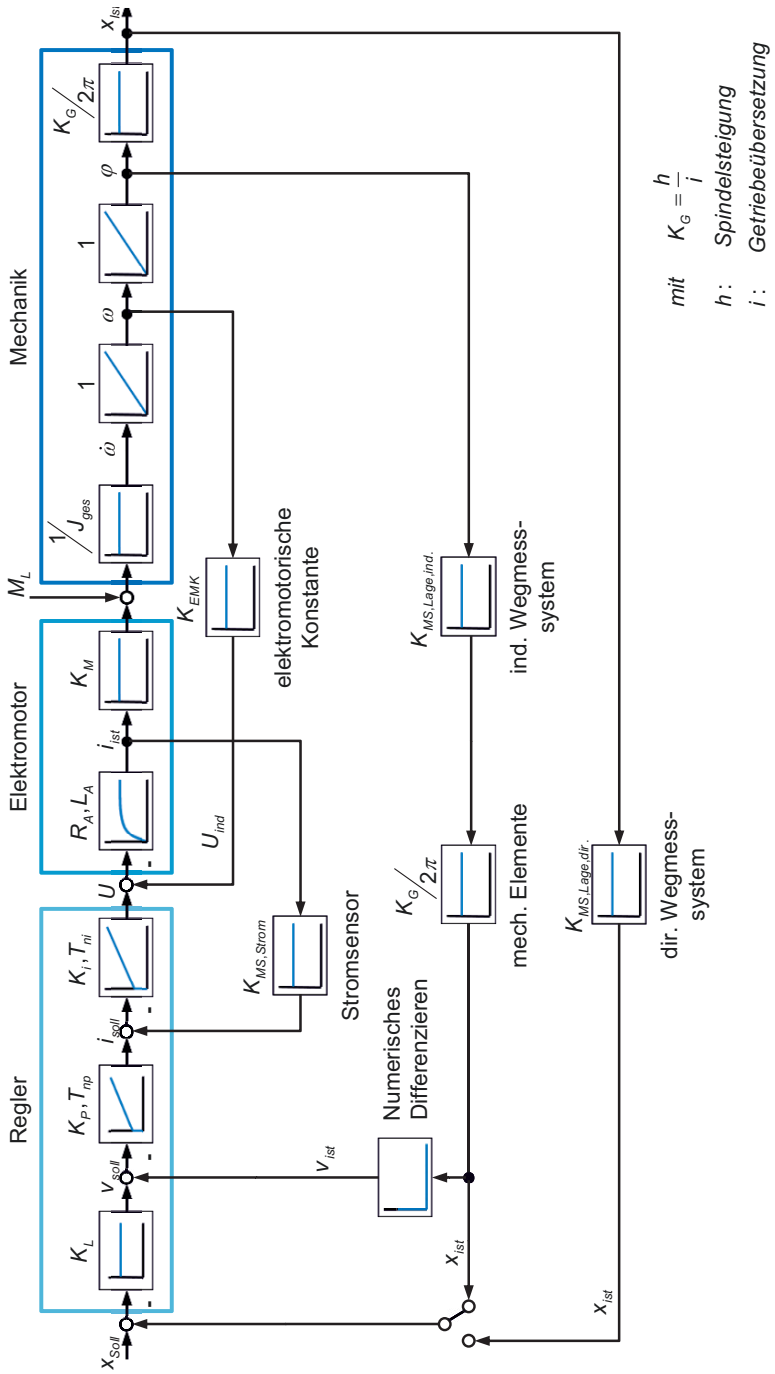


Bild 3.15 Wirkungsplan eines Lageregelkreises mit unterlagertem Geschwindigkeits- und Stromregelkreis

Die Geschwindigkeitsverstärkung K_V hat die Einheit s^{-1}. In der Industrie findet man häufig auch die Einheit $m/(min \cdot mm)$. Der K_V-Faktor kann über den folgenden Zusammenhang zwischen den beiden Einheiten umgerechnet werden:

$$1\left[\frac{m}{min \cdot mm}\right] = \frac{1000}{60}\left[s^{-1}\right] = 16,\overline{6}\left[s^{-1}\right] \tag{3.59}$$

Der K_V-Faktor ist ein Maß für die Abbildungstreue der Maschine beim Verfahren von Kurven in der Ebene oder im Raum. Der durch den Schleppabstand auftretende Werkstückfehler ist proportional zu $\dot{x}/K_V$. Übliche Werte der Geschwindigkeitsverstärkung liegen bei elektromechanischen Antriebssystemen im Bereich

$$K_V = 0,6 \ldots 4,8 \frac{m}{min \cdot mm} \text{ (entspr. 10 bis 80 } s^{-1}\text{)}.$$

Auf hohe Dynamik optimierte Vorschubantriebe mit elektrischen linearen Direktantrieben weisen in Ausnahmefällen K_V-Werte von über $10\ m/(min \cdot mm) = 166,\overline{6}\ s^{-1}$ auf.

Die Geschwindigkeitsverstärkung K_V ist der Kreisverstärkung des offenen Regelkreises gleichzusetzen. Sie bestimmt die Lageabweichung beim Fahren mit konstanter Geschwin-

Tab. 3.11 Berechnung eines Lageregelkreises ohne und mit Geschwindigkeitsregelung

Lageregelkreis ohne Geschwindigkeitsregelung	Lageregelkreis mit Geschwindigkeitsregelung
Geschwindigkeitsverstärkung	
$K_V = K_L K_P K_M K_G$	$K_{V,G} = \frac{K_L K_P K_M K_G}{1 + K_P K_M K_T}$
Frequenzgang des Geschwindigkeitsregelkreises	
-	$G_{GS}(j\omega) = \frac{K_P \frac{K_M}{1 + T \cdot (j\omega)}}{1 + K_T K_P \frac{K_M}{1 + T \cdot (j\omega)}}$
Übertragungsfunktion des Lageregelkreises	
$G(j\omega) = \frac{K_L K_P K_G \frac{K_M}{1 + T \cdot (j\omega)} \frac{1}{(j\omega)}}{1 + K_{MS} K_L K_P K_G \frac{K_M}{1 + T \cdot (j\omega)} \frac{1}{(j\omega)}}$	$G_{GS}(j\omega) = \frac{K_L G_{GS}(j\omega) K_G \frac{1}{(j\omega)}}{1 + K_{MS} K_L G_{GS}(j\omega) K_G \frac{1}{(j\omega)}}$
Vergleich mit Proportionalglied und Verzögerung zweiter Ordnung $G_{PT2}(j\omega) = \frac{K}{1 + \frac{2D}{\omega_0} \cdot (j\omega) + \frac{1}{\omega_0^2} (j\omega)^2}$ $\omega_0 = \sqrt{\frac{K_L K_P K_M K_G K_{MS}}{T}}$	
$D = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{K_L K_P K_M K_G K_{MS} T}}$	$D = \frac{1}{2} \frac{1 + K_P K_M K_T}{\sqrt{K_L K_P K_M K_G K_{MS} T}}$

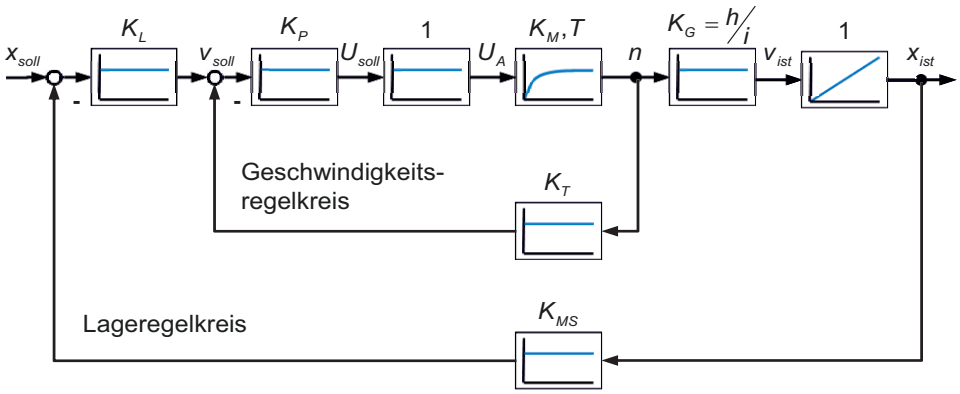


Bild 3.16 Vereinfachter Lageregelkreis mit unterlagertem Geschwindigkeitsregelkreis

digkeit und ist bei der Auslegung von Lageregelkreisen für mehrere Maschinenachsen von großer Bedeutung.

Neben dem K_V-Faktor bestimmen die Eckkreisfrequenz ω_0 und die Systemdämpfung D maßgeblich das Verhalten des Lageregelkreises. Der Einfluss von Dämpfung und Eckkreisfrequenz ist in Bild 3.17 dargestellt.

Die Eckkreisfrequenz ω_0 (bzw. f_0) ist ein Maß für die Güte der Signalübertragung. Eine hohe Eckkreisfrequenz bedeutet eine geringe Signalverzerrung durch das System. Im Allgemeinen liegt $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ bei 10 bis 30 Hz.

Der Dämpfungsgrad D beschreibt die Schwingungsfähigkeit eines Systems. Ein hoher Dämpfungsgrad bedeutet geringe Schwingneigung. Um die Zielposition einer Bewegung ohne signifikantes Überschwingen anfahren zu können, sollte die Dämpfung möglichst groß sein (im Bereich $0{,}8 \leq D \leq 1$) [STUT81].

Die Grenzfrequenz f_g eines Lageregelkreises ist die Frequenz, bei der bei sinusförmiger Lagesollwertänderung das Verhältnis der Istamplitude zur Sollamplitude den Wert $1/\sqrt{2}$ erreicht hat.

$$f_g \approx \frac{1}{2\pi} K_V \tag{3.60}$$

Rechnerisch lassen sich die Zusammenhänge über folgende Gleichung herstellen:

$$K_V = \frac{\omega_0}{2D} = \frac{2\pi f_0}{2D} = \frac{\pi f_0}{D} \tag{3.61}$$

Da, wie erwähnt, die Dämpfung zwischen

$$0{,}8 < D < 1{,}0 \tag{3.62}$$

liegen sollte, ergibt sich folgende Abhängigkeit:

$$K_V = \frac{\pi}{0{,}8 \ldots 1{,}0} \cdot f_0 = (3{,}14 \ldots 3{,}93) f_0 \tag{3.63}$$

Bild 3.17 stellt diesen Zusammenhang anhand der Sprungantwort grafisch dar. Eine Erhöhung des Proportionalanteils im Lageregler bei gleichbleibenden zu beschleunigenden Massen und gleichem Motorantriebsmoment erhöht zwar den K_V-Faktor bzw. die Eckkreisfrequenz, die Dämpfung wird dabei jedoch reduziert.

In Bild 3.18 ist der Schlittenweg x über der Zeit aufgetragen. Im unteren Teil ist der Verlauf der Schlittengeschwindigkeit $\dot{x}$ wiedergegeben. Parameter ist die Geschwindigkeitsverstärkung K_V. Mit wachsender Verstärkung nimmt die Regelabweichung ab, während die Sollgeschwindigkeit schneller erreicht wird. Bei hohen Verstärkungen tritt aufgrund der abnehmenden Dämpfung beim Anfahren und Anhalten eine starke Schwingung auf. Die Verstärkung beschränkt man deshalb auf einen Wert, bei dem der Schlitten seine Position möglichst schnell – jedoch ohne großes Überschwingen – erreicht. Ein Maß für das Überschwingen ist der Dämpfungsgrad D. Mit einer sprungförmigen Geschwindigkeitsänderungen lässt sich das dynamische Verhalten von Vorschubantrieben sehr gut testen und bewerten. In der Praxis werden die Geschwindigkeitsänderungen durch eine gezielte Geschwindigkeitsführung der Steuerung realisiert, sodass die Antriebe den Vorgaben gut folgen können und Schwingungsanregungen der Maschinenstruktur durch unerlaubte Ruckbeträge (Ruck = Beschleunigungsänderung $\equiv \ddot{x}$) vermieden werden.

3.2.4 Simulation von Vorschubantrieben

Zum Entwurf und zur Analyse dynamischer Systeme stellen rechnergestützte Simulationssysteme ein gutes Hilfsmittel

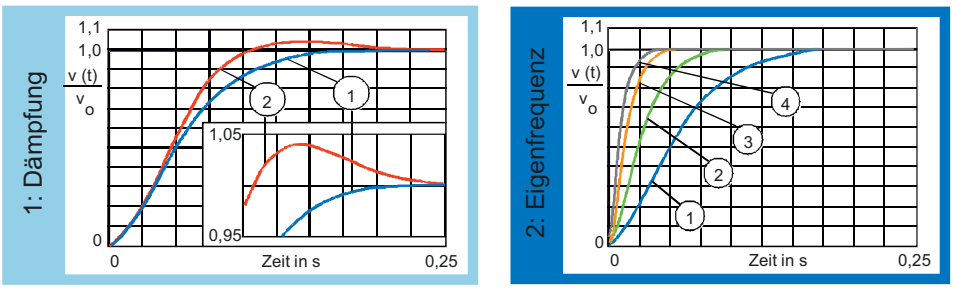


Bild 3.17 Geschwindigkeitsverlauf: Sprungantwort – Einfluss von Dämpfung und Eckkreisfrequenz

1: Einfluss der Dämpfung: Systemeigenschaften				
System		1	2	
Dämpfung	D:	0,9	0,7	
Eckkreisfrequenz (=konst.)	f_0:	5	5	Hz
Geschw. Fakt.	K_V:	1,05	1,35	m/(min*mm)

$v_0 = 0, t < 0$
$v_0 = konst, t \geq 0$

$K_V = \frac{2\pi f_0}{2D}$

2: Einfluss der Eigenfrequenz: Systemeigenschaften						
System		1	2	3	4	
Dämpfung (=konst.)	D:	0,9	0,9	0,9	0,9	
Eckkreisfrequenz	f_0:	5	10	20	30	Hz
Geschw. Fakt.	K_V:	1,05	2,09	4,19	6,28	m/(min*mm)

dar. Basis solcher Simulationssysteme sind Bibliotheken mit Funktionen zur linearen Algebra, numerischen Integration, zum Lösen von Differenzialgleichungen und zur Durchführung von Matrixoperationen. Auf diese Funktionen können alle zur Simulation und Analyse benötigten Berechnungen zurückgeführt werden. Auch können beliebige Nichtlinearitäten und spezielle Kennfunktionen in einem Wirkungsplan eingesetzt werden. Unterschiede gibt es vor allem in der Benutzeroberfläche, mit der der Anwender seine Aufgabenstellung formuliert und löst.

Allgemein verwendbare Simulationsprogramme (z. B. MATLAB) erfordern eine mathematische Formulierung der Simulationsaufgabe. Ausgehend von einer Beschreibung der Vorschubachse muss zunächst ein regelungstechnisches Blockschaltbild mit einer genauen Formulierung der Einzelblöcke in Form von Koeffizienten des Zählers und des Nenners eingegeben werden.

Die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Funktionen ermöglicht die Ausführung von Untersuchungen im Zeit- und Frequenzbereich. Die Ergebnisse lassen sich numerisch oder grafisch darstellen und ausdrucken.

Um den Schritt der mathematischen Beschreibung des Simulationsproblems für regelungstechnische Anwendungen zu vereinfachen, wurden Eingabeeditoren (z. B. Simu-

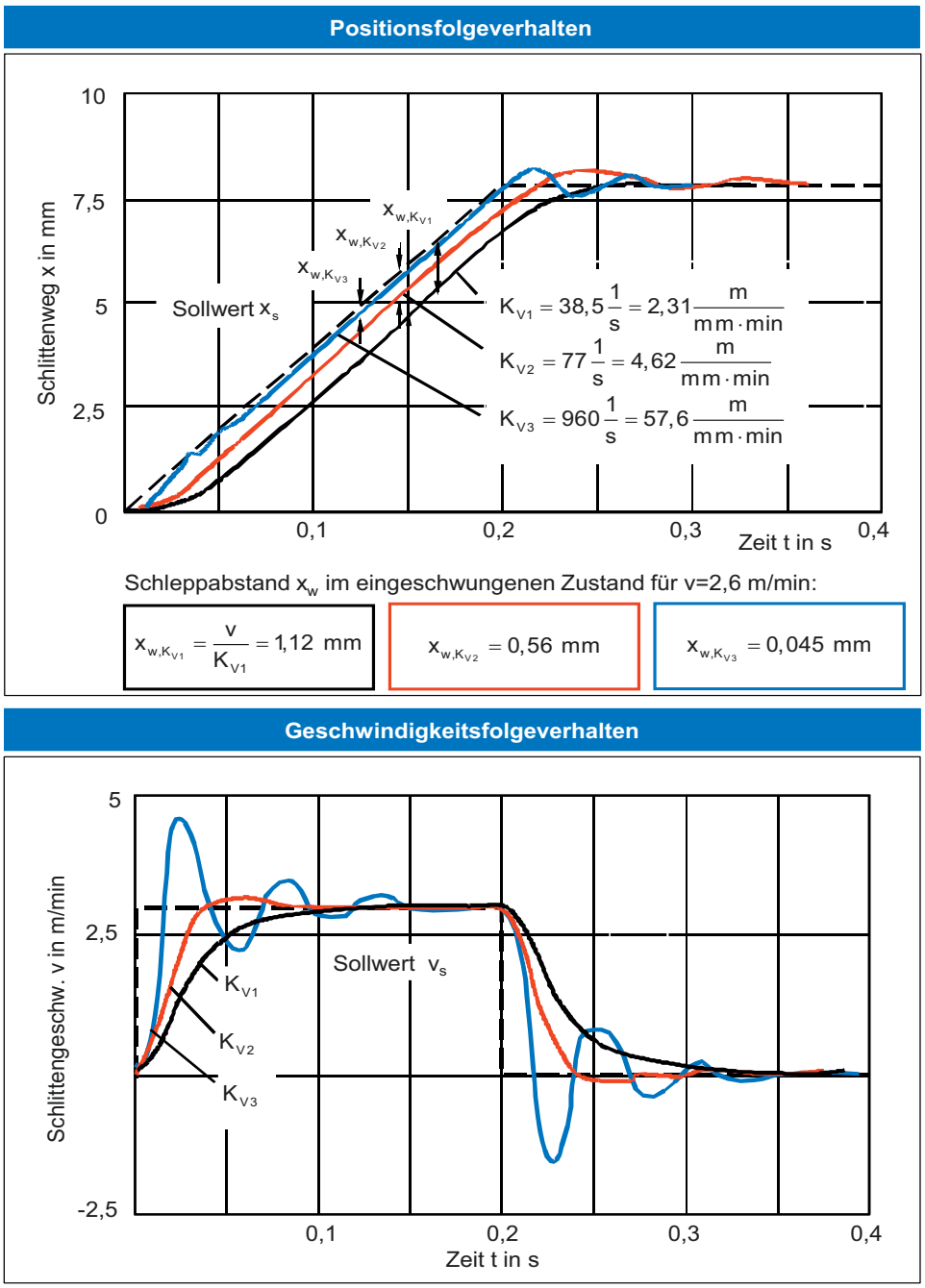


Bild 3.18 Folgeverhalten eines Lageregelkreises (mit Geschwindigkeitsrückführung)

link) entwickelt, die eine direkte grafische Eingabe des Blockschaltbildes erlauben. Aus verschiedenen Bibliotheken kann der Benutzer die benötigten Regelkreiselemente zusammenstellen und parametrieren. Die Berechnung der Koeffizienten der Übertragungsfunktion erfolgt danach automatisch.

Im Bild 3.19 ist die grafische Modellierung eines Lageregelkreises einer Vorschubachse mit einer simulierten Rampenantwort dargestellt. Um das Modell besser strukturieren zu können, wurde von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, selbstdefinierte Elemente zu bilden, die intern aus weiteren Modellelementen zusammengesetzt sind. Sowohl der Antrieb als auch die Vorschubmechanik sind hier als schwingungsfähiges System zweiter Ordnung modelliert, die über den Drehwinkel der Welle und das Rückwirkmoment der Mechanik auf den Antrieb miteinander gekoppelt sind.

Noch weiter geht die Unterstützung des Benutzers bei speziell für die Simulation antriebstechnischer Probleme entwickelten Systemen [ITI13]. Hier stehen in der Elementbibliothek nicht mehr allgemeine regelungstechnische Blöcke, sondern direkt Modelle antriebstechnischer Komponenten (Führungen, Spindel-Mutter-Systeme, Servoantriebe usw.) zur Verfügung, die vom Benutzer beliebig kombiniert werden können. Dieser kann sich daher auf die Lösung des eigentlichen Simulationsproblems konzentrieren, ohne die unterlagerte interne Struktur der Modelle kennen zu müssen.

3.3. Übertragungsverhalten der Mechanik

Neben dem beschriebenen linearen Übertragungsverhalten (und dem beispielsweise damit verbundenen Schleppfehler), das im Wesentlichen auf die Regelung zurückzuführen ist, beeinflussen auch nichtlineare Übertragungselemente im Antriebsverstärker das Verhalten der Vorschubachsen.

Außerdem wirkt der mechanische Teil der Regelstrecke auf die Regelung zurück. Das Verhalten der mechanischen Übertragungselemente kann in ein lineares und ein nichtlineares Verhalten eingeteilt werden. Meist überwiegt das lineare Verhalten, sodass nichtlineare Anteile bei der Auslegung und Berechnung vernachlässigt werden. Dies hängt auch damit zusammen, dass sich das nichtlineare Verhalten einer Teilstrecke oft nur schwer genau mathematisch beschreiben oder berechnen lässt. Hierbei handelt es sich um meist störende Einflüsse, die sich jedoch aus den physikalischen Randbedingungen ergeben und damit nicht ganz vermieden werden können.

Nichtlineare Übertragungselemente finden sich an vielen Stellen der Vorschubachse (Bild 3.20). Hierbei handelt es sich um Leistungsgrenzen des elektrischen Systems und Nichtlinearitäten im Bereich der mechanischen Übertragungselemente. Zu den Nichtlinearitäten zählen: Quantisierung der Messsysteme und der digitalen Regelung, Motorstrombegrenzung, Lose und Umkehrspannen in den

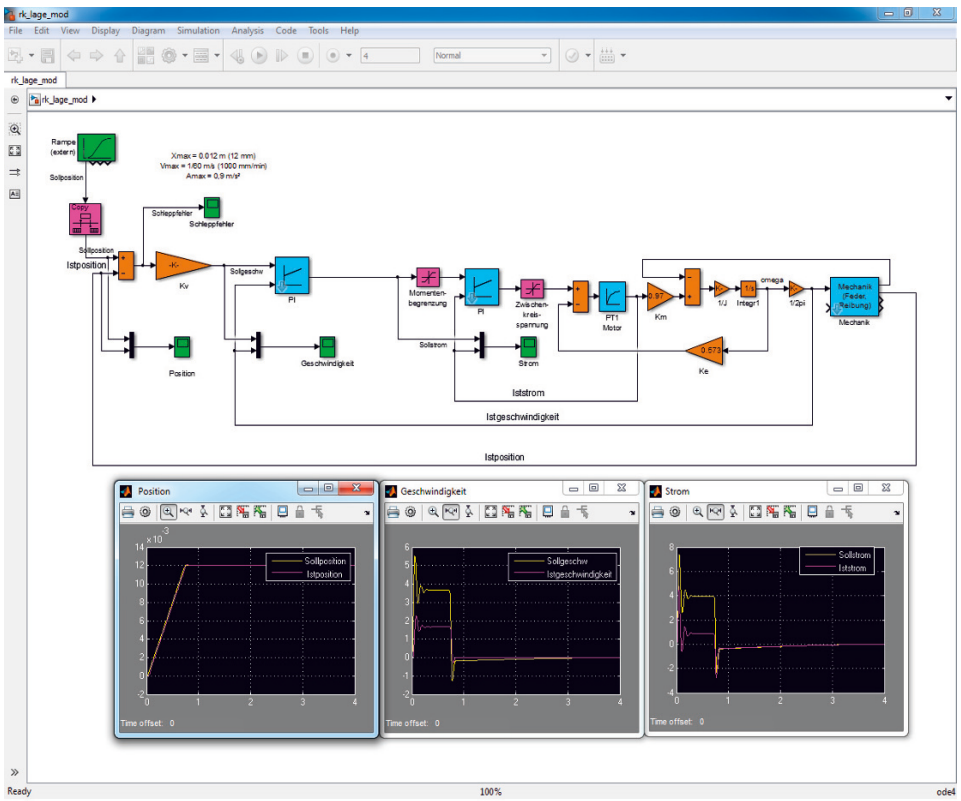


Bild 3.19 Modellierung eines Lageregelkreises im Simulationsprogramm MATLAB/SIMULINK

mechanischen Komponenten wie Lagern, Kugelmutter/Spindel, Zahnriemen, Spindelsteigungsfehler, Stribeck'sche Reibung in Führungen und der Kugelrollspindel, Signalrauschen u. a. m. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Einflüsse auf die Vorschuberzeugung in den Maschinenachsen näher beschrieben.

3.3.1 Physikalische Grenzen des mechanischen und elektrischen Systems

An vielen Stellen im elektrischen und mechanischen System wirken sich physikalische Gegebenheiten begrenzend auf Wirkungsgrößen im Lageregelkreis aus. Diese Grenzen müssen von der Antriebsregelung berücksichtigt werden, um das elektrische und mechanische System nicht zu überlasten. Im Folgenden werden die wichtigsten Grenzwerte genannt und kurz beschrieben.

Zwischenkreisspannung

Die nach Gleichrichtung des Nebenstroms erzeugte Gleichspannung im sogenannten Zwischenkreis bildet für die Umrichter die Energiequelle (vgl. ▶ Kap. 2.2). Die an die Motorwicklungen angelegte Spannung (vgl. U_A in ◘ Bild 3.15) ist daher auf den Betrag der Zwischenkreisspannung begrenzt, wobei unter Umständen zusätzlich die Innenwiderstände der Schaltelemente im Umrichter (IGBTs) zu berücksichtigen sind.

Die an die Motorwicklungen angelegte Spannung bestimmt, wie schnell sich in den Spulen ein Strom aufbauen kann. Daher wirkt sich die Zwischenkreisspannung begrenzend auf die Stromanstiegsgeschwindigkeit aus. Diese Größe ist proportional zum realisierbaren Ruck des Motors, d. h. zur Beschleunigungsänderung des Antriebes.

Außerdem muss vom Stromsteller die induzierte Gegenspannung des Motors überwunden werden. Daher nimmt die realisierbare Dynamik mit höheren Drehzahlen immer mehr ab, da die Spannungsreserve aufgebraucht wird.

Motorstrom, Motormoment

Der Strom, der durch die Motorwicklungen fließt, ist aus zwei Gründen begrenzt. Erstens wird die Motorwicklung durch einen zu hohen Strom überlastet, und zweitens besteht bei Synchronmotoren die Gefahr, dass das Magnetmaterial des Rotors bzw. des Sekundärteils aufgrund des großen elektromagnetischen Flusses entmagnetisiert wird.

Heutige Motoren, die in Vorschubantrieben eingesetzt werden, sind üblicherweise auf eine kurzzeitige vier- bis fünffache Überlastbarkeit ausgelegt.

Motordrehzahl

Die maximale Motordrehzahl ist durch die Eigenschaften des Rotors begrenzt. Bei zu hohen Drehzahlen werden die Fliehkräfte so groß, dass sich z. B. bei Synchronmotoren die meist aufgeklebten Magnetplättchen des Rotors lösen können. Rotoren von Asynchronmotoren sind hier in der Regel robuster, daher können wesentlich höhere Drehzahlen erreicht werden.

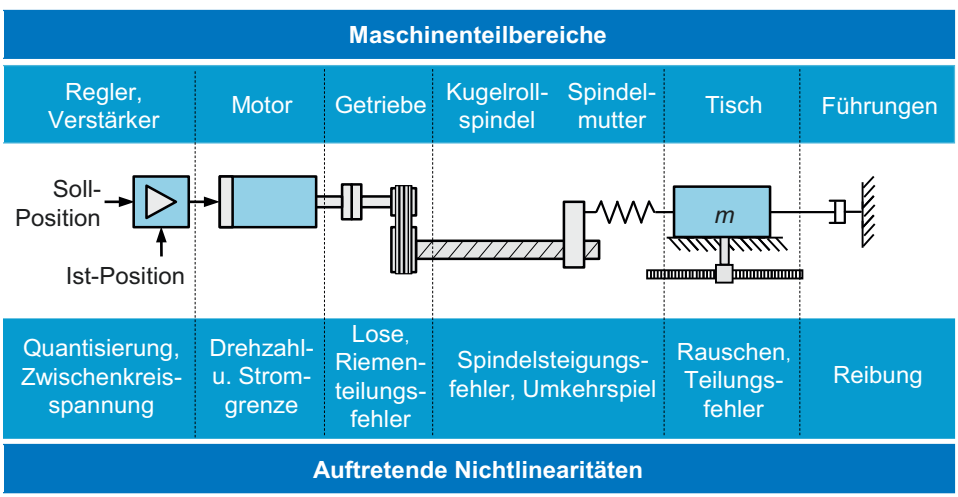
Bei Linearmotoren besteht keine Beschränkung der maximalen Geschwindigkeit aufgrund von Fliehkräften. Hier begrenzt die induzierte Gegenspannung die erreichbare Geschwindigkeit.

Biegekritische Drehzahl der Kugelrollspindel

Bei langen Kugelrollspindeln ist die Verfahrgeschwindigkeit des Schlittens durch die biegekritische Drehzahl der Kugelrollspindel begrenzt. Auch die Kugelrückführung in den Muttern stellt eine geschwindigkeitsbegrenzende Größe dar.

Maximale Geschwindigkeit der Führungswagen

Die meist eingesetzten Kompaktführungen sind heute in der Regel für Geschwindigkeiten bis zu 300 *m/min* zugelassen. Begrenzend wirken sich bei großen Verfahrgeschwindigkeiten die hohen Fliehkraftbelastungen der Wälzkörperumlenkstücke aus.



◘ **Bild 3.20** Nichtlinearitäten im Lageregelkreis einer Vorschubachse

Grenzgeschwindigkeit des Messsystems

Je nach Teilungsperiode des Messsystems werden bei hohen Geschwindigkeiten sehr hohe Geberfrequenzen erreicht. Diese bewirken zum einen eine Abschwächung der Signalamplitude in der Verstärkungselektronik und zum anderen kann die maximale Messeingangsfrequenz des Antriebsreglers überschritten werden.

3.3.2 Übertragungsverhalten elektromechanischer Antriebssysteme

Die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen wird entscheidend mitbestimmt durch das Übertragungsverhalten der Regeldynamik und der mechanischen Komponenten. Jede Achse bildet ein komplexes dynamisches System, welches durch die vorgegebenen Führungsgrößen und die Störgrößen statisch verformt und dynamisch angeregt wird.

Weitere Abweichungen zwischen der vom Werkzeug realisierten Werkstückgestalt und der durch die Steuerung ausgegebenen Werkstücksollkontur werden durch fehlerhaft gefertigte Einzelkomponenten (z. B. Spindelsteigungsfehler) bzw. eine fehlerhafte Montage verursacht.

Die aus der Mechanik resultierenden Abweichungen lassen sich in Fehler im kinematischen, statischen und dynamischen Übertragungsverhalten unterteilen.

3.3.2.1 Kinematisches Übertragungsverhalten

Kinematische Fehler äußern sich in geometrischen Abweichungen des Vorschubsystems und sind weitgehend unabhängig von Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Kräften. Kinematische Übertragungsfehler der mechanischen Komponenten entstehen durch die fehlerhafte Fertigung oder Montage und infolge von Verschleiß. Folgende geometrische Bauteilfehler haben einen dominierenden Einfluss auf den kinematischen Übertragungsfehler:

- Steigungs-, Taumel- und Exzentrizitätsfehler von Spindeln,
- Verzahnungsfehler,
- Rundheits-, Exzentrizitäts-, Taumel- und Fluchtungsfehler von Lagerungen sowie
- Geradlinigkeits-, Winkel-, Parallelitäts- und Fluchtungsfehler von Führungen.

Die kinematischen Übertragungsfehler, die von geometrischen Bauteilfehlern herrühren, können außer geometrischen Bearbeitungsfehlern auch schwingungsanregende Wechselkräfte hervorrufen, z. B. durch Eingriffsteilungsfehler bei Zahnradgetrieben.

Ein ausreichendes funktionales Spiel zwischen den sich relativ gegeneinander bewegenden Komponenten ist vielfach für die Relativverlagerung der mechanischen Übertragungselemente erforderlich. Es geht unter Berücksichtigung eventueller Über- oder Untersetzungen bei wechselnder Belastungsrichtung proportional in den kinematischen Übertragungsfehler ein. Besonders die mechanischen Übertragungselemente, die sich unmittelbar vor der Bearbeitungsstelle befinden (z. B. Getriebestufen oder Spindel-Mutter-Systeme), sollten spielfrei arbeiten, da sich dieses Spiel direkt als Bearbeitungsfehler auswirkt.

Die geometrischen Abweichungen der einzelnen mechanischen Übertragungselemente sind durch Einzelfehlermessungen bestimmbar (z. B. Steigungsfehlermessung an Spindeln). In den meisten Fällen ist es jedoch nicht möglich, aus mehreren zusammenwirkenden Einzelfehlern den kinematischen Gesamtübertragungsfehler zu ermitteln.

Durch eine Übertragungsfehlermessung ist das reale kinematische Gesamtübertragungsverhalten bestimmbar. Die Bauteile, die wegen ihrer geometrischen Einzelfehler ausschlaggebend am resultierenden kinematischen Übertragungsfehler beteiligt sind, können dabei anhand einer Analyse der Fehlerfrequenzen (z. B. Drehfrequenzen von Spindeln, Zahneingriffsfrequenzen) ausfindig gemacht werden. Durch gezielte Nacharbeit der fehlerhaften Bauteile ist es möglich, den kinematischen Übertragungsfehler zu verringern.

3.3.2.2 Statisches Übertragungsverhalten

Statische Übertragungsfehler werden hervorgerufen durch statische Verformungen der Übertragungselemente infolge statischer Reibkräfte, Prozesskräfte und der Gewichtskräfte, die durch Werkstücke, aber auch durch die Maschinenkomponenten selbst, hervorgerufen werden. Die bedeutendste Anregung stellen jedoch die Beschleunigungskräfte durch den Antrieb dar. Es werden heute Beschleunigungen von 10 bis 20 m/s^2 bei Geschwindigkeiten von 100 bis 120 m/min gefordert.

Im ◘ Bild 3.21 ist eine messtechnisch durchgeführte Nachgiebigkeitsanalyse der Einzelkomponenten eines Spindel-Mutter-Systems dargestellt. Mit 58 % Nachgiebigkeitsanteil ist in diesem Fall die Spindel das schwächste Glied. Wird die statische Steifigkeit der Spindel durch Wahl eines großen Durchmessers vergrößert, verringert sich die statische Verformung beträchtlich und die Resonanzfrequenz erhöht sich. Dies kann ein erwünschter Effekt sein, da der Eigenfrequenzbereich der mechanischen Struktur wenigstens um den Faktor 2 über der Eigenfrequenz des Regelkreises liegen sollte.

Durch die Vergrößerung des Spindeldurchmessers erhöht sich die Steifigkeit mit der zweiten Potenz. Das Massenträgheitsmoment steigt jedoch zugleich mit der vierten Potenz.

- Steifigkeit $\sim d_{Sp}{}^2$,
- Massenträgheitsmoment $\sim d_{Sp}{}^4$.

So kann durch die Vergrößerung des Spindeldurchmessers das Beschleunigungsverhalten des Vorschubantriebes negativ beeinträchtigt werden. Dies bedeutet, dass die Wahl des richtigen Spindeldurchmessers und derer Steigung in einem

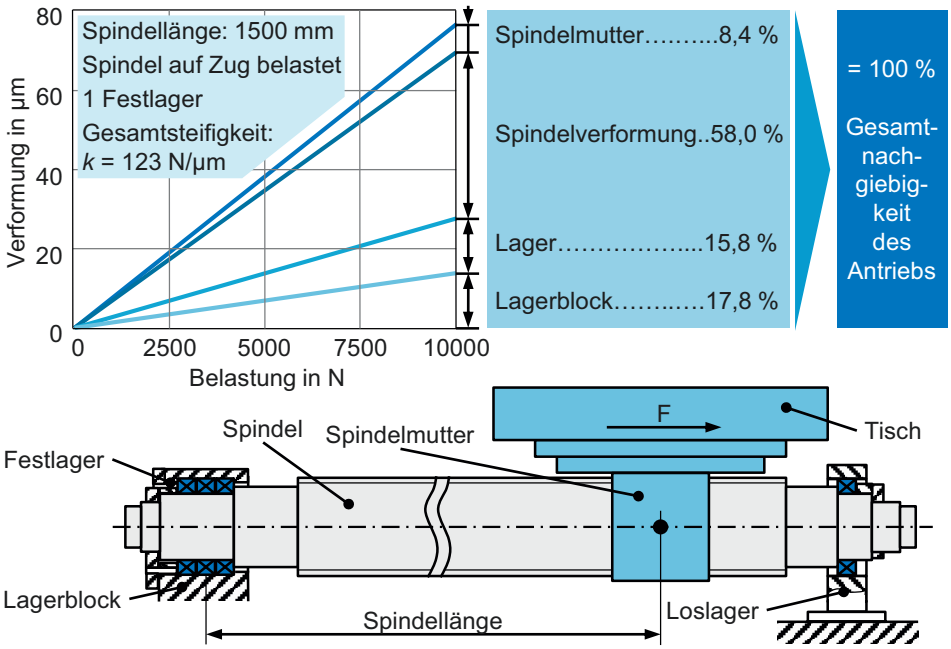


Bild 3.21 Statisches Nachgiebigkeitsverhalten eines Spindel-Mutter-Systems

Kompromiss zwischen ausreichender statischer Steifigkeit bei gerade noch vertretbarem Massenträgheitsmoment besteht.

3.3.2.3 Dynamisches Übertragungsverhalten

Relative Schwingungen zwischen Werkstück und Werkzeug haben geometrische Abweichungen und eine schlechte Oberflächengüte der zu bearbeitenden Werkstückoberfläche zur Folge. Auch können Schwingungen zu einer erhöhten Werkzeugbeanspruchung führen.

Das dynamische Übertragungsverhalten der mechanischen Übertragungselemente wird beschrieben durch den frequenzabhängigen, funktionalen Zusammenhang zwischen der Ausgangsgröße und der Eingangsgröße des Systems. Dabei wird die Ist-Ausgangsgröße auf die Amplitude der Soll-Ausgangsgröße bezogen. Die Abweichung der Ist- von der Soll-Ausgangsgröße wird als Übertragungsfehler bezeichnet. Bild 3.22 zeigt die Abhängigkeit des Tischweges eines Bearbeitungszentrums (Ausgangsgröße) von dem Drehwinkel der Motorwelle (Eingangsgröße).

Eine große Tischmasse im Zusammenhang mit einer relativ hohen Nachgiebigkeit der Spindelmutter und der Spindel ist bei den meisten Vorschubantrieben mit Spindel für die unterste mechanische Resonanzstelle verantwortlich. Obwohl das hier untersuchte System bei der Messung der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge und der Modalanalyse keine dominierenden Schwachstellen zeigt, findet sich eine Überhöhung des Amplitudenverhältnisses um den Faktor 4 bei 183 Hz.

Ebenso verdeutlicht die gleiche Messung an einer Schleifmaschine, dass der Einfluss der mechanischen Übertragungselemente von großer Bedeutung für das dynamische Verhalten der Maschine ist (Bild 3.23).

Das Amplitudenverhältnis zeigt deutliche Überhöhungen bei 82 Hz und 145 Hz um den Faktor 2 bzw. 9. Mittels einer Modalanalyse konnte bestätigt werden, dass diese Überhöhungen auf das Schieben des Vorschubtisches zurückzuführen sind. Die Modalanalyse wurde bei räumlicher Anregung an der Zerspanstelle durchgeführt und beinhaltet die Untersuchung der gesamten Maschine, sodass hierbei auch andere Maschinenbauteile das dynamische Verhalten beeinflussen (Bild 3.24).

Im Bereich der Resonanzfrequenzen des mechanischen Übertragungssystems ist die Amplitude der Schwingung am höchsten. Daher sollten mögliche Anregungsfrequenzen in einem ausreichend großen Frequenzabstand vor den Resonanzfrequenzen liegen. In diesem Zusammenhang gilt die Faustformel für unterkritische Systeme, dass die Frequenz der ersten Resonanzstelle des mechanischen Systems mindestens doppelt so groß sein soll wie die Eigenfrequenz des Lageregelkreises.

Der Kraftfluss für die Umwandlung der Motorbewegung in eine Vorschubbewegung erfasst viele Einzelelemente, die wie Schwingungssysteme Masse-, Feder- und Dämpfungseigenschaften aufweisen. Der gesamte Vorschubantrieb kann damit als System gekoppelter Feder-Masse-Systeme aufgefasst werden (Mehrmassenschwinger). Die Systemeigenschaften bewirken, dass bei einer dynamischen Anregung die Elemente des Vorschubantriebes Schwingungen ausführen können. Von primärer Bedeutung ist hierbei die Kenntnis des dynamischen Folgeverhaltens und des Störgrößenverhaltens.

Das dynamische Übertragungsverhalten wird beschrieben durch eine DGL zweiter Ordnung:

$$[M]\cdot\{\ddot{x}\}+[C]\cdot\{\dot{x}\}+[K]\cdot\{x\}=\{f\} \tag{3.64}$$

mit: $[M]$ Massenmatrix (diagonal),
$[C]$ Dämpfungsmatrix (tridiagonal),
$[K]$ Steifigkeitsmatrix (tridiagonal),
$\{x\}$ Verlagerungsvektor,
$\{\dot{x}\}$ Geschwindigkeitsvektor,
$\{\ddot{x}\}$ Beschleunigungsvektor und
$\{f\}$ Vektor der äußeren Kräfte.

In Bild 3.25 ist ein elektromechanisches Vorschubsystem, bestehend aus Motor, Getriebe, Kugelrollspindel und Werkstücktisch, als Mehrmassenschwingermodell abgebildet. Die Spindel kann hier als zwei in Reihe geschaltete Feder-Dämpfer-Elemente betrachtet werden. Dabei müssen für die Masse und das Trägheitsmoment der Spindel die reduzierten, auf die Abtriebsgrößen φ_3 und x_4 bezogenen Werte eingesetzt werden. Für das Vorschubsystem erhält man die folgende Bewegungsgleichung:

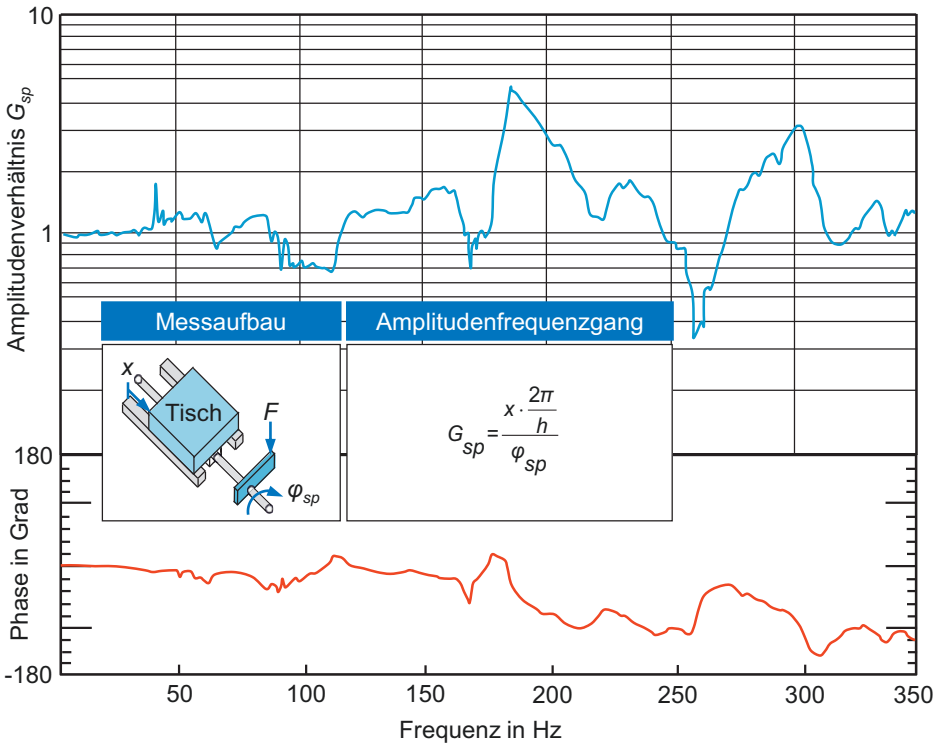


Bild 3.22 Frequenzgang der mechanischen Übertragungselemente eines Vorschubantriebes eines Bearbeitungszentrums

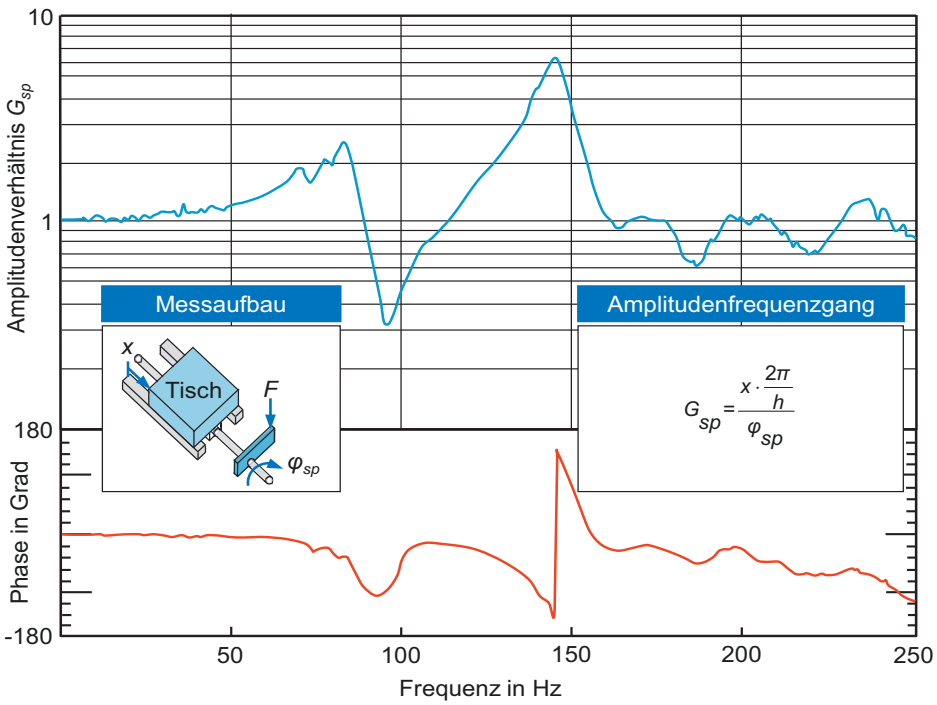


Bild 3.23 Frequenzgang der mechanischen Übertragungselemente eines Vorschubantriebes einer Schleifmaschine

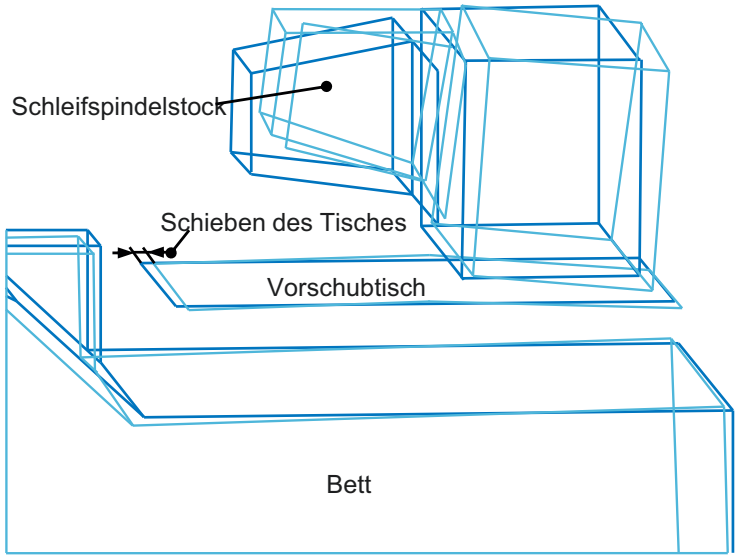


Bild 3.24 Schwingungsform einer Schleifmaschine bei $f_{0,2} = 145$ Hz

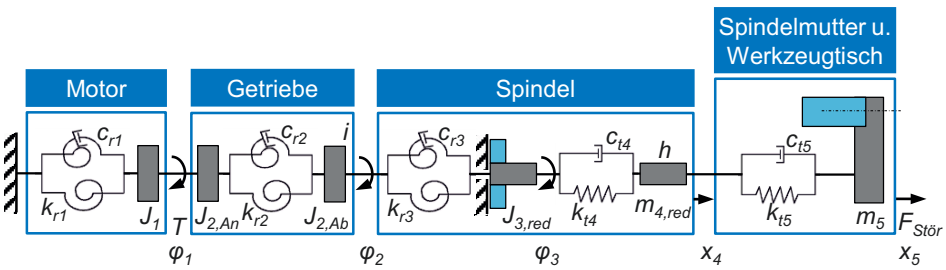


Bild 3.25 Abbildung eines mechanischen Vorschubsystems als Mehrmassenschwinger

$$\begin{bmatrix} J_1 + J_{2,\mathrm{An}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{2,\mathrm{Ab}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{3,red} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{4,red} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \\ \ddot{x}_4 \\ \ddot{x}_5 \end{bmatrix} + \tag{3.65}$$

$$\begin{bmatrix} c_{r1} + c_{r2} & -c_{r2} & 0 & 0 & 0 \\ -c_{r2} & i \cdot c_{r2} + c_{r3} & -c_{r3} & 0 & 0 \\ 0 & -c_{r3} & c_{r3} + c_{t4} \cdot \dfrac{h^2}{4\pi^2} & -c_{t4} \cdot \dfrac{h}{2\pi} & 0 \\ 0 & 0 & -c_{t4} \cdot \dfrac{h}{2\pi} & c_{t4} + c_{t5} & -c_{t5} \\ 0 & 0 & 0 & -c_{t5} & c_{t5} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{\varphi}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} k_{r1} + k_{r2} & -k_{r2} & 0 & 0 & 0 \\ -k_{r2} & i \cdot k_{r2} + k_{r3} & -k_{r3} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{r3} & k_{r3} + k_{t4} \cdot \dfrac{h^2}{4\pi^2} & -k_{t4} \cdot \dfrac{h}{2\pi} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{t4} \cdot \dfrac{h}{2\pi} & k_{t4} + k_{t5} & -k_{t5} \\ 0 & 0 & 0 & -k_{t5} & k_{t5} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix}$$

mit:
- J_i Massenträgheitsmoment,
- m_i Masse,
- $c_{r+t,i}$ Dämpfung: rotatorisch und translatorisch,
- $k_{r+t,i}$ Steifigkeit: rotatorisch und translatorisch,
- T Moment und
- F Kraft

Die hier angestellten Betrachtungen gelten ohne Berücksichtigung des Vorschubreglers. Es werden nur die mechanischen Bauteile betrachtet.

3.3.3 Übertragungsverhalten linearer Direktantriebe

Im Gegensatz zu elektromechanischen Antriebssystemen ist der Motor bei einem linearen Direktantrieb direkt an den Maschinenschlitten angeflanscht – die Tiefpasswirkung der mechanischen Übertragungselemente entfällt somit. Versuche zeigen, dass sich im Geschwindigkeitsregelkreis Schwingungen mit vielen Hundert Hertz ausbilden können, da die

Wirkbandbreite des Geschwindigkeitsregelkreises sehr groß ist [WECK99].

Werden die Reglereinstellungen erhöht, kommt es aus diesen Gründen auch zu einer verstärkten Anregung mechanischer Resonanzstellen. Hierbei stellen jedoch nicht die mechanischen Übertragungselemente in Verbindung mit der Schlittenmasse das schwingungsfähige System dar, vielmehr kann nachgewiesen werden, dass – bei sehr steifer Ausführung des Maschinenschlittens – die Führungswagen als Feder-Dämpferelemente interpretiert werden müssen. Dieses Feder-Masse-System, bestehend aus Führungswagen und Schlittenmasse, wird dann durch den linearen Direktantrieb in Verbindung mit der Regelung zu Schwingungen angeregt.

Bild 3.26 zeigt zwei Störfrequenzgänge einer linearmotorgetriebenen Achse bei geringen und erhöhten Reglereinstellungen im Lage- und Geschwindigkeitsregelkreis. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei höheren Reglereinstellungen eine Schwingungsform bei einer Frequenz von 300 Hz angeregt wird, die bei niedrigen Einstellungen kaum wahrnehmbar ist.

Bild 3.27 zeigt die mittels einer Modalanalyse gemessene Schwingungsform. Die Schlittenstruktur verformt sich kaum, sondern die Masse federt in den Führungswagen. Durch die taumelnde Schwingung des Schlittens werden die dynamischen Bewegungen von dem seitlich angebrachten Messsystem erfasst und dem Regler als Abweichung zugeführt, was zu einer Instabilität führt.

Diese Überlegungen zeigen, dass die Reglereinstellungen im hochdynamischen Geschwindigkeitsregelkreis durch die schwingungsfähige Ankopplung der Schlittenmasse begrenzt werden. Da durch den Geschwindigkeitsregelkreis die Dämpfung im Lageregelkreis stark beeinflusst wird, wirken sich die limitierten Reglereinstellungen im Geschwindigkeitsregler ebenfalls begrenzend auf den K_V-Faktor im Lageregelkreis aus.

Diese Zusammenhänge lassen sich – unter Ausnutzung geeigneter Vereinfachungen in den Regelkreisen – auch analytisch berechnen. So kann beispielsweise eine Stabilitätsbetrachtung der Regelkreise mit schwingungsfähiger Mechanik nach Nyquist durchgeführt werden.

Als Ergebnis lässt sich im Parameterraum ein Körper der Reglerparameter errechnen (Bild 3.28), innerhalb dessen die mit dem Parametertripel (K_p, T_{np}, K_V) eingestellten Regelkreise stabil sind. K_V ist hierbei die Geschwindigkeitsverstärkung im Lageregelkreis, K_p und T_{np} sind der Verstärkungsfaktor und die Nachstellzeit im Geschwindigkeits-

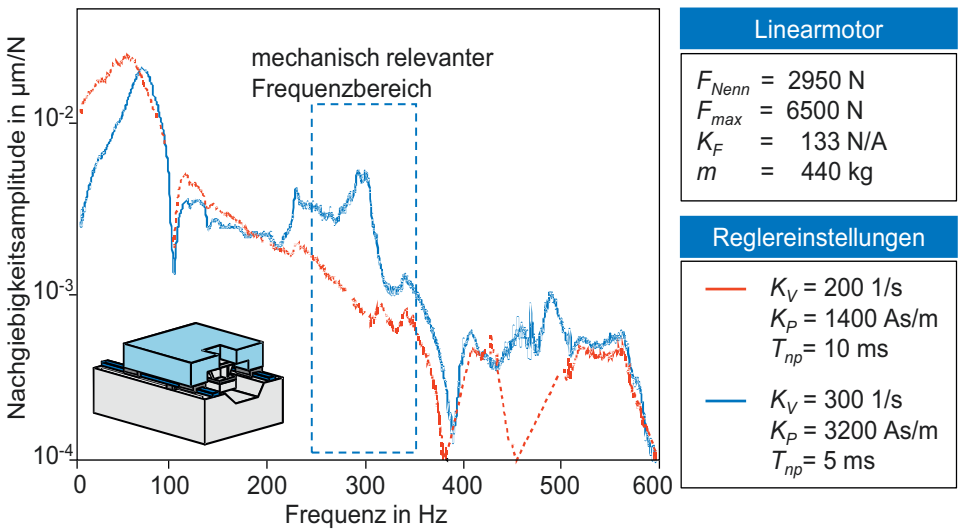


Bild 3.26 Störfrequenzgänge der Linearmotorachse bei unterschiedlichen Reglereinstellungen

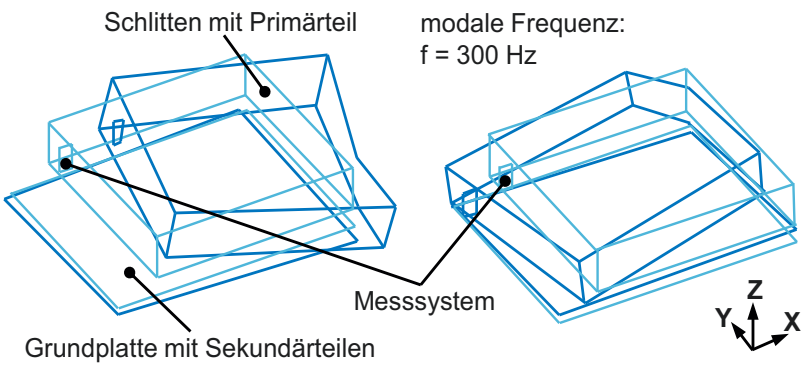


Bild 3.27 Gemessene Schwingungsform der mechanischen Eigenfrequenz

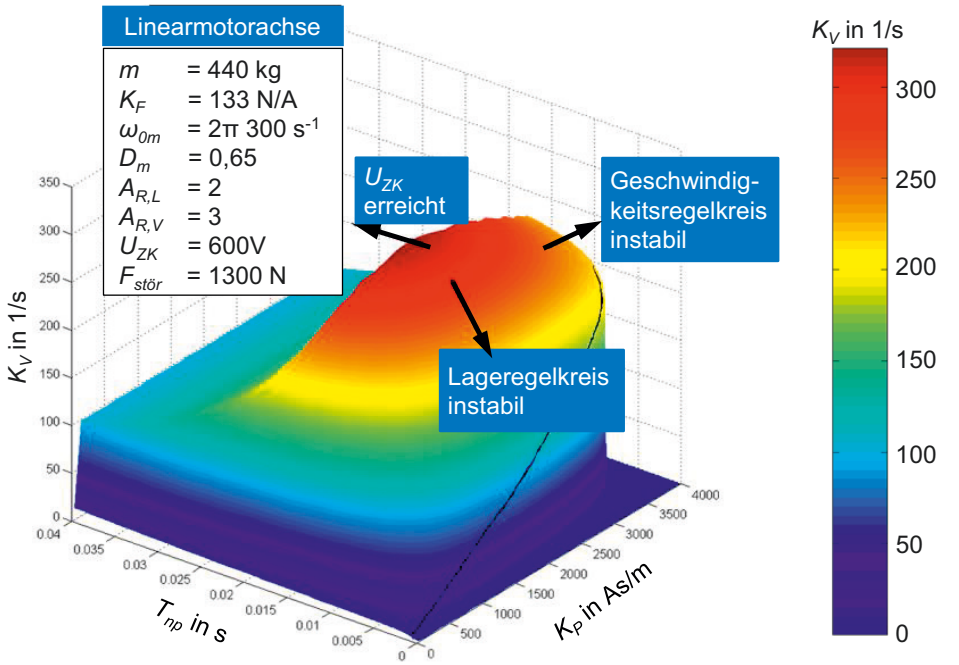


Bild 3.28 Einstellbereich der Reglerfaktoren hinsichtlich der Systemstabilität und physikalischer Begrenzungen

regelkreis. In das Diagramm gehen die Eigenschaften des elektrischen und mechanischen Systems ein. Eine genaue Herleitung des Verfahrens findet sich in [WECK99].

3.4 Einflüsse des Messsystems auf die Vorschubregelung

Die schwingungsfähigen Eigenschaften der mechanischen Übertragungselemente wirken sich auf das dynamische Verhalten des gesamten Lageregelkreises aus. Die im Folgenden beschriebenen Analysen zeigen, dass die Art und Lage des Wegmesssystems entscheidenden Einfluss auf das Gesamtsystemverhalten hat. Die mechanischen Strukturschwingungen nehmen dabei unterschiedlichen Einfluss auf den Lageregelkreis. Wichtig ist hierbei die Frage, ob die mechanischen Schwingungen vom Wegmesssystem erfasst werden und damit vom Regelkreis wahrgenommen werden oder nicht.

Nähere Erläuterungen zu den Bauformen und Wirkprinzipien der verwendeten Messsysteme finden sich in ► Kap. 2.4.

3.4.1 Verhalten von elektromechanischen Achsen bei Regelung über indirektes und direktes Messsystem

Die heute üblichen Wegmesssysteme zur Lageerfassung der NC-gesteuerten Maschinenkomponenten sind zum einen Linearmaßstäbe, die die Tischposition direkt erfassen, und zum anderen am Motor montierte Drehgeber, die die Winkellage des Motors erfassen. Mit Kenntnis des Übersetzungsverhältnisses im Getriebe und der Spindelsteigung kann indirekt auf den Verfahrweg des Schlittens geschlossen werden. Die Vor- und Nachteile beider Systeme sind in ► Kap. 2.4 dargestellt.

Im vorliegenden Beispiel (vgl. ◘ Bild 3.29) bildet die Tischmasse mit der Kugelrollspindel, der Mutter und der Lagerung das mechanische Schwingungssystem. Wie die Messergebnisse des Übertragungsverhaltens zeigen, tritt bei dem Antrieb mit direktem Messsystem eine beträchtliche Resonanzspitze auf, die zu großen Werkstückmaßabweichungen führen kann bzw. eine Stabilisierung des Antriebsregelkreises unmöglich macht. Die angeregten mechanischen Schwingungen gehen direkt in das Messergebnis der Lageerfassung ein.

Demgegenüber hat das indirekte Lagemessverfahren hier Vorteile. Die Schwingungsamplituden der Tischschwingung wirken sich nur in einer zu vernachlässigenden Torsionsanregung der Vorschubspindel auf die Lagemessung aus. Das Messergebnis zeigt eine unbedenkliche Veränderung im Eigenfrequenzbereich der schwingenden Struktur des indirekten Wegmesssystems.

Die Simulation gemäß ◘ Bild 3.30 und ◘ Bild 3.31 verdeutlicht den Einfluss des Weg-Rückführungsortes auf das dynamische Verhalten des Vorschubantriebs. Die Beaufschlagung des Regelkreises mit einer sprungförmigen Änderung des Weg-Soll-Signals führt bei dem indirekten Wegmesssystem zu einem rampenförmigen Ausgangssignal des Vorschubmotors, welches durch die mechanischen Übertragungselemente nur geringfügig verändert zu einem Weg-Ist-Signal umgesetzt wird. Der gleiche Regel-

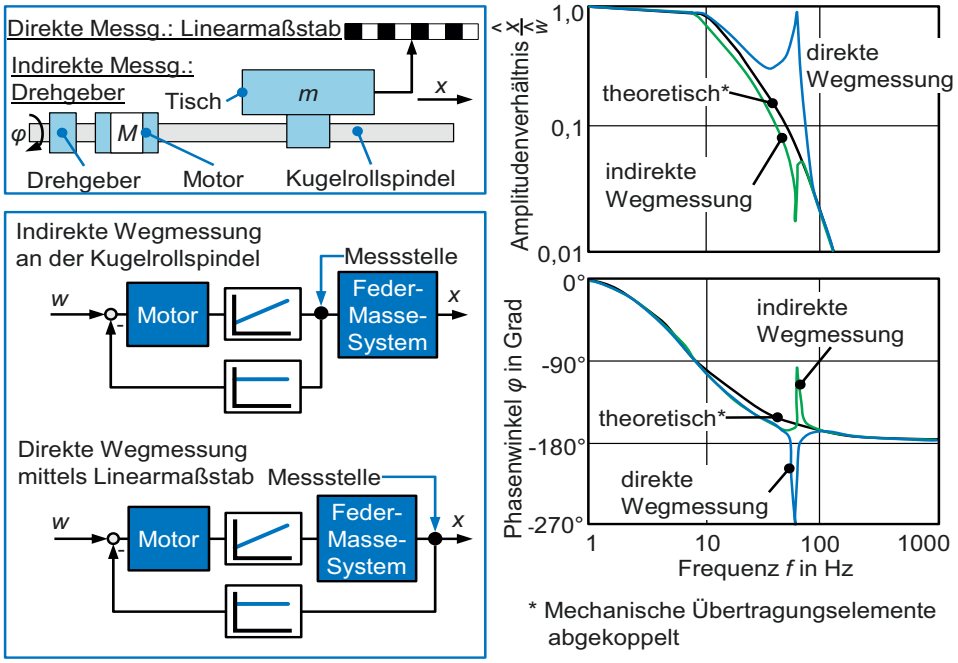


Bild 3.29 Auswirkung der Übertragungselemente auf den Lageregelkreis des Vorschubantriebes bei unterschiedlichen Lageerfassungen

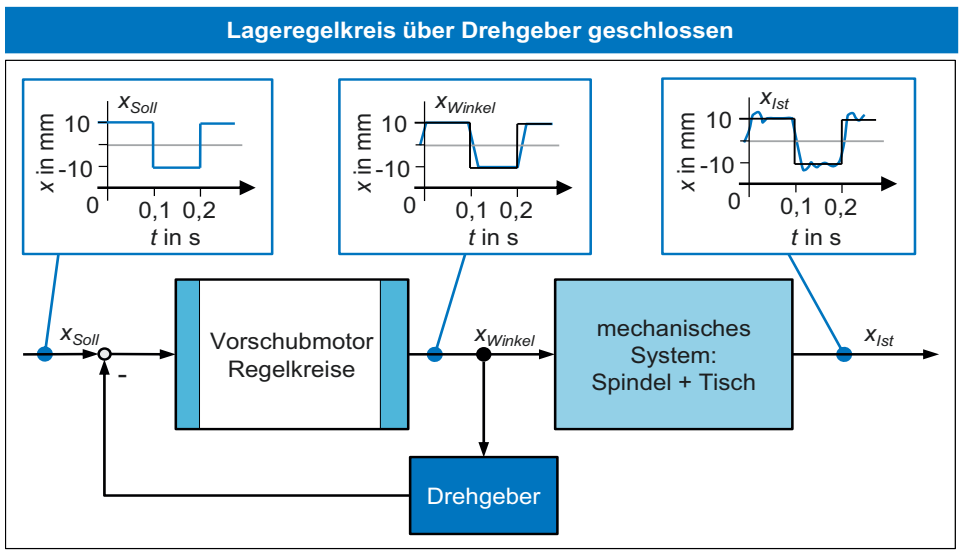


Bild 3.30 Einfluss des Ortes der Wegrückführung auf das dynamische Verhalten des Vorschubantriebs; Wegmessung an der Spindel mit Drehgeber

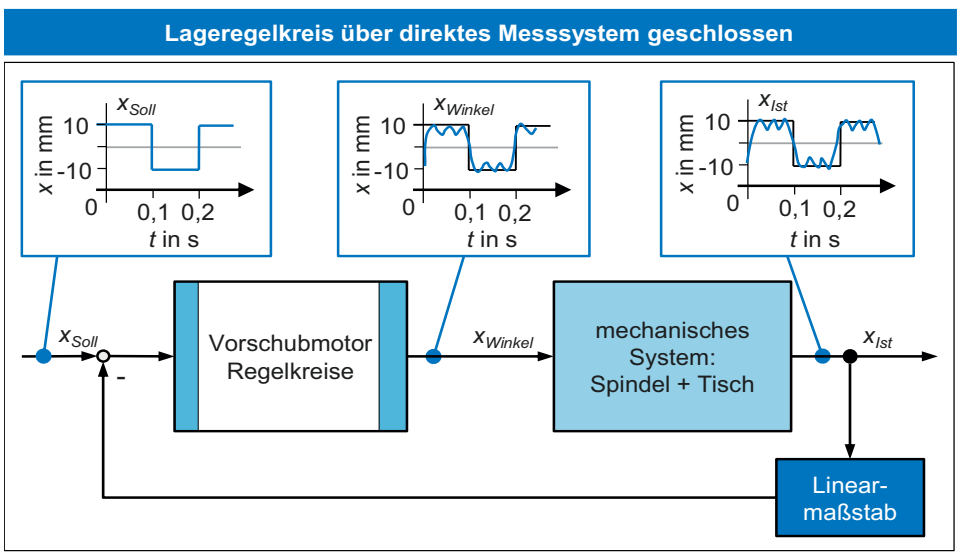


Bild 3.31 Einfluss des Ortes der Wegrückführung auf das dynamische Verhalten des Vorschubantriebs; Wegmessung am Schlitten mit Linearmaßstab

kreis wird bei Verwendung des direkten Messsystems instabil. Bei sprungförmiger Änderung des Weg-Sollsignales stellt sich eine oszillierende Winkellage der Motorwelle und eine dynamisch instabile Ist-Position ein (vgl. Bild 3.31).

3.4.2 Einfluss des Messsystems bei linearen Direktantrieben

Der Lage des Messsystems kommt insbesondere dann eine bedeutende Rolle zu, wenn lineare Direktantriebe geregelt werden sollen. Bei linearen Direktantrieben kommen ausschließlich direkt messende Maßstäbe zur Anwendung (vgl. Bild 3.15).

Zwei Effekte sind zu beobachten, wenn die Verstärkungsfaktoren im Lageregelkreis, aber insbesondere auch im Geschwindigkeitsregelkreis, zur Erzeugung eines besseren Übertragungsverhaltens erhöht werden: Der Antrieb erzeugt ein hörbares Rauschen durch schnelle Flußänderungen im Motor und bei weiterer Erhöhung kann sich eine hochfrequente Eigenschwingung des Maschinenschlittens ausbilden.

Die Erklärung für das Rauschen des Antriebs liegt darin, dass das Signalrauschen im Messsystem durch die Regler verstärkt wird, insbesondere durch den breitbandigen Geschwindigkeitsregelkreis. Hinzu kommt, dass das Lagesignal für die Erzeugung des Geschwindigkeitssignals zeitdiskret abgeleitet wird. Das Signalrauschen wird – je nach Zeittakt der Ableitung – stark erhöht. Eine mögliche Eigenschwingung wird in ▶ Kap. 3.3 bereits beschrieben. Es sind jedoch nicht nur die Frequenz und die Dämpfung der mechanischen Eigenschwingung von Interesse. Vielmehr beeinflussen auch Position, Orientierung und Anbringung des Messsystems die Ausprägung und Eigenschwingungsform des Systems. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Eigenschwingungsform der Mechanik unter Umständen erst durch die Regelung zu kritischen Amplituden angeregt wird. Die Schwingungen werden durch das Messsystem von der Regelung erfasst und verstärkt.

Da die Kräfte des Motors nicht nur in Vorschubrichtung, sondern – wenn auch in geringerem Maße – auch in Normalenrichtung und in Querrichtung wirken, können auch diese Schwingungsformen hinsichtlich der Regelung kritisch sein, wenn sie vom Messsystem erfasst werden. Daher kann sich beispielsweise die Anbringung des Messsystems in einem Knoten der mechanischen Eigenschwingung als sinnvoll erweisen. In jedem Fall sollte das Messsystem ausreichend steif an die mechanischen Gestell- und Schlittenelemente angeflanscht werden, um an dieser Stelle ein schwingungsfähiges System zu vermeiden.

Der Anbringungsort des Messsystems hat somit großen Einfluss auf die einstellbaren Reglerfaktoren und damit auf die Dynamik, die mit der Vorschubachse erreichbar ist. Dies betrifft sowohl das Führungs- als auch das Störverhalten. Bild 3.32 zeigt das Versuchsergebnis eines Draht-Abschneidversuchs. Dargestellt ist die Position des Maschinenschlittens nach einer sprungförmigen Belastung mit einer Störkraft von 981 N. Bei beiden Versuchen waren die Reglereinstellungen an der Stabilitätsgrenze des Systems eingestellt. Es zeigt sich, dass allein durch Wahl eines anderen Ortes für das Messsystem die Reglereinstellung, und damit die dynamische Störsteifigkeit der Vorschubachse, mehr als vervierfacht werden konnte [WECK99].

3.4.3 Verbesserung der Vorschubregelung durch Verwendung eines Ferraris-Sensors

Bei linearen Direktantrieben wird das direkte Positionsmesssystem auch als Feedback für den Geschwindigkeitsregelkreis verwendet. Das Messrauschen des Lagesensors wirkt sich hierbei aufgrund der notwendigen zeitdiskreten Differenzierung störend auf die berechnete Istgeschwindig-

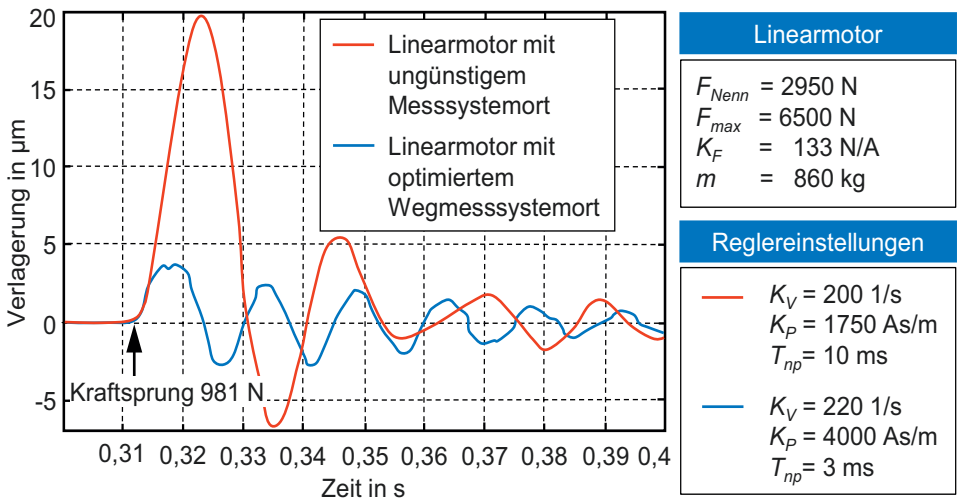


Bild 3.32 Messergebnisse der dynamischen Störsteifigkeit, Abschneidversuch

keit und damit auf die Regelgüte des Gesamtsystems aus. An dieser Stelle kann die Verwendung eines zusätzlichen Messsystems sinnvoll sein, das die Beschleunigung des Vorschubschlittens erfassen kann. Hierbei bieten sich insbesondere Relativbeschleunigungssensoren an, die ihr Signal direkt zwischen Vorschubschlitten und Umgebung erzeugen, deren Signal somit mit dem des entsprechenden Positionsmesssystems vergleichbar ist.

Der Aufbau eines Relativbeschleunigungssensors nach dem Ferraris-Prinzip wird im Folgenden für den linearen Fall näher beschrieben. Das genannte Prinzip lässt sich jedoch ohne weiteres auf den rotatorischen Fall übertragen. In diesem Fall muss das Wirbelstromband des Sensors durch eine Wirbelstromscheibe ersetzt werden. Die Bezeichnung „Ferraris-Sensor“ geht auf einen Versuch von Ferraris im Jahr 1885 zurück.

Der Sensor besteht aus zwei Teilen: einem Wirbelstromband, das in der Regel als schmales Aluminiumblech ausgeführt ist, und einem in der Regel geschlitzten Abtastkopf, der die Sensorik enthält. Dieser umgreift das Wirbelstromband U-förmig, sodass dieses bei einer Bewegung durch den Sensor hin- und hergezogen wird, ◘ Bild 3.33. Hierbei ist nicht relevant, ob das Blech oder der Abtastkopf bewegt wird, da die Relativbewegung zwischen den Bauteilen erfasst wird.

Der Abtastkopf besteht aus zwei geblechten Eisenjochen, die Permanentmagnete enthalten und ein konstantes magnetisches Feld erzeugen, das das Wirbelstromband durchdringt. Dieses Feld induziert bei einer Relativbewegung zwischen Blech und Magnetfeld eine Spannung im Blech, durch die sich Wirbelströme aufbauen (bewegter Leiter in einem Magnetfeld). Diese Wirbelströme erzeugen ihrerseits wiederum ein Magnetfeld, dessen Stärke proportional zur Relativgeschwindigkeit zwischen Sensorkopf und -blech ist.

Neben den Permanentmagneten enthält der Abtastkopf Sensorspulen, die so angeordnet sind, dass sie vom Magnetfeld der Wirbelströme durchflossen werden. Ändert sich das durch die Wirbelströme erzeugte Magnetfeld, so wird in diesen Spulen eine Spannung induziert, die gemessen werden kann.

Eine Änderung des Magnetfeldes der Wirbelströme wird im Wesentlichen durch eine Änderung der Relativgeschwindigkeit zwischen Sensorblech und Abtastkopf verursacht – also dann, wenn eine Relativbeschleunigung zwischen diesen Bauteilen auftritt. Die in den Spulen des Abtastkopfes induzierte Spannung ist somit proportional zur Relativbeschleunigung zwischen Blech und Sensorkopf. Je nach Ausführung der Sensoren ist diese Spannung unterschiedlich hoch, daher muss sie entsprechend dem gewünschten Einsatzfall unter Umständen vor einer Weiterverarbeitung verstärkt werden. Die Hersteller der Sensoren bieten an dieser Stelle zum Teil bereits eine im Sensorkopf integrierte Elektronik an (vgl. ◘ Bild 3.34).

Prinzipiell kann aus dem Beschleunigungssignal des Ferraris-Sensors durch Integration ein qualitativ hochwertiges Geschwindigkeitssignal erzeugt werden, da sich das Rauschen eines Messsignals durch die Integration verringert. Das Signal des Ferraris-Sensors enthält jedoch auch einige Störungen, die herausgefiltert werden müssen. Diese sind:

- Temperatureinfluss,
- Feldverdrängung,
- geometrische Abweichungen des Wirbelstrombandes,
- Materialinhomogenitäten des Wirbelstrombandes,
- Offset, Drift, Linearität und Rauschen der A/D-Wandler und Verstärker.

Der Einfluss der Temperatur ist insbesondere bei rotatorischen Sensoren ausgeprägt, da sich die Wirbelstromscheibe aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeiten und den damit verbundenen großen Wirbelströmen stark erwärmt. Durch den erhöhten Materialwiderstand kommt es daher zu einer verringerten Sensitivität des Sensorsignals.

Bei hohen Geschwindigkeiten kommt der Feldverdrängungseffekt hinzu. Er reduziert ebenfalls die Sensitivität des Sensors, da das sekundäre, durch die Geschwindigkeit erzeugte Magnetfeld das primäre Magnetfeld aufhebt. Auch dieser Effekt spielt bei der Verwendung von linearen Sensoren nur eine untergeordnete Rolle.

Da das Feld der Erregermagnete nicht homogen ist, wirken sich auch geometrische Abweichungen des Wirbelstrombandes als Störung auf das Messsignal aus. Diese sind in aller Regel positionsabhängig (z. B. eine Verformung im Blech), zusätzlich wirkt sich jedoch auch die Verfahrgeschwindigkeit auf die Amplitude dieser Störung aus.

Einen ähnlichen Einfluss wie geometrische Abweichungen haben Materialinhomogenitäten. Diese werden bei Verwendung des Werkstoffs Aluminium für die Wirbelstrombänder jedoch weitgehend vermieden.

Auch die Verstärkungs- und Auswertungselektronik wirkt sich auf das Signal der Sensoren aus. Die derzeit verfügbaren A/D-Wandler haben in aller Regel eine kleine Drift sowie einen geringen Offset. Teilweise treten auch nur Fehler in der Linearität des Signals auf. Diese Fehler gewinnen an Bedeutung, wenn das Signal zur Rekonstruktion der Geschwindigkeit integriert werden soll, da sich mit der Zeit auch kleine Fehler aufaddieren.

Um das Signal in der Vorschubregelung nutzen zu können, müssen diese Störeinflüsse zunächst kompensiert werden. Dies geschieht teilweise bereits direkt in der Verstärkerelektronik (z. B. Kompensation des Temperatureinflusses). Zusätzlich muss das Signal jedoch meist durch eine geeignete Beobachterstruktur gefiltert werden. Diese verwendet als Referenz die Position, die von einem parallelen Lagemesssystem erfasst wird.

Durch die Verwendung des Ferraris-Sensors in der Vorschubregelung lassen sich das Rauschen und die damit ver-

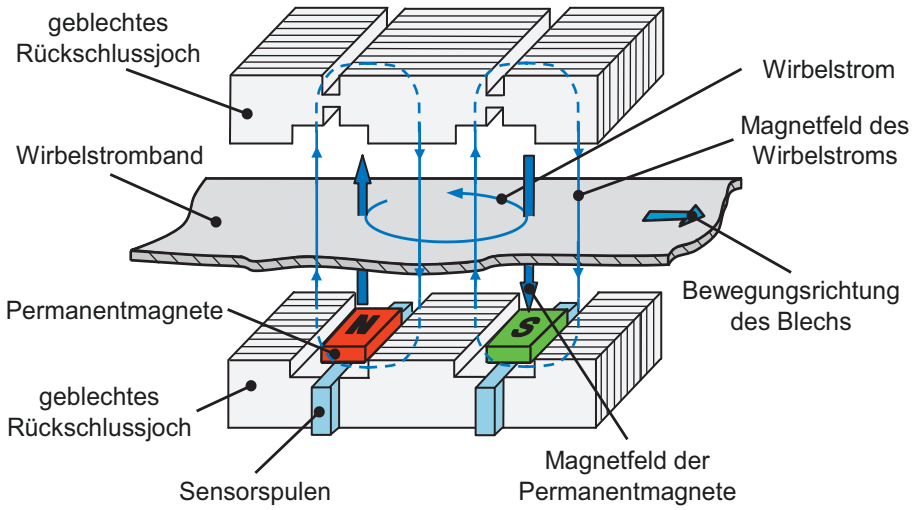


Bild 3.33 Prinzipieller Aufbau eines Ferraris-Sensors. Nach: Hübner

bundene Anregung des Systems signifikant verringern [HILL98]. Folglich lassen sich bei den meisten Systemen höhere Reglereinstellungen setzen. Hieraus ergibt sich eine erhöhte dynamische Steifigkeit und ein verbessertes Regelverhalten des Antriebs.

Alternativ zur Verbesserung der Regeleigenschaften lässt sich der Ferraris-Sensor auch zur „Veredelung" eines preiswerten Längenmesssystems verwenden. So reicht beispielsweise bei Messsystemen nach dem Reluktanzprinzip, die in die Führung eingelassen sind, die Auflösung für eine Differenzierung zur Rückkopplung in die Geschwindigkeitsregelung nicht aus. In diesem Fall kann die notwendige Signalqualität mit Hilfe eines Ferraris-Sensors erzeugt werden. Die Genauigkeit des Messsystems kann durch diese Maßnahme jedoch nicht verbessert werden.

Prinzipiell läßt sich der Ferraris-Sensor auch für die Verbesserung der Regelung von rotatorischen Antrieben einsetzen. Im Vergleich zu linearen Antrieben treten hier jedoch deutlich höhere Blechdurchzugsgeschwindigkeiten auf. Dies wirkt sich negativ auf die Temperaturentwicklung (die Scheibe heizt sich durch die Drehung auf) und die Empfindlichkeit aus (das große Sekundärfeld schwächt das Erregerfeld). Demzufolge sind die Sensoren in ihrer maximalen Drehzahl beschränkt, und es muss ein Kompromiss zwischen der Empfindlichkeit und der zulässigen Drehzahl gefunden werden.

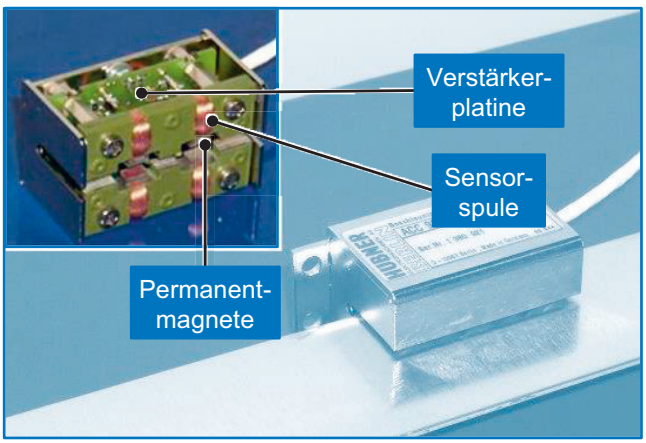


Bild 3.34 Linearer Ferraris-Sensor mit integrierter Verstärkerplatine

3.4.4 Kleinste verfahrbare Schrittweite

Bei Präzisionsmaschinen ist häufig von Interesse, wie genau die Vorschubantriebe auch kleinste Zustellungen umsetzen können. Dies stellt hohe Ansprüche an die Messsysteme und die Regelung des Systems. Im Folgenden wird zunächst das Verhalten einer Vorschubachse im Step-Response-Test erläutert und im Anschluss die Ursache für die Abweichungen erklärt.

Zur Untersuchung dieser Eigenschaften werden von der NC-Steuerung treppenförmige Sollwertänderungen vorgegeben, die von den Vorschubantrieben nachgefahren werden sollen. Die resultierenden Bewegungen werden z. B. mittels eines Laserinterferometers erfasst und über der Zeit dargestellt (vgl. Bild 3.35).

Bei den Untersuchungen muss dem Antrieb ausreichend Zeit gegeben werden, die einzelnen Positionen zu erreichen. Aus den Messschrieben können das Weg-Zeit-Verhalten bei kleinsten Stellsignalen, die verbleibenden Wegfehler sowie das Umkehrverhalten ermittelt werden. Gerade im Mikrometer- und Submikrometerbereich verhalten sich die meisten konventionellen Antriebe völlig anders als im Millimeterbereich.

Die kleinste Schrittweite ist dann erreicht, wenn die verbleibende Wegabweichung genauso groß oder sogar größer als der vorgegebene Sollwert ist. Bei konventionellen Vorschubantrieben sind die Istwerte oft von Rauschen überla-

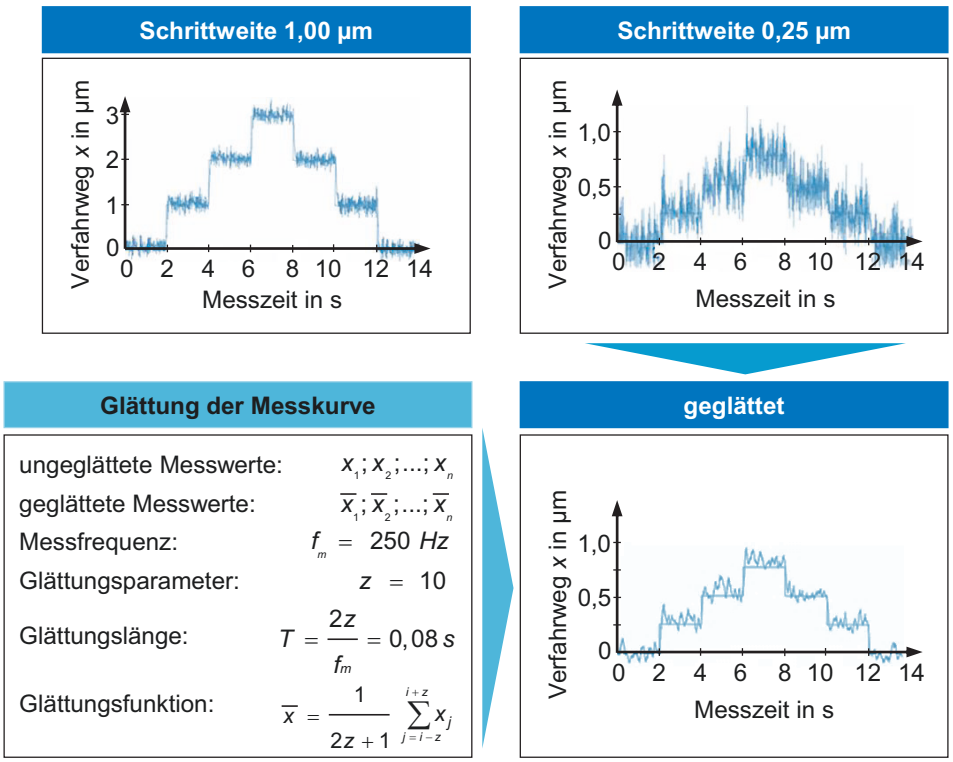


Bild 3.35 Bestimmung der kleinsten verfahrbaren Schrittweite von Vorschubantrieben

gert, sodass hier eine Glättung der Kurve vorgenommen werden muss, wie in Bild 3.35 unten dargestellt ist.

Der Grund für das verrauschte Ist-Signal liegt darin, dass die Ist-Position der Achse von den Messsystemen nur mit einem gewissen Grundrauschen aufgenommen werden kann. Die Regelkreise werten dieses Rauschen als fehlerhafte Position aus und versuchen, diesen Fehler auszuregeln. Hierdurch werden Stellgrößen aufgebaut, die zu einer kleinen Bewegung des Motors führen. Eine geregelte Achse bewegt sich also immer geringfügig um ihren Sollwert hin und her.

Diese unerwünschten Bewegungen werden umso stärker, je höher die Reglerfaktoren eingestellt sind. Andererseits können die Regelkreise jedoch auch nicht beliebig schwach eingestellt werden, da sonst die Grenzfrequenz des Vorschubsystems zu gering wird und damit keine dynamischen Bewegungen mehr möglich sind. Hier muss also je nach Anwendungsfall ein Kompromiss gefunden werden.

3.5 Statische und dynamische Steifigkeit von Vorschubachsen

Neben den Eigenschaften der Maschinenstruktur gewinnen auch die Steuerung und Regelung der Vorschubantriebe einen immer größeren Einfluss auf das Verhalten der Werkzeugmaschinen. Aufgrund der mit jeder neuen Generation wachsenden Rechenleistung von Mikroprozessoren werden die Antriebsregler immer leistungsfähiger. Dadurch können höhere Abtastraten der Regelkreise realisiert werden. Die Bandbreite der Regelkreise erhöht sich und die Regelung kann auch bei hohen Frequenzen noch Einfluss auf das dynamische Verhalten der Maschine nehmen. Außerdem können Kompensationsfunktionen in die Regler integriert werden, die beispielsweise bestimmte Frequenzen aus den Maschinenschwingungen herausfiltern und die Regelung auf diese Weise unempfindlich machen [ALTI11].

Die Anforderungen hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit sind stark gestiegen. Daher haben heutige Kugelrollspindeln eine wesentlich größere Spindelsteigung, um hohe Vorschubgeschwindigkeiten zu erzielen. Auf der anderen Seite wirken Prozesskräfte aufgrund der geringeren Selbsthemmung der Systeme stärker auf die Regelung ein. Bei linearen Direktantrieben fehlen die mechanischen Übertragungselemente im Kraftfluss völlig. Daher wirken alle Störkräfte aus Prozess und Reibung (in den Führungen) direkt auf die Regelung. Um das Verhalten von Werkzeugmaschinen zu beschreiben, muss daher die Regelung in die Betrachtungen einbezogen werden [HOFF08; OERT08].

Die Konturtreue der Vorschubbewegungen von Werkzeugmaschinen, d. h. das Maß der Ist-Bahnabweichung eines Vorschubschlittens vom vorgegebenen Weg, wird durch eine Reihe von Einflussgrößen und Systemeigenschaften bestimmt. Man muss bei der Bewertung von Vorschubbewegungsabweichungen zwischen mechanischen Strukturverformungen, bedingt durch innere Beschleunigungskräfte bzw. äußere Kräfte (Prozesskräfte) und regelungstechnischen Führungsgrößenabweichungen wie Schlepp-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfehlern

unterscheiden. Die Führungsgrößenabweichungen lassen sich durch regelungstechnische Maßnahmen sowie durch eine sinnvolle Geschwindigkeitsführung (begrenzter Ruck bzw. stetige Ruckveränderung) unter Berücksichtigung der maximal möglichen Beschleunigung und Geschwindigkeit des Antriebes fast beliebig reduzieren.

Die mechanischen Strukturverformungen im Antriebsstrang werden durch Beschleunigungskräfte sowie durch äußere Prozesskraftkomponenten in Vorschubrichtung verursacht. Beide Krafteinflüsse wirken sich in gleicher Weise auf die statischen und dynamischen Schlittenverlagerungen aus. Durch den zunehmenden Einsatz von elektrischen Lineardirektantrieben stellt sich zwangsläufig die Frage nach einer Definition der statischen und dynamischen Steifigkeit dieser Antriebsarten, denn diesen fehlen die kraftaufnehmenden mechanischen Getriebekomponenten, die bei rotatorischen Antrieben die Grundlage der Berechnungen darstellen.

Im Folgenden wird eine Definition der statischen und dynamischen Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit von Vorschubantrieben erläutert. Hierbei wird zwischen elektromechanisch und mit Linearmotor angetriebenen Systemen unterschieden.

Unter der Steifigkeit einer mechanischen Struktur versteht man den Quotienten ($k_{xx} = F_x/x$) aus Belastung (z. B. einer Kraft F_x) über der hierdurch verursachten Verformung (x, in Richtung von F_x) an einem definierten Punkt der Maschinenstruktur, meist dem Arbeitspunkt der Maschine. Der reziproke Wert der Steifigkeit wird als Nachgiebigkeit ($d_{xx} = x/F_x = 1/k_{xx}$) bezeichnet, die häufiger bei dynamischen Betrachtungen in Form von Resonanzkurven und komplexen Ortskurven (Gleichung (3.66)) Anwendung findet.

$$d_{xx}(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{\hat{x}(\omega)}{\hat{F}(\omega)} \cdot e^{-j\varphi(\omega)} \tag{3.66}$$

3.5.1 Statische Steifigkeit

Unter statischer Steifigkeit versteht man den Verformungswiderstand, den eine Struktur einer statischen äußeren Last im eingeschwungenen Zustand entgegenbringt. Wird ein System sprungförmig mit der statischen Last $F_{stör}$ belastet und es stellt sich die Verlagerung x ein, errechnet sich die statische Steifigkeit nach Gleichung (3.65). Das eingeschwungene Systemverhalten ($t \to \infty$) findet sich im Frequenzbereich bei der Frequenz $\omega = 2\pi f = 0\ s^{-1}$ wieder. Demzufolge kann die statische Steifigkeit im Amplitudengang bei der Frequenz 0 abgelesen werden.

$$k_{xx,stat} = \frac{F_{stör}}{x(t \to \infty)} = \frac{F(j\omega = 0)}{X(j\omega = 0)} \tag{3.67}$$

3.5.1.1 Statische Steifigkeit elektromechanischer Antriebe (Gewindespindelantrieb)

Bei einer Vorschubachse mit elektromechanischem Antriebsstrang beeinflussen alle mechanischen Bauelemente, die im Kraftfluss liegen, den Steifigkeitsbetrag, wobei zwischen Reihen- und Parallelschaltung der Einzelelemente unterschieden wird (vgl. Bild 3.36).

Da an dieser Stelle nur der Einfluss des Antriebsstrangs und nicht der Führungen betrachtet werden soll, wird die Prozesskraft in Vorschubrichtung wirkend angenommen. Aufgrund der mangelnden Selbsthemmung des Kugelgewindetriebs sind diese Antriebe nicht rückwirkungsfrei, d. h. der Motor hat aufgrund der Kraft F_x ein Rückmoment aufzubringen, wenn die Reibungskräfte vernachlässigt werden (Gleichung (3.68)). Es gehen neben der Prozesskraft die Spindelsteigung h und die Getriebeübersetzung i ein.

$$M_{d,Rück} = F_{stör} \cdot \frac{h}{2\pi i} \tag{3.68}$$

Bei der Verwendung von indirekten Messsystemen ist auch der integrierende Anteil des Regelsystems (zumeist im Drehzahlregler vorhanden) nicht in der Lage, die elastische Ver-

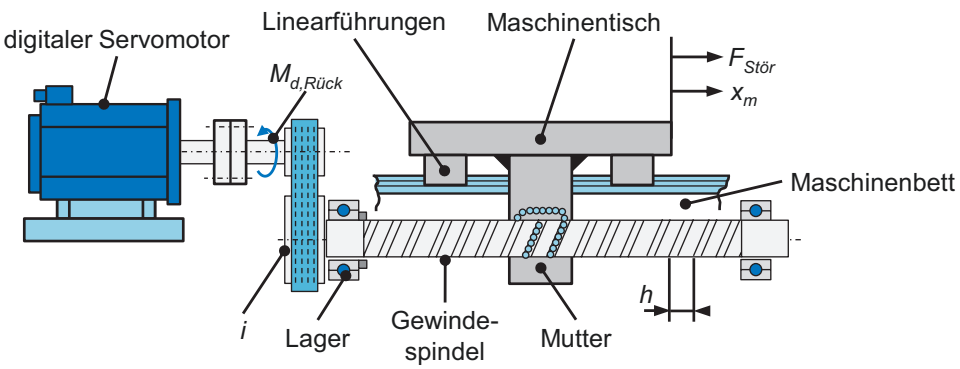


Bild 3.36 Konventionelle Antriebsachse

formung zu erkennen und auszugleichen. Der Motor hält mit Hilfe des Reglers lediglich die vorgegebene Winkellage der Motorwelle bzw. der Kugelgewindespindel ein, wobei er das hierzu notwendige Rückmoment aufbringt. Die Gesamtsteifigkeit bzw. -nachgiebigkeit wird somit hauptsächlich durch die Elemente Kugelrollspindel, Mutter und Spindellagerung bestimmt.

Die statische Antriebs-Gesamtnachgiebigkeit ergibt sich bei der üblichen Reihenschaltung der Einzelnachgiebigkeiten nach Gleichung (3.69). Die statische Antriebs-Gesamtsteifigkeit ist der Reziprokwert der Nachgiebigkeit (Gleichung (3.70)).

$$d_{ges} = d_{Mutter} + d_{Spindel} + d_{Lager} = 1/k_{Mutter} + 1/k_{Spindel} + 1/k_{Lager} \tag{3.69}$$

$$k_{ges} = \frac{k_{Mutter} \cdot k_{Spindel} \cdot k_{Lager}}{k_{Mutter} \cdot k_{Spindel} + k_{Mutter} \cdot k_{Lager} + k_{Spindel} \cdot k_{Lager}} \tag{3.70}$$

Während der konstanten Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsphase des Schlittens wird dasselbe mechanische System durch Beschleunigungs- bzw. Verzögerungskräfte gestaucht bzw. gestreckt. Diese Verformungen können bei indirekten Messsystemen ebenfalls nicht ausgeregelt werden und bilden sich daher in der oben beschriebenen Weise vollständig auf der Werkstückoberfläche ab.

Bei der Verwendung eines linearen, direkten Wegmesssystems wird die statische elastische Verformung durch den Regler mit integrierendem Anteil komplett ausgeregelt, sodass die nach außen wirksame statische Steifigkeit des Antriebs trotz innerer elastischer Strukturverformungen den Wert ∞ annimmt.

3.5.1.2 Statische Steifigkeit beim elektrischen Lineardirektantrieb

Der Unterschied zwischen elektrischen Lineardirektantrieben und Kugelrollspindelantrieben besteht darin, dass hier die mechanischen Antriebskomponenten im Kraftfluss fehlen und nur direkte Wegmesssysteme zur Anwendung kommen können (Bild 3.37).

Die statische Steifigkeit wird also allein durch die Krafterzeugung in Verbindung mit der Regelung des Motors bestimmt. Der Integralanteil des Reglers sorgt dafür, dass der Schlitten unter statischer äußerer Belastung die vorgegebene Sollposition einnimmt. Seine statische Steifigkeit ist – wie auch bei den elektromechanischen Antrieben mit direktem Wegmesssystem – unendlich, solange die äußeren Kräfte die Maximalkraft des Motors nicht überschreiten.

3.5.2 Dynamische Steifigkeit

Unter dynamischer Steifigkeit versteht man den elastischen Verformungswiderstand einer Struktur gegenüber einer äußeren dynamischen Kraft. In der Praxis wird der reziproke Wert, die dynamische Nachgiebigkeit, angewendet. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit dieser Größe kann nicht ein einziger Kennwert verwendet werden, vielmehr bestimmt eine Funktion (Kurvenverlauf) das dynamische Verhalten über der Frequenz. Der Nachgiebigkeitsfrequenzgang bzw. die Nachgiebigkeitsortskurve sind bei linearem Systemverhalten aussagefähige Darstellungsformen für diese Kenngröße.

Wie bei der Betrachtung der statischen Antriebseigenschaften von elektrischen Lineardirektantrieben wird auch die dynamische Nachgiebigkeit bezogen auf die Prozessstör-

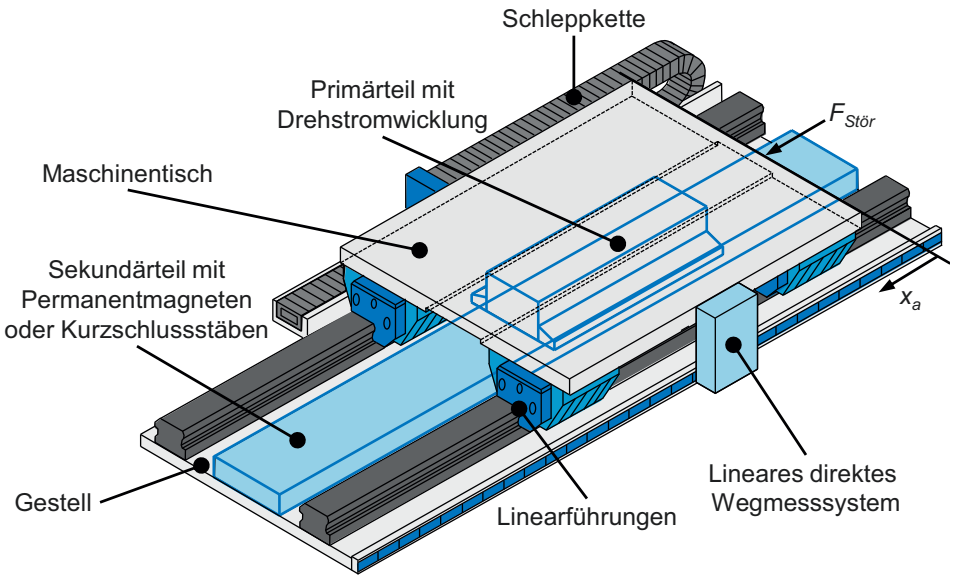


Bild 3.37 Linearer Direktantrieb

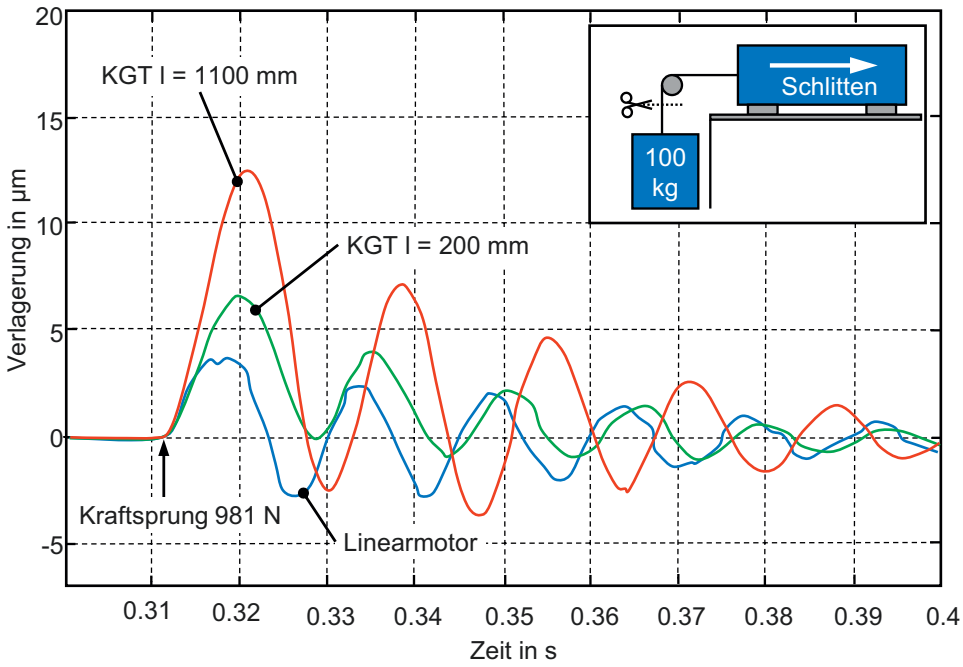


Bild 3.38 Vergleich der Reaktion verschiedener Vorschubsysteme auf einen Kraftsprung

kraft oder Beschleunigungsvorgänge allein durch die regelungstechnischen Eigenschaften des Antriebssystems bestimmt. Äußere Kräfte wirken direkt auf den Motor und werden nicht mehr durch eine Kugelrollspindel oder ein Getriebe untersetzt. Lediglich die Tischmasse (einschließlich der Motormasse) wirkt sich mit zunehmender Anregungsfrequenz der Störkraft auf die Schwingungsamplituden reduzierend aus.

Eine angreifende Störkraft muss daher von der Kraft des Antriebs kompensiert werden. Diese Antriebskraft wird über die Regelung als Reaktion auf eine gemessene Abweichung von den Sollgrößen aufgebaut.

Infolge dieses Sachverhaltes kann die dynamische Störsteifigkeit im Zeitbereich als der Quotient aus angreifender Störkraft $F_{Stör}$ und der daraus resultierenden maximalen Lageabweichung $\hat{x}_a$ des Maschinenschlittens definiert werden, Gleichung (3.71).

$$k_{dyn} = \frac{F_{stör}}{\hat{x}_a(t)} \tag{3.71}$$

Bild 3.38 zeigt die Reaktionen von zwei verschiedenen Antriebssystemen auf einen Kraftsprung. Dargestellt sind die Verläufe der Verlagerung eines Kugelgewindetriebs (KGT) mit einer freien Kugelrollspindel von 200 und 1100 mm sowie eines linearen Direktantriebs. Die Regler wurden am Rand des jeweiligen Systems eingestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Steifigkeit des Kugelgewindetriebs abhängig von der freien Länge der Kugelrollspindel ist. Der lineare Direktantrieb hingegen hat im gesamten Verfahrbereich dieselbe dynamische Störsteifigkeit.

3.5.2.1 Dynamische Steifigkeit elektromechanischer Vorschubachsen

Bei konventionellen Antrieben sind – wie auch schon bezüglich der statischen Belastung dargelegt – mehrere Einflüsse zu berücksichtigen. Dies ist auf der einen Seite das rein mechanische Schwingungssystem, bestehend aus Tisch- und Werkstückmasse, den als Federn wirkenden Elementen Mutter, Spindel und Lager, sowie der Dämpfung, die vornehmlich durch die Reibungskräfte der Führungen bestimmt wird. Der Antrieb wird hierbei nicht betrachtet, d. h. als ideal steif angenommen, Gleichung (3.72).

$$G_{Mechanik}(j\omega) = \frac{x_m(j\omega)}{F_x(j\omega)} = \frac{\frac{1}{k_{ges}}}{1 + \frac{2D}{\omega_0} j\omega + \frac{1}{\omega_0^2}(j\omega)^2} \tag{3.72}$$

$$\text{mit } D = \frac{c}{2m\omega_0} \quad \text{und} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_{ges}}{m}}. \tag{3.73}$$

Zusätzlich geht die Regeldynamik des Antriebs als Reaktion auf Störgrößen (hier: Prozesslast) ein, Gleichung (3.74).

$$G_{Antrieb}(j\omega) = \frac{X_a(j\omega)}{F_x(j\omega)} \cdot e^{-j\omega t} \tag{3.74}$$

Bei kleinen Maschinen liegen die Eigenfrequenzen der Mechanik aufgrund der relativ geringen Massen bei großen Spindelsteifigkeiten in der Regel höher als diejenigen des Antriebsregelkreises. Daher kann der Antrieb Schwingungen der Mechanik nicht oder nur in geringem Maße anregen. Die

Bandbreite der Maschinenachse wird also primär durch die Regeldynamik des Antriebsstrangs begrenzt.

Liegen die Kennkreisfrequenzen der Mechanik und des Antriebs dicht nebeneinander, sinkt die Dämpfung der Achse ab, da sich die Resonanzstellen der beiden Systeme überlagern.

Bei großen Maschinen begrenzt im Wesentlichen die Steifigkeit der Mechanik die Dynamik der Achse, da große Massen beschleunigt werden müssen und der Schlitten einen schwingungsfähigen Aufbau bewegt, z. B. bei Portalfräsmaschinen. Für den Antriebsstrang ergibt sich dann jedoch prinzipiell die Möglichkeit, auftretende Schwingungen aktiv zu dämpfen bzw. durch eine geeignete Geschwindigkeitsführung zu unterdrücken.

Die mechanischen Eigenschwingungen sowie die durch Störungen angeregten Schwingungen werden bei Verwendung von indirekten Messsystemen nicht erfasst. Sie können daher auch mit hochdynamischen Reglern nicht kompensiert werden. Bei direkten Messsystemen sind die Einflüsse beider Systeme gekoppelt. Daher sind Eigenschwingungen bei schwach gedämpften und nachgiebigen mechanischen Komponenten nur mit hohem regelungstechnischem Aufwand auszugleichen. Zur aktiven Dämpfung von mechanischen Schwingungen müssen hierzu komplexe Regelungsstrukturen wie die Zustandsregelung mit Beobachterstrukturen eingesetzt werden.

3.5.2.2 Elektrischer Lineardirektantrieb

Der Regelkreis des linearen Direktantriebs entspricht dem eines rotatorischen Servoantriebs, bestehend aus einer Kaskadenregelung mit Strom-, Drehzahl- und Lageregelung, ◘ Bild 3.39. Die Geschwindigkeit des Antriebs wird aus dem Signal des direkten Wegmesssystems abgeleitet.

Im Gegensatz zum elektromechanischen Antrieb beeinträchtigen nicht mehr die Resonanzstellen der mechanischen Übertragungselemente die Regelkreise (speziell Geschwindigkeits- und Lageregelkreis), sondern es wirken sich hauptsächlich die Eigenschaften des elektrischen Systems wie Abtast- und Totzeiten innerhalb des Regelkreises und die Stromanstiegszeit des Motors sowie das Verhalten des Führungssystems begrenzend aus, vgl. auch ▶ Kap. 3.3.3.

Einflüsse des Lage- und Geschwindigkeitsregelkreises

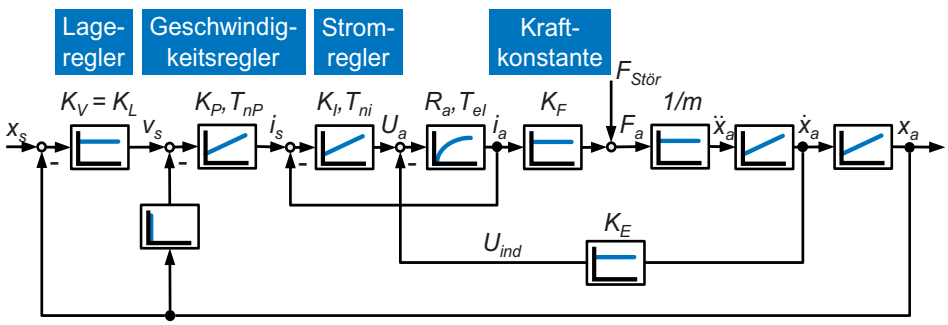
Wie das Blockschaltbild in ◘ Bild 3.39 zeigt, wird das Störverhalten des Lineardirektantriebs bei idealem Verhalten des Stromregelkreises über die Reglerparameter des Geschwindigkeitsreglers, Verstärkung K_p und Nachstellzeit T_{np}, und die Verstärkung des Lageregelers K_L bestimmt. Der Verstärkungsfaktor des Lageregelers ist beim linearen Direktantrieb aufgrund der im Vergleich zu elektromechanischen Antrieben fehlenden Übersetzung der Geschwindigkeitsverstärkung K_V gleichzusetzen. Sie ist die wichtigste lineare und für das Verhalten des Lageregelkreises maßgebliche Kenngröße und gibt das Verhältnis von Istgeschwindigkeit zu Lageabweichung im eingeschwungenen Zustand an (vgl. ▶ Kap. 3.2.3).

Während die Laststeifigkeit des linearen Direktantriebs im höherfrequenten Bereich primär über die Verstärkungen der beiden Regler festgelegt wird, wirkt sich der integrierende Anteil des Geschwindigkeitsreglers auf die stationäre Genauigkeit aus. Zu beachten ist dabei, dass die beiden Reglerverstärkungen nicht unabhängig voneinander verändert werden können. Dies kann mit dem in ◘ Bild 3.40 gestellten Wirkungsplan verdeutlicht werden. Das Verhalten des Stromregelkreises ist hier als ideal angenommen und der integrierende Anteil des Geschwindigkeitsreglers vernachlässigt worden (vgl. ▶ Kap. 3.2.1).

Der Führungsfrequenzgang des Lageregelkreises berechnet sich für diesen Regelkreis gemäß Gleichung (3.75).

$$G_{x,Regel}(j\omega) = \frac{x_a(j\omega)}{x_s(j\omega)} = \frac{1}{1+\frac{1}{K_V}(j\omega)+\frac{m}{K_V K_p K_F}(j\omega)^2} \tag{3.75}$$

Dieser Führungsfrequenzgang beschreibt das Verhalten eines Systems mit Verzögerungsverhalten zweiter Ordnung. Durch Koeffizientenvergleich ergeben sich die Eckkreisfrequenz $\omega_{0,Regel}$ und die Dämpfung D_{Regel} des lagegeregelten Antriebs zu:



◘ **Bild 3.39** Regelkreise eines linearen Direktantriebs

$$\omega_{0,Regel} = \sqrt{\frac{K_V K_p K_F}{m}} \quad \text{und}$$
$$D_{Regel} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{K_p K_F}{K_V m}}. \tag{3.76}$$

Aus Gleichung (3.76) wird deutlich, dass eine Erhöhung der Eckkreisfrequenz $\omega_{0,Regel}$ des Antriebs durch die Geschwindigkeitsverstärkung K_V sinnvollerweise nur durch ein gleichzeitiges Anpassen der Verstärkung des Geschwindigkeitsreglers K_p erfolgen kann. Eine alleinige Erhöhung von K_V zieht eine Verringerung des Dämpfungsgrades D_{Regel} mit sich, was theoretisch durch Erhöhen von K_p ausgeglichen werden kann. Dieser Zusammenhang findet sich auch in der Abhängigkeit der Reglerparameter voneinander wieder, der in Bild 3.28 dargestellt ist.

Berechnung der dynamischen Steifigkeit von linearen Direktantrieben

Neben den Möglichkeiten der messtechnischen Ermittlung der dynamischen Steifigkeit sollen im Folgenden zwei Wege beschrieben werden, die eine rechnerische Abschätzung der Steifigkeit mit Hilfe der Reglerparameter und der Masse zulassen.

Zunächst soll eine „Faustformel" hergeleitet werden, die auf der Vernachlässigung des integrierenden Anteils des Geschwindigkeitsreglers und der Idealisierung des Stromregelkreises beruht. Hierdurch ergibt sich ein Systemverhalten zweiter Ordnung ($G_{stör,P}$), dessen Endabweichung ein Maß für die Steifigkeit des Originalsystems darstellt.

Als zweite Möglichkeit wird eine verbesserte Methode beschrieben, bei der der Integralanteil des Schwingungsreglers und die Masse des Schlittens berücksichtigt werden. Der Stromregelkreis wird auch hier als ideal angenommen. Es ergibt sich zunächst ein System dritter Ordnung ($G_{stör,PI}$), das zu einem Ersatzsystem zweiter Ordnung vereinfacht wird ($G_{stör,PI,ers}$). Mit Hilfe dessen maximaler Schwingungsamplitude wird die Steifigkeit des Originalsystems bestimmt.

Grobe Abschätzung der dynamischen Steifigkeit

Die maximale Auslenkung eines Linearantriebs als Reaktion auf eine Störkraft entspricht näherungsweise dem stationären Fehler, der sich bei Einsatz eines einfachen P-Reglers im Geschwindigkeitsregelkreis einstellt, da der Integralanteil bei hohen Anregungsfrequenzen nicht wirksam ist. Dieser Fehler lässt sich vereinfacht mit Hilfe des Störfrequenzgangs des in Bild 3.40 dargestellten Lageregelkreises bestimmen, Gleichung (3.77).

$$G_{stör,P}(j\omega) = \frac{X_a(j\omega)}{F_{stör}(j\omega)} = \frac{\frac{1}{K_V K_p K_F}}{1 + \frac{1}{K_V}(j\omega) + \frac{m}{K_V K_p K_F}(j\omega)^2} \tag{3.77}$$

Gemäß dem Endwertsatz der Laplace-Transformation lässt sich die bleibende Auslenkung des P-geregelten Systems, die der maximalen Auslenkung in diesem Fall gemäß Gleichung (3.71) entspricht, wie folgt berechnen, Gleichung (3.78).

$$x_{a,max} = \lim_{j\omega \to 0} G_{stör}(j\omega) \cdot F_{stör} = \frac{1}{K_V K_p K_F} F_{stör} \tag{3.78}$$

Somit ergibt sich die statische Ersatzsteifigkeit nach Gleichung (3.79).

$$k_{stat} = \frac{F_{stör}}{x_{a,max}} = K_V K_p K_F. \tag{3.79}$$

Zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens ist die Gleichung des Frequenzgangs (3.77) mit den ableitbaren Kennwerten $\omega_{0,Regel}$ und D_{Regel} (3.76) umfassend aussagefähig. Will man jedoch das Verhalten auf einen repräsentativen Kennwert beschränken, so bietet sich die maximale Überschwingamplitude der Übergangsfunktion, d. h. der Antwortfunktion auf einen Kraftsprung an.

Nach Bild 3.41 beträgt die maximale Amplitude zum Zeitpunkt $t = \tau/2$:

$$\frac{x_{max}}{F_{stör}} = K\left[1 + \frac{e^{-\frac{D\pi}{\sqrt{1-D^2}}}}{\sqrt{1-D^2}}\right] \tag{3.80}$$

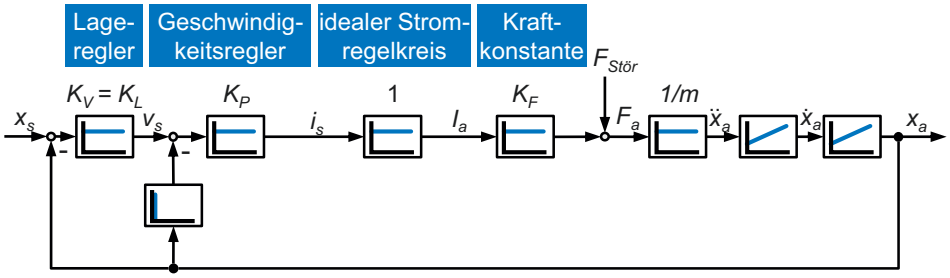


Bild 3.40 Vereinfachtes Blockschalt-Bild der Regelkreise, mit P-Geschwindigkeitsregler

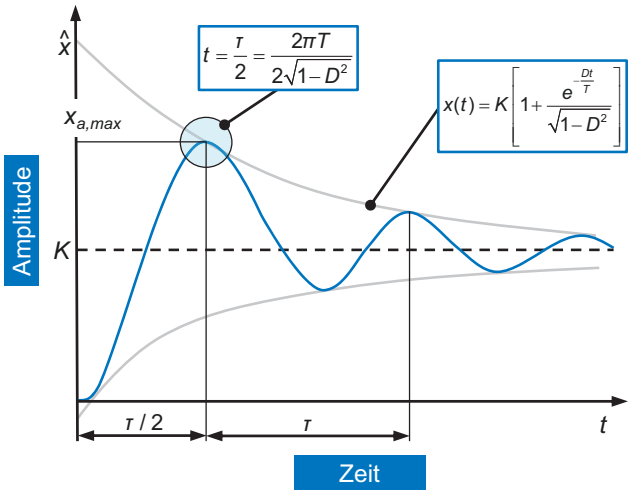


Bild 3.41 Bestimmung der maximalen Überschwingamplitude der Übergangsfunktion

$$\text{mit } D = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{K_p K_F}{K_V m}} \text{ und } K = \frac{1}{K_V K_p K_F} \tag{3.81}$$

Der repräsentative Steifigkeitswert ist dann der Reziprokwert von Gleichung (3.82).

$$k_{dyn} = \frac{F_{stör}}{x_{max}} = K_V K_p K_F \frac{1}{\left[1 + \frac{e^{-\frac{D\pi}{\sqrt{1-D^2}}}}{\sqrt{1-D^2}}\right]} \tag{3.82}$$

Mit Hilfe der hier hergeleiteten Formel kann eine grobe Abschätzung der Störsteifigkeit vorgenommen werden. Hierbei wird die bleibende Abweichung zu Grunde gelegt, die sich ergibt, wenn der Integralanteil des Geschwindigkeitsreglers vernachlässigt, das Übertragungsverhalten des Stromreglers als ideal angenommen und der Einfluss der Masse über die Einstellung des Verstärkungsfaktors des Geschwindigkeitsreglers kompensiert werden. Insbesondere die Vernachlässigung des Integralanteils des Geschwindigkeitsreglers führt jedoch zu einem Fehler, da er im Bereich der betrachteten Frequenzen (30–80 Hz) noch einen Einfluss hat.

Verbesserte Abschätzung der dynamischen Steifigkeit

Eine genauere Bestimmung der dynamischen Störsteifigkeit lässt sich vornehmen, wenn der Geschwindigkeitsregelkreis mit PI-Regler in die Betrachtungen mit einbezogen wird. Der Stromregelkreis wird weiterhin als ideal betrachtet. Es ergibt sich das folgende Modell, Bild 3.42. Der Störfrequenzgang dieses Systems ergibt sich nach Gleichung (3.83).

$$G_{stör,PI}(j\omega) = \frac{X_a(j\omega)}{F_{stör}(j\omega)} = \frac{\frac{T_{np}}{K_V K_p K_F}(j\omega)}{\frac{mT_{np}}{K_V K_p K_F}(j\omega)^3 + \frac{T_{np}}{K_V}(j\omega)^2 + \left(\frac{1}{K_V} + T_{np}\right)(j\omega) + 1} \tag{3.83}$$

Die Eigenschaften dieses Frequenzgangs entziehen sich einer direkten Berechnung, da es sich bei ihm um ein Verzögerungsglied dritter Ordnung handelt. Ziel ist daher, ein Ersatzsystem zweiter Ordnung zu finden, dessen dynamische Steifigkeit der des Systems dritter Ordnung nahe kommt. Ein solches System ist durch seine Dämpfung und Eigenfrequenz gekennzeichnet. Um das Ersatzsystem zu bestimmen, wird der Störfrequenzgang zunächst umgeformt. Es ergibt sich im Wesentlichen die Form eines PT_2-Gliedes, erweitert um einen Term im Nenner, Gleichung (3.84).

$$G_{stör,PI}(j\omega) = \frac{\frac{1}{K_V K_p K_F}}{\frac{m}{K_V K_p K_F}(j\omega)^2 + \frac{1}{K_V}j\omega + 1 + \frac{1}{K_V T_{np}} + \frac{1}{T_{np} j\omega}} \tag{3.84}$$

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der letzte Nennerterm für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden kann, da er im relevanten Frequenzbereich bereits gegenüber den anderen Termen klein wird. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass diese Abschätzung bei kleinen Frequenzen einen Fehler erzeugt. Da Linearantriebe in der Regel so ausgelegt werden, dass sich Eigenfrequenzen von mehr als 50 Hz ergeben, kann dieser Fehler in der Praxis vernachlässigt werden.

Der Störfrequenzgang des Ersatzsystems hat die Form eines PT_2-Gliedes, Gleichung (3.85).

$$G_{stör,PI,ers}(j\omega) = \frac{\frac{T_{np}}{K_p K_F (1 + T_{np} K_V)}}{\frac{T_{np} \cdot m}{K_p K_F (1 + T_{np} K_V)}(j\omega)^2 + \frac{T_{np}}{(1 + T_{np} K_V)}(j\omega) + 1} \tag{3.85}$$

Dessen Eckkreisfrequenz, Dämpfung und Verstärkung können leicht durch einen Koeffizientenvergleich mit einem PT_2-Glied ermittelt werden, Gleichung (3.86).

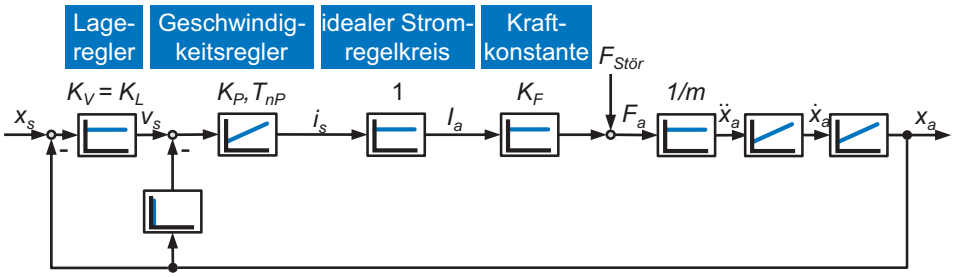


Bild 3.42 Vereinfachtes Blockschaltbild der Regelkreise, mit PI-Geschwindigkeitsregler

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_p K_F (1 + K_V T_{np})}{m T_{np}}}$$

$$D = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{K_p K_F T_{np}}{m(1 + K_V T_{np})}} \qquad (3.86)$$

$$K = \frac{T_{np}}{K_p K_F (1 + K_V T_{np})}$$

Damit sind die Kenngrößen für das Ersatzsystem bestimmt. Zur Berechnung der maximalen Abweichung wird wieder die Abklingkurve des Ersatzsystems infolge eines Eingangseinheitssprungs (Bild 3.41) herangezogen. Die Systemschwingung ergibt sich aus einer exponentiell abklingenden Kurve, die von einer sinusförmigen Schwingung überlagert wird. Die maximale Abweichung des Systems ergibt sich für den Maximalwert der ersten Auslenkungsamplitude. Dieser wird in guter Näherung nach einer halben Schwingungsdauer erreicht.

Berechnet man den Maximalwert der ersten Auslenkungsperiode unter Zuhilfenahme der Einhüllenden, ergibt sich ein relativ genauer Wert für die Auslenkung des Systems, bezogen auf die Störkraft. Dieser Wert entspricht der dynamischen Nachgiebigkeit des Systems, aus dessen Kehrwert die dynamische Steifigkeit k_{dyn} berechnet werden kann.

Die genauere Abschätzung der dynamischen Steifigkeit bei linearen Direktantrieben lautet:

$$k_{dyn} = \frac{F_{stör}}{\hat{x}_a} = \frac{K_p K_F (1 + K_V T_{np})}{T_{np}\left(1 + \frac{e^{-D\frac{\pi}{\sqrt{1-D^2}}}}{\sqrt{1-D^2}}\right)} \qquad (3.87)$$

$$\text{mit } D = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{K_p K_F T_{np}}{m(1 + K_V T_{np})}}.$$

Die errechneten Werte für die dynamische Steifigkeit sind, verglichen mit der einfachen Abschätzung nach Gleichung (3.87), über einen wesentlich größeren Einstellbereich der Reglerparameter und der bewegten Massen genau.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A/D	Analog/Digital
D	Differenzierendes Übertragungsverhalten
DGL	Differenzialgleichung
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
I	Integrierendes Übertragungsverhalten
NC	Numerical Control
P	Proportionales Übertragungsverhalten
PD	Proportional-Differenzierendes Übertragungsverhalten
PI	Proportional-Integrierendes Übertragungsverhalten
PID	Proportional-Integral-Differenzierendes Übertragungsverhalten
PT	Proportional-Totzeit Übertragungsverhalten
SISO	Single Input, Single Output

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A		Systemmatrix
A_R		Amplitudenreserve
B		Eingangsmatrix
C	–	Ausgangsmatrix
C	–	Dämpfungsmaß
C_i	–	i-te Koeffizient
D	kg/s	Dämpfung
D	–	Durchgriffsmatrix
D_{Regel}	kg/s	Dämpfungsgrad des lagergeregelten Antriebs
F	N	Kraft
F_i	N	i-te Kraft
F_{max}	N	maximal zulässige Kraft
F_{Nenn}	N	Nennkraft
$F_{Stör}$	N	Störkraft, statische Last

F_x	N	Kraft in x-Richtung
J_{ges}	kg*s²	reduzierte Massenträgheitsmoment
J_i	kg*s²	*i*-te Massenträgheitsmoment
K	–	Steifigkeit
K_D	–	differenzialer Verstärkungsfaktor
K_i	–	integraler Verstärkungsfaktor
K_I	–	integraler Verstärkungsfaktor
K_{krit}	–	Verstärkungsfaktor
K_l	–	Verstärkungsfaktor des Lagerreglers
K_p	As/m	Verstärkungsfaktor im Geschwindigkeitsregelkreis
K_R	–	proportionaler Verstärkungsfaktor
K_{Rkrit}	As/m	Verstärkungsfaktor am Stabilitätsrand
K_S	–	Sprunghöhe
K_V	1/s	Geschwindigkeitsverstärkung, K_V-Faktor
L_A	H	Induktivität der Motorwicklung
M	–	Massematrix
P_k	–	kritischer Punkt
R	–	Reglermatrix
R_A	Ohm	Widerstand der Motorwicklung
S	–	Vorfiltermatrix
T_i	Nm	*i*-tes Moment
T_{krit}	s	Schwingungsperiodendauer
T_0	s	Abtastzeit
T_g	s	Ausgleichszeit
T_n	s	Nachstellzeit
T_{np}	s	Nachstellzeit im Geschwindigkeitsregelkreis
T_t	s	Totzeit
T_u	s	Verzugszeit
T_v	s	Vorhaltzeit
U	V	Motorspannung
U_s	V	Motorsollspannung
X_a	–	Ausgangssignal
$X_{a,t}$	–	Ausgangssignal zum Zeitpunkt *t*
X_e	–	Eingangssignal
$X_{e,t}$	–	Eingangssignal zum Zeitpunkt *t*
a_0, a_1, a_2	–	systembestimmende konstante Beiwerte
b_0, b_1, b_2	–	systembestimmende konstante Beiwerte
$C_{r+t,i}$	kg/s	*i*-te rotatorische und translatorische Dämpfung
d	kg/s	Dämpfungsgrad
d_{Lager}	mm/N	Nachgiebigkeit der Lager
d_{Mutter}	mm/N	Nachgiebigkeit der Mutter
d_{Sp}	mm	Durchmesser der Spindel
$d_{Spindel}$	mm/N	Nachgiebigkeit der Spindel
d_{xx}	mm/N	Nachgiebigkeit von *x* in Richtung von F_x
f	1/s	Frequenz
f	–	äußere Kräfte
f_0	1/s	Eckkreisfrequenz
f_a	–	Ausgangssignal
f_e	–	Eingangssignal
f_g	1/s	Grenzfrequenz
f_k	–	Impulsfolge
f_m	1/s	Messfrequenz
h	–	Spindelsteigung
i	–	Übersetzungsverhältnis
k	kg/s²	Federsteifigkeit
k_{dyn}	kg/s²	dynamische Steifigkeit
k_{ges}	kg/s²	Gesamtsteifigkeit
k_{Lager}	kg/s²	Steifigkeit der Lager
k_{Mutter}	kg/s²	Steifigkeit der Mutter
$k_{r+t,i}$	kg/s²	*i*-te rotatorische und translatoische Steifigkeit
$k_{Spindel}$	kg/s²	Steifigkeit der Spindel
k_{xx}	kg/s²	Steifigkeit von *x* in Richtung von F_x
m	kg	Masse
m_i	kg	*i*-te Masse
n_s	1/s	Drehzahl
r		Regelvektor
s	1/s	komplexe Frequenz
t	s	Zeitpunkt
u_k	–	Eingangsfolge
v_{ist}	m/s	Istwert der Geschwindigkeit
v_{soll}	m/s	Sollwert der Geschwindigkeit
x	m	(Schlitten-)Weg
$\dot{x}$	m/s	(Schlitten-)Geschwindigkeit
$\ddot{x}$	m/s²	Beschleunigung
$\dddot{x}$	m/s³	Ruck
$x_1 \ldots x_n$	–	Zustandsgrößen / Messwerte
$\bar{x}_1 \ldots \bar{x}_n$	–	geglättete Messwerte
x_a	–	Ausgangsgröße
$\dot{x}_a$	–	Ableitung 1. Ordnung der Ausgangsgröße
$\ddot{x}_a$	–	Ableitung 2. Ordnung der Ausgangsgröße
$\hat{x}_a$	–	Amplitude des Ausgangssignals, resultierende maximale Lageabweichung
x_e	–	Eingangsgröße
x_{e1}	–	Eingangsgröße 1
x_{e2}	–	Eingangsgröße 2
$\dot{x}_e$	–	Ableitung 1. Ordnung der Eingangsgröße
$\ddot{x}_e$	–	Ableitung 2. Ordnung der

		Eingangsgröße
$\hat{x}_e$	–	Amplitude des Eingangssignals
x_i	–	Istlage
x_{ist}	–	Istlage
x_k	–	k-ter Abtastzeitpunkt
x_m	–	Direkt gemessene Lagesignal
x_M	–	Messgröße
x_s	–	Lagesollwert
x_{soll}	–	Führungsgröße
x_w	mm	Regelabweichung, Schleppabstand
$x_{w,Kv1}$	mm	Schleppabstand mit K_V-Faktor 1
$x_{w,Kv2}$	mm	Schleppabstand mit K_V-Faktor 2
$x_{w,Kv3}$	mm	Schleppabstand mit K_V-Faktor 3
y	–	Ausgangsgröße
$\dot{y}$	–	erste Ableitung nach der Zeit der Ausgangsgröße
$\ddot{y}$	–	zweite Ableitung nach der Zeit der Ausgangsgröße
y_k	–	Ausgangsfolge
y_{k-1}	–	Werte der Stellgröße
z_1	–	Störgröße 1
z_2	–	Störgröße 2
Δ_x	mm	Abweichung der Strecke in X-Richtung
Δ_{xe}	–	Höhe des Eingangssprungs
Δ_y	mm	Abweichung der Strecke in Y-Richtung
α_R	°	Phasenreserve
λ	–	Polynomvariable
λ_i	–	i-te Polynomvariable
φ	°	Phasenwinkel
φ_a	°	Winkellage der Motorwelle
φ_{sp}	°	Winkellage der Spindel
ω	1/s	Eigenkreisfrequenz
ω_1	1/s	Eigenkreisfrequenz 1
ω_0	1/s	Eigenkreisfrequenz
$\omega_{0,Mechanik}$	1/s	Eckkreisfrequenz des mechanischen Übertragungssystems
$\omega_{0,Regel}$	1/s	Eckkreisfrequenz des lagergeregelten Antriebs
$\omega_{0,Regelkreis}$	1/s	Eckkreisfrequenz des Regelkreises

Literaturverzeichnis

[ACKE83] Ackermann, H.: Abtastregelung. 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1983.

[ALTI11] Altintas, Y.; Verl, A.; Brecher, C.; Uriarte, L.; Pritschow, G.: Machine tool feed drives. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 60. Jg., 2011, Nr. 2, S. 779–796.

[HILL98] Hiller, B.: Relativbeschleunigungssensor - Potential und Einsatzmöglichkeiten in der Servo-Antriebstechnik. ISW-Lageregelseminar. Stuttgart, 1998.

[HOFF08] Hoffmann, F.: Optimierung der dynamischen Bahngenauigkeit von Werkzeugmaschinen mit der Mehrkörpersimulation. Aachen: Apprimus-Verlag, 2008.

[ISER83] Isermann, R.: Systemidentifikation. Berlin: Springer-Verlag, 1983.

[KUPF68] Kupfmüller, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Berlin: Springer-Verlag, 1968.

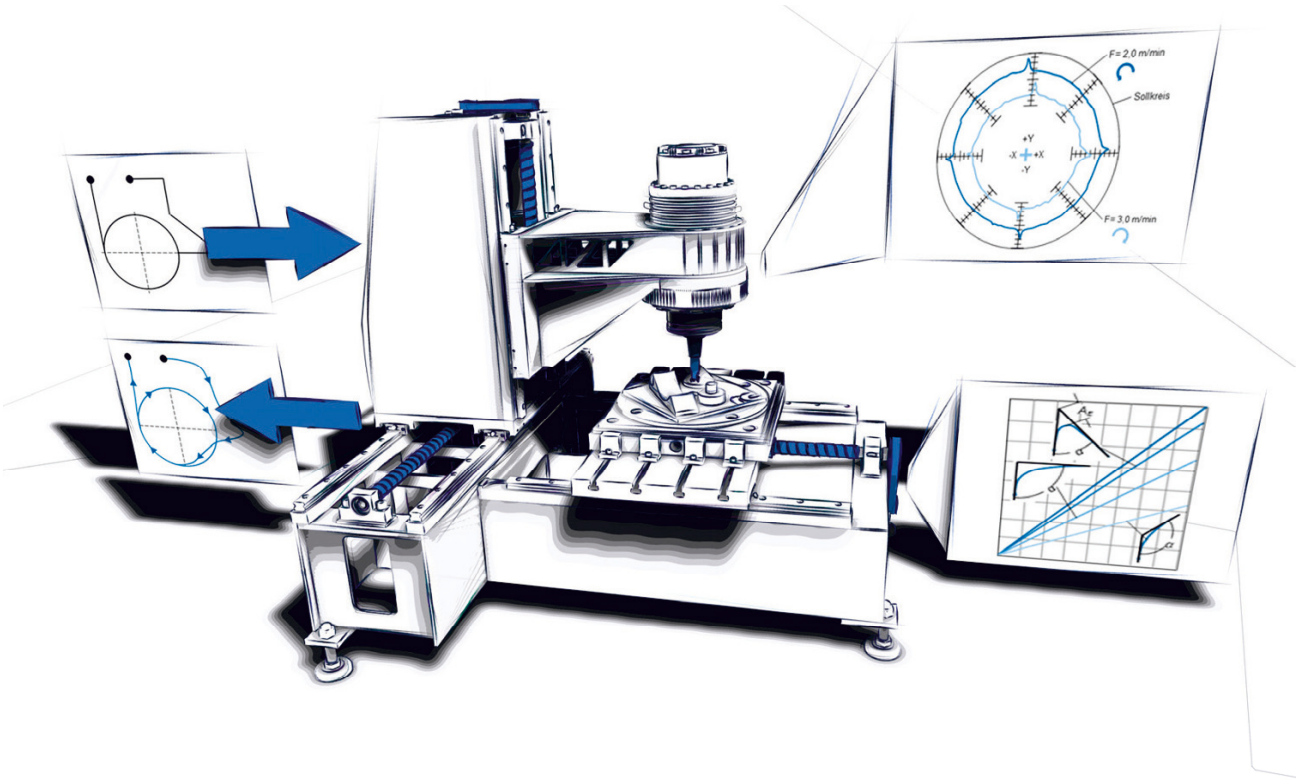
[MATH17] Mathis, W.; Reibiger, A.: Kupfmüller Theoretische Elektrotechnik. Berlin: Springer Verlag, 2017.

[OERT08] Oertli, T.: Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben. München: Utz, 2008.

[STUT81] Stute, G.: Regelung an Werkzeugmaschinen. München: Hanser-Verlag, 1981.

[WECK99] Weck, M.; Krüger, P.; Brecher, C.: Grenzen für die Reglereinstellung bei elektrischen Lineardirektantrieben. In: Antriebstechnik. 38. Jg., April 1999, Nr. 2+3, S. 55–58 und 71–76.

Kapitel 4



Vorschubantriebe zur Bahnerzeugung

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Dr.-Ing. Alexander Epple, Christian Fimmers M.Sc. und Dr.-Ing. Frederik Wellmann für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.



Performance meets Precision

Seit Jahrzehnten begleiten wir Pioniere dabei, aus ihren Visionen Wirklichkeit zu machen. Dafür bieten wir innovative Bearbeitungslösungen und meistern gemeinsam scheinbar unlösbare Aufgaben. Rund um den Globus setzen wir Maßstäbe für Dynamik, Präzision und Produktivität – heute und in Zukunft.

CHIRON Group

chiron STAMA SCHERER FEINBAU cms

www.chiron-group.com

Vorschubantriebe zur Bahnerzeugung



4.1 Aufbau von Bahnsteuerungen – 168

4.2 Bahnfehler an Werkzeugmaschinen – 168
4.2.1 Bahnfehler im Interpolator – 168
4.2.2 Typische Bahnfehler der Lageregelung – 169
4.2.3 Auswirkungen der mechanischen Übertragungselemente – 170
4.2.4 Bestimmung der dynamischen Bahnabweichungen – 171
4.2.5 Einfluss des KV-Faktors auf die Bahnabweichungen – 173

4.3 Maßnahmen zur Verringerung der Bahnabweichungen – 175

Abkürzungsverzeichnis – 176

Formelzeichenverzeichnis – 176

Literaturverzeichnis – 176

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_4

4.1 Aufbau von Bahnsteuerungen

Eine moderne NC-Steuerung entspricht in ihrem Aufbau einem Mikrocomputer, wobei ein oder mehrere Prozessoren zur Verwendung kommen können. Die verschiedenen internen Funktionsbereiche wie Satzaufbereitung, Interpolation und Lageregelung, aber auch Anzeige- und Benutzerschnittstelle, sind als Softwaremodule realisiert, die unter einem angepassten Betriebssystem auf dem Rechner ablaufen.

Bild 4.1 zeigt in einer vereinfachten Form die wesentlichen Module einer NC-Steuerung. Die NC-Sätze, die in textueller Form im Programmspeicher abgelegt sind, werden sequenziell zunächst in der Satzaufbereitung vorverarbeitet. Hier werden unter anderem Geometrie- und Steuerinformationen getrennt und an die entsprechenden Funktionsmodule weitergeleitet. Aus den Geometriedaten berechnet der Interpolator unter Berücksichtigung der Interpolationsart (z. B. Geradeninterpolation, Kreisinterpolation, Splineinterpolation) und der vorgegebenen Bahngeschwindigkeit in einem festen Zeittakt die Sollpositionen. Diese sind die Führungsgrößen für die Lageregler der einzelnen Achsen, die daraus und aus den gemessenen Istpositionen die Sollgeschwindigkeiten für die Vorschubantriebe bilden (Bild 4.1). Eine detaillierte Beschreibung der Funktion und des Aufbaus moderner NC- und RC-Steuerungen befindet sich in den ▶ Kap. 11 und 13 dieses Bandes.

4.2 Bahnfehler an Werkzeugmaschinen

Die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen wird durch geometrische und kinematische Fehler beeinflusst. Beim Verfahren der Maschinenachsen stehen kinematische Abweichungen im Vordergrund. Mögliche Fehlerquellen bei der Bahnerzeugung befinden sich im Interpolator, in den Lageregelkreisen und in den mechanischen Komponenten der Vorschubantriebe.

4.2.1 Bahnfehler im Interpolator

Eine fehlerhafte Konturberechnung im Interpolator hat zwangsläufig eine fehlerhafte Bahn zur Folge. Bei der Realisierung des Interpolators als Softwaremodul auf einem Mikrocomputer hängt die geometrische Genauigkeit nur vom verwendeten Algorithmus und von der internen Rechengenauigkeit ab. Bei einer Aufteilung einer Bewegung auf mehrere Achsen und einer sehr kleinen Bahngeschwindigkeit in einer der beiden Achsen, z. B. beim Verfahren einer flachen Schräge, hat die Ausgabefeinheit des Interpolators Einfluss auf die Bahnkurve. In der Achse mit der langsamen Geschwindigkeit werden Sollwertsprünge in der Größenordnung des kleinsten messbaren Weginkrements ausgegeben. Diese Einzelschritte können von den Lageregelkreisen nicht mehr geglättet werden und führen zu einer unstetigen Vorschubbewegung (Bild 4.2). Überlagert wird dieser Effekt durch Reibungs- und Elastizitätseinflüsse.

Ein Vergleich der geometrischen Fehler, die durch den Interpolator hervorgerufen werden, mit den Fehlern, die von dem nachgeschalteten Lageregelkreis verursacht werden, zeigt, dass Interpolationsfehler bei zulässigen Bahngeschwindigkeiten meist in der Größenordnung eines einzelnen Messinkrements liegen und damit einen vernachlässigbaren Anteil am Gesamtfehler bilden.

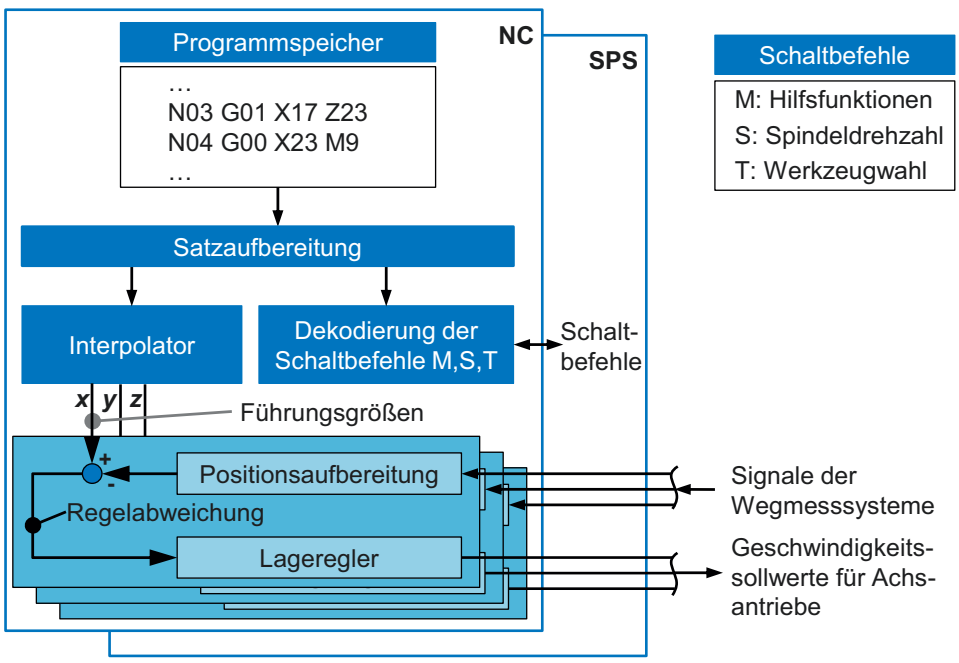


Bild 4.1 Interne Struktur einer NC-Steuerung

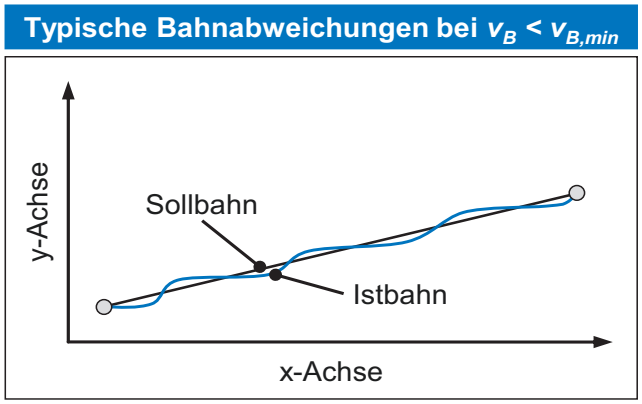


Bild 4.2 Typische Bahnabweichungen bei sehr kleiner Bahngeschwindigkeit

4.2.2 Typische Bahnfehler der Lageregelung

Bild 4.1 zeigt den Aufbau einer dreiachsigen Bahnsteuerung für eine Werkzeugmaschine. Die Eingabedaten für die Wege und Geschwindigkeiten gelangen über die NC-Datensatzeingabe zum Interpolator und werden als Führungsgrößen an die Lageregelkreise weitergeleitet. Bei der Signalübertragung von der NC-Dateneingabe zum Werkzeug treten Übertragungsfehler auf, die steuerungsseitig hauptsächlich von der Interpolationsart (vgl. ▶ Kap. 12.1) und dem Verhalten der Lageregelkreise abhängen.

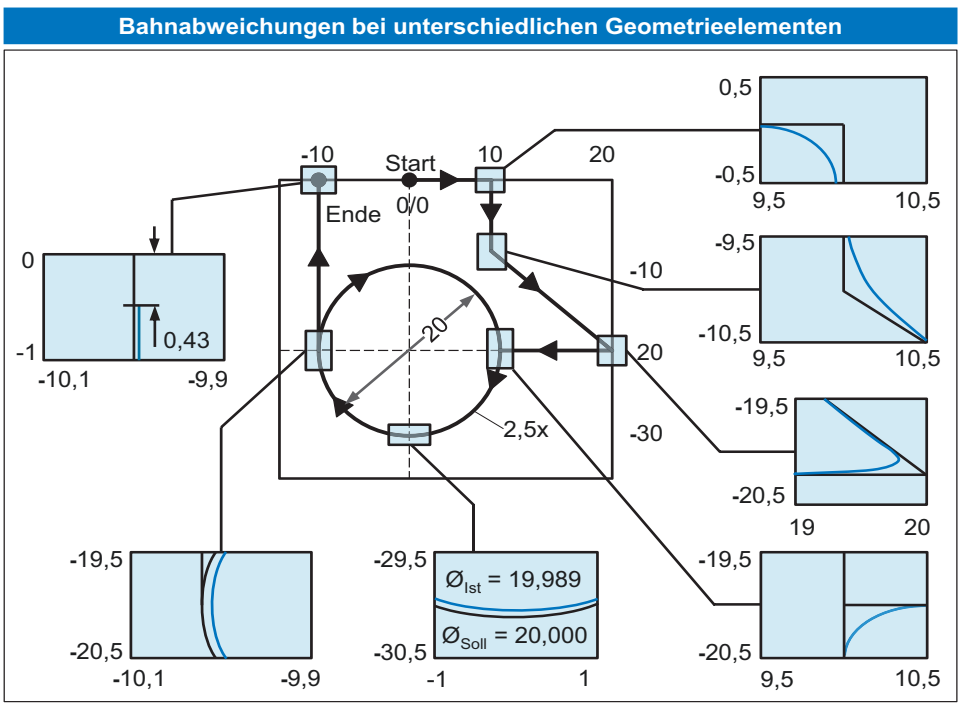
Die so entstehenden Bahnabweichungen haben ihre Ursache in:

- dynamischen Bahnabweichungen,
- unterschiedlichen Geschwindigkeitsverstärkungen in den einzelnen Lageregelkreisen,
- bleibenden Regelabweichungen durch Proportionalverhalten der Lageregler,
- ungleichem dynamischem Verhalten der Antriebseinheiten und
- nichtlinearen Signalübertragungen (Umkehrspanne).

Der daraus resultierende Werkstückfehler ergibt sich durch Superposition der Folgefehler in den einzelnen Achsen. Je größer die Geschwindigkeit und deren zeitliche Änderung sind, desto größer ist der resultierende Folgefehler. Im Folgenden werden anhand einer Bahn mit unterschiedlichen Geometrieelementen die typischen Abweichungen dargestellt und im Anschluss daran näher erläutert.

Bild 4.3 gibt einen Überblick über die entstehenden Bahnabweichungen bei unterschiedlichen Geometrieverhältnissen, wenn die Bahn bei konstanter Geschwindigkeit und ohne Halt an den Übergängen bzw. ohne Kompensa-

Bild 4.3 Bahnabweichungen bei unterschiedlichen Geometrieelementen



Technologische Daten	
Vorschubgeschw.:	$v = 1$ m/min
Radius:	$R = 10$ mm

Systemdaten	
Eigenfrequenz:	$f_0 = 10$ Hz
Dämpfung:	$D = 0{,}8$
Geschwindigkeitsverstärkung:	$K_v = 2{,}34$ m/min/mm
Umfahrfrequenz:	$f_u = 0{,}27$ Hz
Schleppfehler:	$\delta_s = 0{,}425$ mm
Durchmesserdifferenz	$\delta(2R) = -0{,}011$ mm

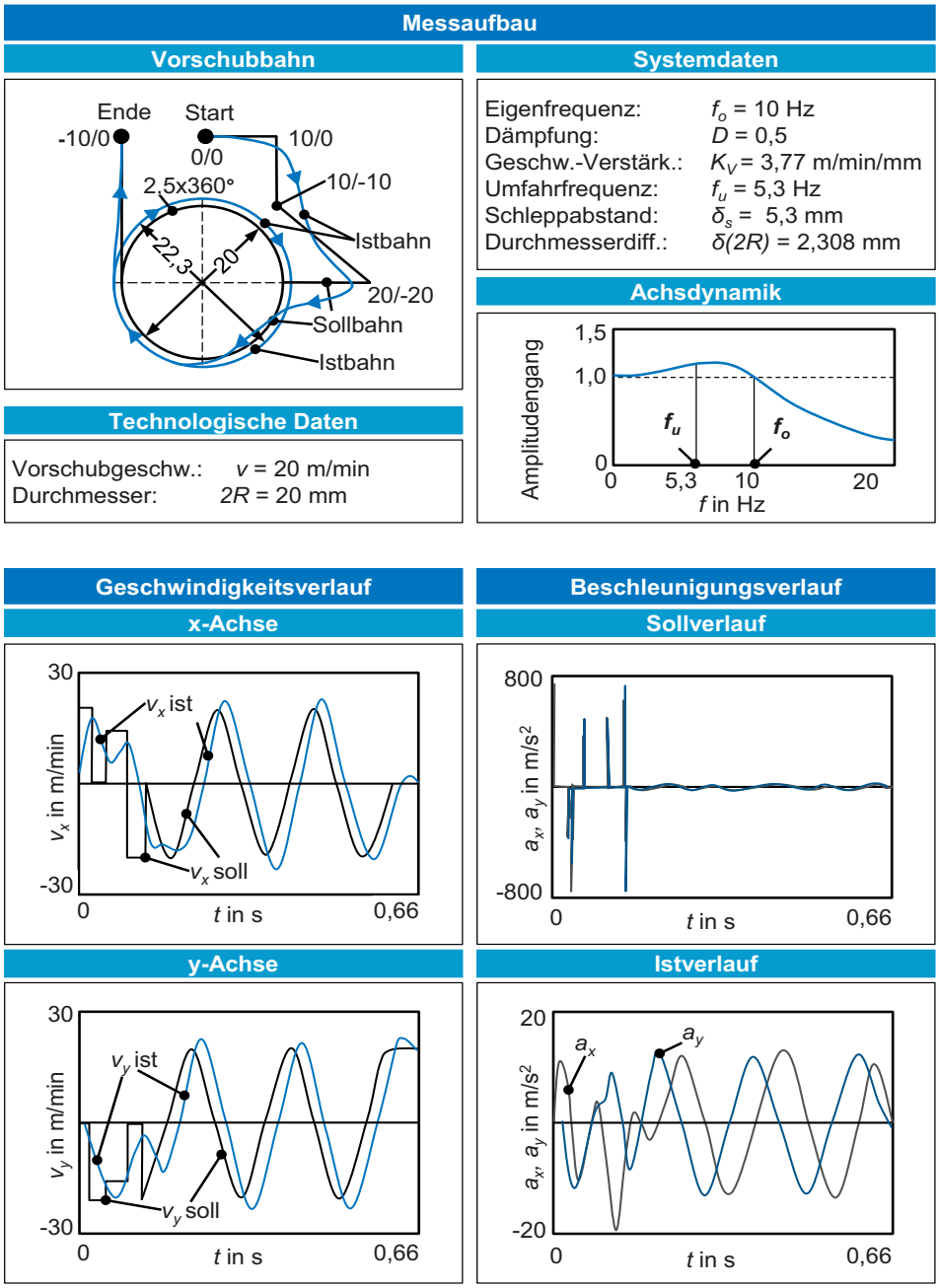


Bild 4.4 Bahnabweichungen, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe

tionsmaßnahmen abgefahren wird. Die Ecken werden verrundet und Kreise ändern ihren Durchmesser. Sie werden bei höherer Dämpfung ($D > 0{,}7$) mit zunehmender Geschwindigkeit kleiner.

Mit welchen achsdynamischen Abweichungen beim Verfahren der gleichen Bahn zu rechnen ist, zeigt Bild 4.4. Im unteren Bildteil ist zu erkennen, dass sowohl die Geschwindigkeits- als auch die Beschleunigungsverläufe weit von den Sollvorgaben abweichen. Die dynamischen Eigenschaften der Vorschubantriebe reichen nicht aus, um dem geforderten Bahnverhalten zu entsprechen.

4.2.3 Auswirkungen der mechanischen Übertragungselemente

Nichtlinearitäten im Lageregelkreis, die durch die mechanischen Übertragungselemente verursacht werden, können die Bahn des Werkzeugs ebenfalls stark beeinflussen [ALTI11]. Hierbei ist insbesondere der Nulldurchgang der Geschwindigkeit in einer Achse von Bedeutung. An diesen Stellen kehrt sich die Bewegungs- und Kraftrichtung des Vorschubantriebs um. Dadurch werden die Federn im Antriebsstrang (z. B. die Kugelrollspindel) zunächst entspannt und anschließend in entgegengesetzter Richtung belastet. Zusätzlich muss vom Motor eine eventuell vorhandene Lose durchfahren werden.

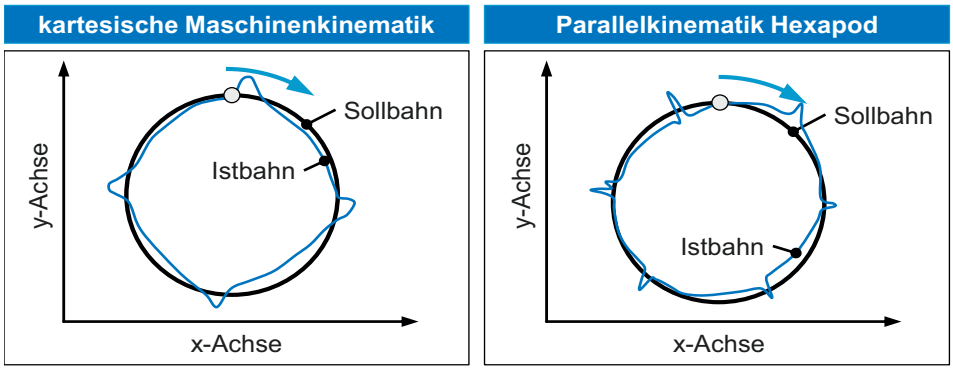


Bild 4.5 Kreisformfehler aufgrund von Nichtlinearitäten im Lageregelkreis

Die Folge ist, dass die Achse im Nulldurchgang der Geschwindigkeit so lange stehen bleibt, bis sich in der neuen Vorschubrichtung wieder genügend Kraft aufgebaut hat, um die Achse zu bewegen. Hierbei muss zunächst auch der etwas höhere Haftreibungsanteil überwunden werden. Maschinen mit kartesischen Achsen weisen daher beim Verfahren eines Kreises Quadrantenübergangsfehler auf (Bild 4.5 links).

Bei Maschinen mit paralleler Kinematik stehen die Achsen nicht notwendigerweise senkrecht aufeinander. Daher tritt der Nulldurchgang der Geschwindigkeit der Achsen auch nicht unbedingt am Quadrantenübergang auf. Bei einer Maschine mit Hexapod-Kinematik beispielsweise, die das Werkzeug mit sechs Antriebsachsen bewegt, entsteht der in Bild 4.5 rechts abgebildete Kreisformfehler [POWE98].

4.2.4 Bestimmung der dynamischen Bahnabweichungen

Auf die Arbeitsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine wirken unterschiedliche Faktoren wie geometrische Maschinenfehler, Werkzeugfehler, Temperaturveränderungen usw. ein. Den wichtigsten Einfluss bei der Bahnerzeugung haben das Proportionalverhalten der Lageregler und die damit verbundene Abweichung von der Sollkontur (Bild 4.4).

4.2.4.1 Eckenverrundung

Wie in Bild 4.3 und Bild 4.4 gezeigt, treten bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit und unstetigem Geometriekonturverlauf Eckenverrundungen auf. Dieser Vorgang wird auch häufig als „Verschleifen“ bezeichnet. Bedingt durch den Schleppfehler ist die Eckkoordinate von der ersten Bewegungsachse des Vorschubantriebs noch nicht erreicht, während die andere Bewegungsrichtung vom Interpolator schon angesteuert wird.

Bild 4.6 zeigt das Ergebnis von Simulationsberechnungen. Der Abstand von der Ecke A_E ist für verschiedene Eckenwinkel $0° < \alpha < 135°$ als Funktion von v/K_V grafisch dargestellt. Hierbei gibt das linke Bild die Abweichungen für ein gut gedämpftes System ($D = 0{,}9$) und das rechte Bild die für ein weniger gut gedämpftes System ($D = 0{,}7$) wieder. Wie zu erkennen ist, nehmen die Abweichungen mit zunehmendem Wert von v/K_V linear zu. Bei dem schwach gedämpften System sind diese Abweichungen

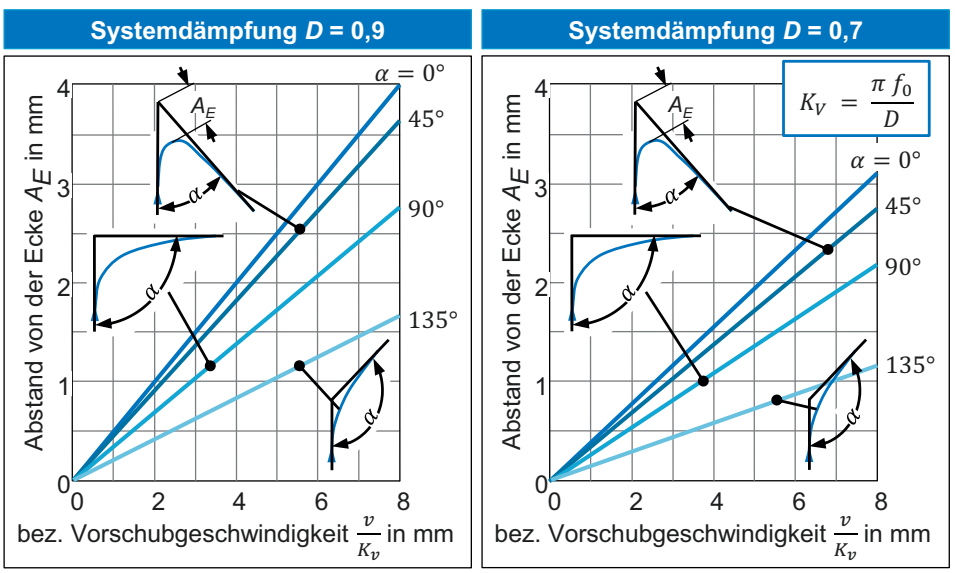


Bild 4.6 Ecken-Abstand als Funktion des Winkels, der Geschwindigkeit und des K_V-Faktors für verschiedene Dämpfungen

etwas geringer. Jedoch kann es hierbei zu einem leichten Überschwingen kommen.

4.2.4.2 Kreisform- und Durchmesserabweichung

Bild 4.3 und Bild 4.4 vermitteln eine Vorstellung von den möglichen Kreisform- und Durchmesserabweichungen, wenn die Bahn ohne Halt mit konstanter Geschwindigkeit durchfahren wird.

Insbesondere beim Einfahren in die Kreisbahn und bei deren Verlassen treten große Kreisformabweichungen auf. Im Fall gleicher K_V-Faktoren und Dämpfungswerte für beide Vorschubachsen wird im eingeschwungenen Zustand ein reiner Kreis erzeugt, dessen Durchmesser jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit vom Solldurchmesser abweicht.

Der Verlauf des entstehenden Durchmessers bzw. Radius über der Frequenz ist hierbei ein genaues Abbild der Amplitudenfrequenzgänge der Vorschubantriebsregelkreise. Die Kreisumfahrfrequenz f_u ist folgendermaßen definiert:

$$f_u = \frac{v}{2\pi R} \tag{4.1}$$

Bild 4.7 stellt den Amplitudengang R_{ist}/R_{soll} für ein System mit $D = 0{,}9$ dar, wobei die Umfahrfrequenz f_u auf die Systemeigenfrequenz f_0 bezogen wurde. Ebenso ist der auf R_{soll} bezogene Radiusfehler $\delta R/R_{soll}$ grafisch dargestellt. Bei schwach gedämpften Systemen $D < 0{,}7$ treten Resonanzspitzen auf, die zu Amplitudenvergrößerungen, also zu Radiusvergrößerungen, führen, sobald sich die Umfahrfrequenz der Eigenfrequenz nähert. Bild 4.4 links oben gibt hierzu ebenfalls ein anschauliches Beispiel.

Eine grobe Abschätzung ist dadurch möglich, dass das Vorschubsystem auf ein proportionales Verzögerungsglied erster Ordnung reduziert wird:

$$G_v(j\omega) = \frac{R_{ist}(j\omega)}{R_{soll}(j\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_V} j\omega} \tag{4.2}$$

Mit K_V als Geschwindigkeitsverstärkung.
Daraus folgt für den Amplitudengang $|G_v(j\omega)|$ angenähert

$$|G_v(j\omega)| = \frac{|R_{ist}(j\omega)|}{|R_{soll}(j\omega)|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_u}{K_V}\right)^2}} \tag{4.3}$$

Für den Istradius R_{ist} des Kreises ergibt sich angenähert mit Abbruch nach dem Term zweiter Ordnung der Taylorreihe:

$$R_{ist} \approx R_{soll}\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_u}{K_V}\right)^2\right) \tag{4.4}$$

Damit folgt für die Radiusdifferenz δR:

$$\delta R = R_{soll} - R_{ist} \approx R_{soll} - R_{soll}\left(1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_u}{K_V}\right)^2\right) = \frac{1}{2} R_{soll}\left(\frac{\omega_u}{K_V}\right)^2 \tag{4.5}$$

Die Kreisfrequenz, mit der der Radius umfahren wird, berechnet sich aus dem Kreisradius R_{soll} und der Bahngeschwindigkeit v_B

$$\omega_u = 2\pi f_u = 2\pi \frac{v_B}{2\pi R_{soll}} = \frac{v_B}{R_{soll}} \tag{4.6}$$

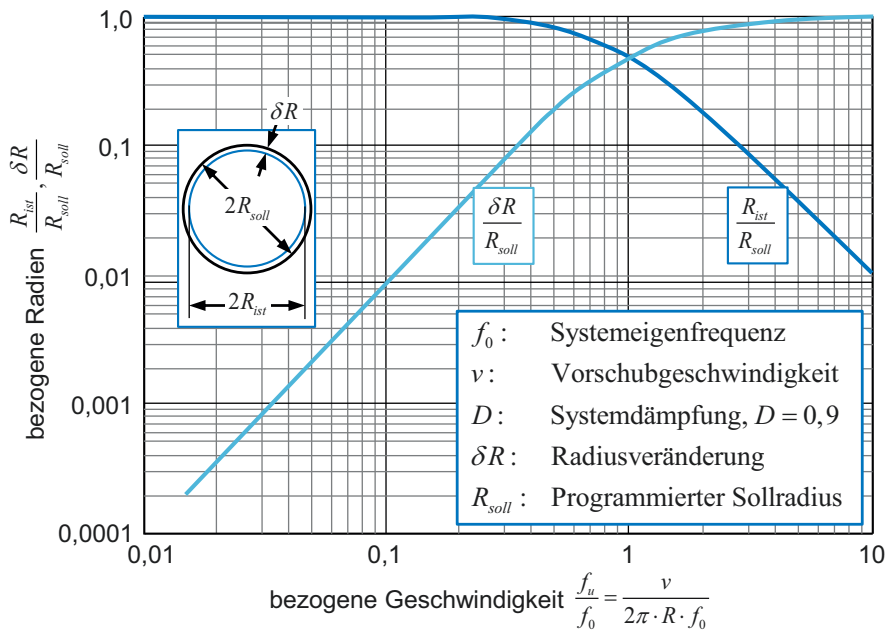


Bild 4.7 Kreisbahnabweichung als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit, der Systemeigenfrequenz und des Radius

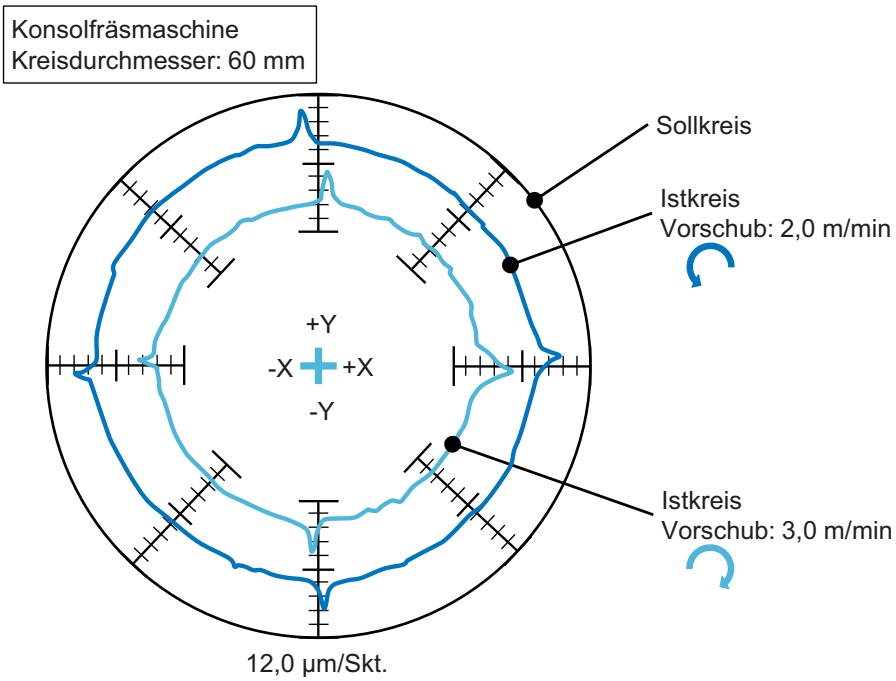


Bild 4.8 Kreisförmige Verfahrbewegung bei Variation des Vorschubs

mit:

$$f_u = \frac{v_B}{2\pi R_{soll}} \tag{4.7}$$

Für die Radiusdifferenz δR folgt schließlich:

$$\delta R = \frac{1}{2R_{soll}}\left(\frac{v_B}{K_V}\right)^2 \tag{4.8}$$

Große Bahnabweichungen beim Verfahren eines Kreises treten besonders bei kleinen Kreisradien und hohen Bahngeschwindigkeiten auf. Bei einer Geschwindigkeit $v_B = 5$ m/min, einem K_V-Faktor von $K_V = 1$ m/min/mm und einem Sollradius von $R_{soll} = 10$ mm ergibt sich z. B. eine Radiusdifferenz von 1,25 mm.

Messung der Kreisform

Für Maschinen mit linearen Achsen hat sich der Kreisformtest bewährt. Dieser erlaubt eine einfach durchzuführende, aussagekräftige Beurteilung der geometrischen und antriebstechnischen Genauigkeit. Eine genauere Beschreibung des Kreisformtests findet sich in Band 2, ▶ Kap. 3.2 dieser Buchreihe.

Das Ergebnis eines Kreisformtests mit einem Kreuzgitter-Messsystem, gemessen an einer Konsolfräsmaschine, zeigt Bild 4.8. Die Messungen zeigen an den Umkehrpunkten der Verfahrrichtung deutliche Abweichungsspitzen, die durch Haftreibung in der Achsmechanik hervorgerufen werden. Neben der Drehrichtungsabhängigkeit dieser Bahnabweichungen sind die mit der Vorschubgeschwindigkeit zunehmenden Radiusabweichungen zu erkennen. Diese Abweichungen hängen mit der Regelung der Achse zusammen, deren begrenzter K_V-Faktor einen Schleppfehler in beiden Achsen hervorruft.

4.2.5 Einfluss des K_V-Faktors auf die Bahnabweichungen

Die dynamische Bahnabweichung hängt eng mit dem eingestellten Verstärkungsfaktor jedes Lageregelkreises zusammen. Die Zusammenhänge, die in ▶ Kap. 4.2.2 für eine Achse hergeleitet und beschrieben sind, gelten überlagert auch im Achsverbund mit mehreren Achsen. Bild 4.9 zeigt den Bahnverlauf beim Umfahren einer rechtwinkligen Ecke ohne Halt für eine geringe und eine hohe Geschwindigkeitsverstärkung K_V.

Die Geschwindigkeitsfehler (Schleppabstand) berechnen sich aus dem Übertragungsverhalten des gesamten Lageregelkreises, d. h. der Kreisverstärkung K_V bzw. der Geschwindigkeitsverstärkung:

$$\Delta x \approx \frac{\dot{x}}{K_{Vx}} \tag{4.9}$$

$$\Delta y \approx \frac{\dot{y}}{K_{Vy}} \tag{4.10}$$

Im stationären Zustand ($t \to \infty$ bei konstanten Achsgeschwindigkeiten) gelten die Gleichungen exakt.

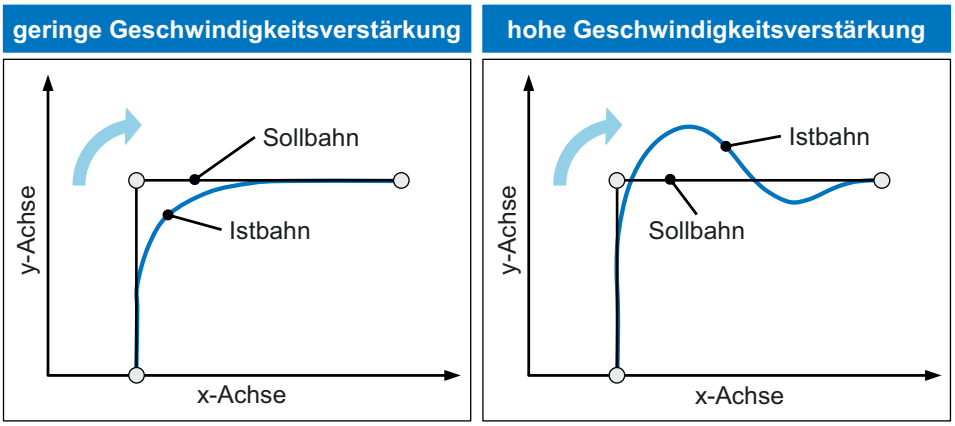


Bild 4.9 Bahnabweichungen beim Umfahren einer rechtwinkligen Ecke ohne Halt

In Bild 4.10 werden drei verschiedene Bearbeitungsarten bezüglich des auftretenden Bearbeitungsfehlers miteinander verglichen. Bei der Bearbeitung einer Schräge tritt ein Werkstückfehler nicht in Erscheinung, wenn die Geschwindigkeitsverstärkungen der Regelkreise für alle Achsen gleich sind ($K_{Vx} = K_{Vy}$). Da sich die Schleppabstände wie die Teilgeschwindigkeiten verhalten und während der Bearbeitung konstant sind,

$$\frac{\dot{x}}{\dot{y}} = \frac{\Delta x}{\Delta y} \tag{4.11}$$

folgt der Istwert dem Sollwert zeitlich verzögert auf der Sollkontur nach. Eine Kreiskontur wird durch Überlagerung einer sinus- und einer kosinusförmigen Bewegung erzeugt, wenn der Maschinentisch in zwei um 90° versetzten Achsen verfahrbar ist. Die in Bild 4.10 gezeigte Abweichung ergibt sich durch die Anfahr- und Haltevorgänge in den Bewegungsabläufen der x- und y-Achse sowie durch die unterschiedlichen Schleppabstände, die durch die wechselnden Teilgeschwindigkeiten entstehen.

Auch beim Umfahren z. B. einer 90°-Ecke mit vorgegebener, konstanter Geschwindigkeit tritt ein Bearbeitungsfehler auf. Der Fehler ist umso größer, je schlechter die Dynamik der Antriebssysteme ist.

Außer den systembedingten Bearbeitungsfehlern, die sich durch optimierte Einstellung der Parameter des Lageregelkreises zwar verkleinern, aber nie ganz beseitigen lassen, kommen Fehler, die auf unterschiedliche Antriebsdynamik oder falsch eingestellte Lageregelkreise zurückzuführen sind, hinzu (Bild 4.11). Bei unterschiedlichen K_V-Faktoren in

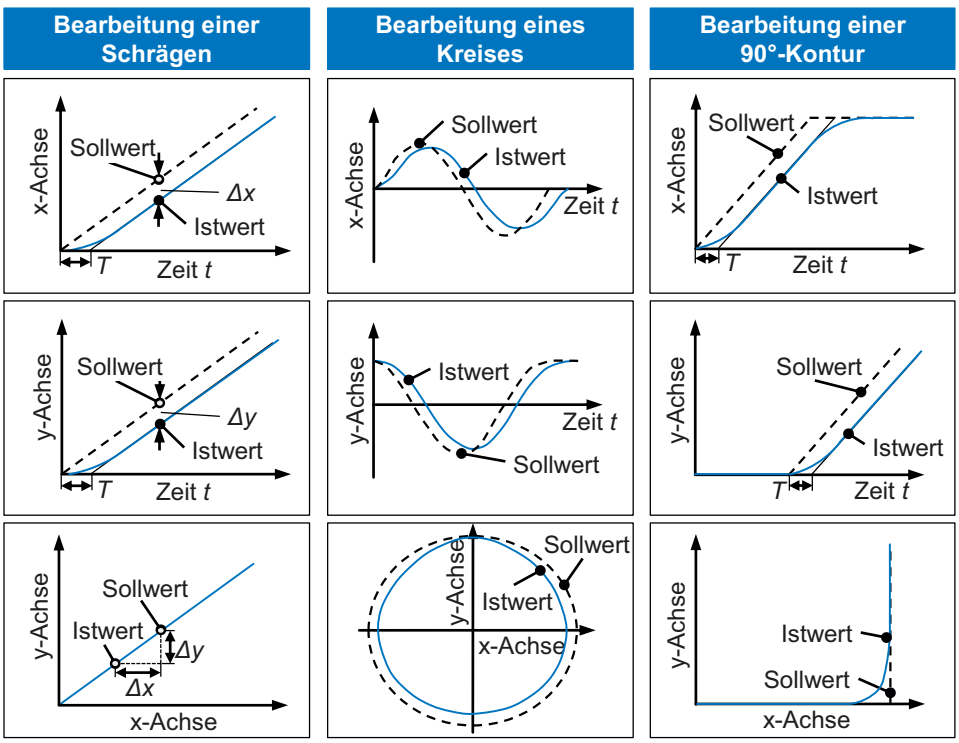


Bild 4.10 Systembedingte Bearbeitungsfehler bei einer zweiachsigen Bahnsteuerung (zwei gleiche Systeme 1. Ordnung)

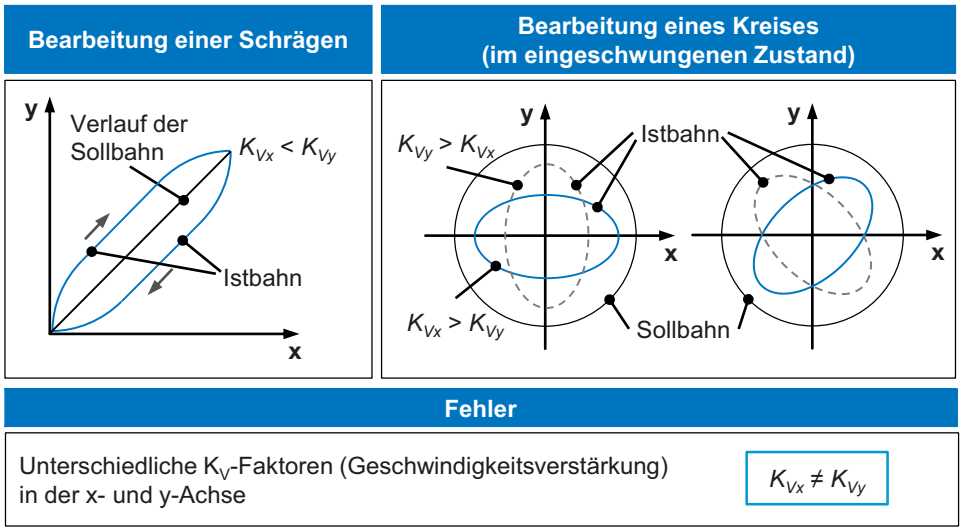


Bild 4.11 Bearbeitungsfehler bei einer zweiachsigen Bahnsteuerung, bedingt durch unterschiedliche Antriebsdynamik der Einzelsysteme

der *x*- und *y*-Achse wird bei der Bearbeitung einer Schräge der Zielpunkt exakt angefahren, doch treten während der Bearbeitung Konturfehler auf, deren Größe vom Unterschied der K_V-Faktoren abhängt. Entsprechendes gilt für die Kreisbearbeitung. Die Kreiskontur wird in der Achse mit dem kleineren K_V-Faktor abgeflacht, d. h. es entsteht eine Ellipse. Treten durch unterschiedliche K_V-Faktoren Phasenverschiebungen auf, so wird die Ellipse in der Ebene gedreht. Eine unterschiedliche Antriebsdynamik lässt sich feststellen, wenn man parallel zu einem unter 45° ausgerichteten Lineal verfährt und gleichzeitig den Abstand zum beweglichen Maschinenteil mit einer Messuhr erfasst. Beginnend vom Stillstand der Maschine bis zum erneuten Stillstand nach dem Verfahren unter 45° darf sich der Abstand zum Lineal nicht geändert haben.

Außer den dynamischen Fehlern, die sich infolge des Übertragungsverhaltens des Regelkreises ergeben, treten nichtlineare Signalübertragungsfehler auf. Diese entstehen bei indirekten Messsystemen durch die Umkehrspanne (Hysterese), die durch Spiel, Reibung und durch die Nachgiebigkeit der mechanischen Übertragungselemente bei Belastung verursacht wird. Daraus resultiert ein Bahnfehler in der Größe der Umkehrspanne. Eine Konturverfälschung kann durch den Lageregelkreis eliminiert werden, wenn man den Messort des Wegmesssystems so wählt, dass sich die Umkehrspanne erfassen lässt (Messung direkt am Maschinentisch).

4.3 Maßnahmen zur Verringerung der Bahnabweichungen

Gängige Steuerungen vermeiden heute die in ▶ Kap. 4.2 beschriebenen Bahnabweichungen durch gezielte regelungstechnische Maßnahmen oder Geschwindigkeitsanpassungen.

Da große Radiusabweichungen für die Einhaltung einer üblichen Fertigungstoleranz in der Regel nicht tragbar sind, werden von den Steuerungsherstellern verschiedene, teilweise aufwendige Verfahren zur Verbesserung dieses Verhaltens eingesetzt. Zu den einfacheren Verfahren zählt die Erhöhung des K_V-Faktors für Kreisbahnen. Theoretisch ergibt sich die minimale Radiusabweichung bei etwa dem 1,4-fachen des maximalen K_V-Faktors, der für überschwingfreies Positionieren an Ecken einzustellen ist.

Eine weitere Möglichkeit liegt in der bahnabhängigen Begrenzung der Vorschubgeschwindigkeit durch die Steuerung. Dazu wird z. B. über Gleichung (4.8) für eine vorgegebene, maximal erlaubte Radiusdifferenz die für den Radius zugehörige Bahngeschwindigkeit ermittelt, mit der dann der Kreis, unabhängig von der tatsächlich programmierten Bahngeschwindigkeit, verfahren wird.

Ein Nachteil beider Verfahren liegt darin, dass sie nur für Kreisbahnen, die auch als solche programmiert wurden, funktionieren. Ist die zu verfahrende Kreisbahn aus kurzen Geradenstücken zusammengesetzt, wird diese von der Steuerung nicht erkannt und demnach auch nicht korrigiert. Solche Konturen, die sich aus kurzen Geradenstücken zusammensetzen, werden z. B. von den meisten CAM-Systemen aus CAD-Daten erzeugt.

Eine andere, aufwendigere Gruppe von Verfahren verringert dynamische Abweichungen, zu denen auch die Radiusdifferenz zählt, durch regelungstechnische Maßnahmen. Hier ist vor allem die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsaufschaltung zu nennen, die unter verschiedenen Bezeichnungen von mehreren Steuerungsherstellern angeboten wird [DOOM91; METZ89].

Weiterhin kommen auch dynamische Kompensationsfilter und höherwertige Lageregelungsstrukturen (Zustandsregler) zum Einsatz [BERN19; GREF90; WECK89]. Eine ausführliche Darstellung dieser Verfahren befindet sich in den ▶ Kap. 3.1.3 und 3.1.4. Zudem wird in aktuellen wissenschaftlichen Ansätzen die Möglichkeit untersucht, Bahnen

auf Basis eines approximierten Fehlers vorausschauend anzupassen [ALTI10; KHOS14].

Auch der Eckenfehler kann durch Einsatz dynamischer Korrekturmaßnahmen verringert werden. Ein absolut fehlerfreies Umfahren einer Ecke mit konstanter Bahngeschwindigkeit ist jedoch unmöglich. Auch bei Verwendung optimaler Lageregelstrukturen und einer optimierten Vorschubmechanik muss immer ein Kompromiss zwischen Bahngeschwindigkeit und Eckenfehler gefunden werden. Eine Führungsgrößenbeeinflussung, wie sie bereits zu Anfang des Kapitels beschrieben wurde, kann den Eckenfehler stark verringern. Steht die Forderung nach einer fehlerfreien Kontur im Vordergrund, so kann diese nicht mit konstanter Geschwindigkeitsvorgabe gefertigt werden. In diesem Fall muss entweder die Bahngeschwindigkeit an der Ecke bis zum Stillstand verringert werden oder es werden die Vorgaben für die Geradenrichtungen derart verändert, dass die von der Maschine gefahrene Kontur der Vorgabe entspricht.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
NC	Numerical Control
RC	Robot Control

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A_E		Eckpunkt
D	–	Dämpfung
K_V	1/s	Geschwindigkeitsverstärkung, K_V-Faktor
K_{Vx}	1/s	Geschwindigkeitsverstärkung der X-Achse
K_{Vy}	1/s	Geschwindigkeitsverstärkung der Y-Achse
R	mm	Radius
R_{ist}	mm	Istradius
R_{soll}	mm	Programmierter Sollradius
a_x	m/s²	Beschleunigung in X-Richtung
a_y	m/s²	Beschleunigung in Y-Richtung
f	1/s	Frequenz
f_0	1/s	Eigenfrequenz
f_u	1/s	Kreisumfahrfrequenz
t	s	Zeitpunkt
v	m/s	Vorschubgeschwindigkeit
v_b	m/s	Bahngeschwindigkeit
$v_{b,min}$	m/s	minimale Bahngeschwindigkeit
x	mm	X-Position
$\dot{x}$	m/s	(Vorschub-)Geschwindigkeit in X-Richtung
y	mm	Y-Position
$\dot{y}$	m/s	(Vorschub-)Geschwindigkeit in Y-Richtung
z	mm	Z-Position
Δx	mm	Schleppabstand in X-Richtung
Δy	mm	Schleppabstand in Y-Richtung
α	°	Eckenwinkel
δR	mm	Radiusveränderung
δ_S	mm	Schleppabstand
ω	1/s	Kreisfrequenz
ω_u	1/s	umfahrene Kreisfrequenz

Literaturverzeichnis

[ALTI10] Altintas, Y.; Sencer, B.: High speed contouring control strategy for five-axis machine tools. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 59. Jg., 2010, Nr. 1, S. 417–420.

[ALTI11] Altintas, Y.; Verl, A.; Brecher, C.; Uriarte, L.; Pritschow, G.: Machine tool feed drives. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 60. Jg., 2011, Nr. 2, S. 779–796.

[BERN19] Berners, T.: Anforderungsspezifische Lageregelung von Vorschubantrieben in Werkzeugmaschinen. Dissertation. Aachen, 30.08.2019.

[DOOM91] Dooms, K.; Machielsen, K.: Intelligenter Bewegungscontroller. In: NC-Fertigung, 1991, Nr. 6.

[GREF90] Greff, S.: Für Werkzeugmaschinen und Industrieroboter bestimmt. In: Industrie-Anzeiger, 1990, Nr. 6.

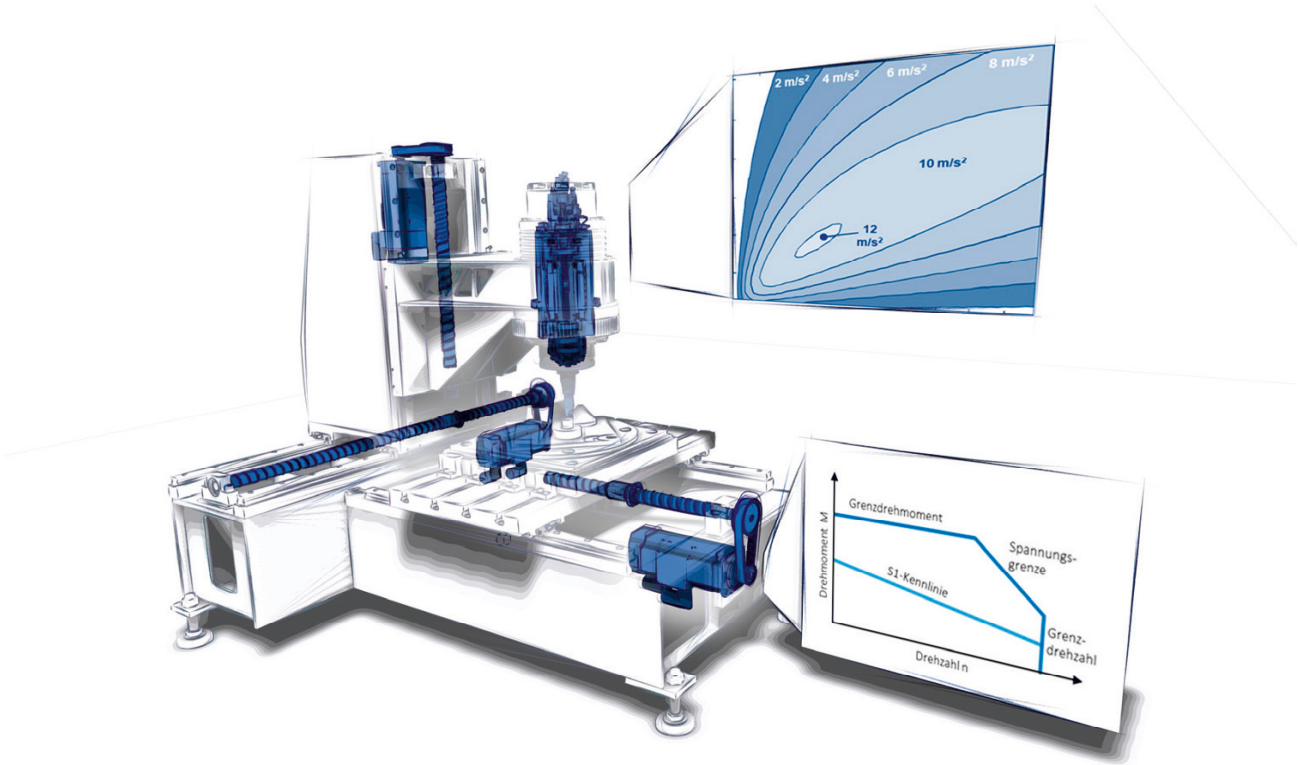
[KHOS14] Khoshdarregi, M. R.; Tappe, S.; Altintas, Y.: Integrated Five-Axis Trajectory Shaping and Contour Error Compensation for High-Speed CNC Machine Tools. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 19. Jg., 2014, Nr. 6, S. 1859–1871.

[METZ89] Metzger, K.; Hullinger, P.: Schleppfehlerfreie adaptive Regelung mit PED-Algorithmus für NC-Achsen. In: Antriebstechnik 28, 1989, Nr. 8.

[POWE98] Powell, N. P.; Whittingham, B. D.; Gindy, N. N. Z.: Parallel Link Mechanism Machine Tools. Acceptance Testing and Performance Analysis, 1998.

[WECK89] Weck, M.; Ye, G.: Bahnsteuerungskonzept zum hochgenauen Abfahren komplexer Kurven. In: Technische Rundschau, 1989, Nr. 1.

Kapitel 5



Auslegung von Vorschubantrieben

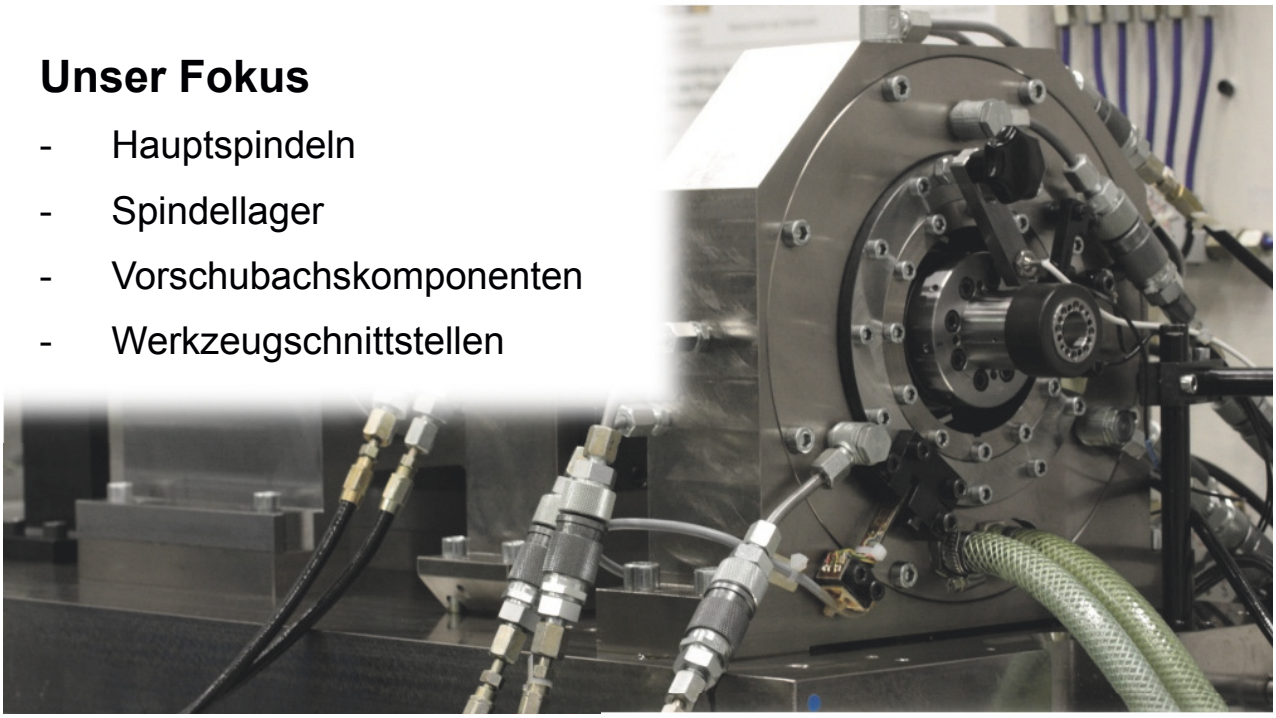
Ich danke meinen Mitarbeitern Dr.-Ing. Thomas Berners, Dipl.-Ing. Christian Ecker, Dr.-Ing. Alexander Epple und Christian Fimmers M.Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

www.wzl.rwth-aachen.de

Maschinenelemente

Unser Fokus

- Hauptspindeln
- Spindellager
- Vorschubachskomponenten
- Werkzeugschnittstellen





Unsere Leistungen

- Auslegung und Berechnung
- Prüfstandsbau und -betrieb
- Beratung
- Software

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Steinbachstr. 19
52074 Aachen
+49 241 80 27409
Maschinentechnik@wzl.rwth-aachen.de

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Abteilung Maschinentechnik

Auslegung von Vorschubantrieben



5.1 Auslegung des Motors und der mechanischen Komponenten – 180
5.1.1 Bestimmung der Anforderungen und Wahl des Antriebsprinzips – 181
5.1.2 Wahl und Auslegung der mechanischen Komponenten – 181
5.1.3 Auswahl und Auslegung des Antriebsmotors – 183

5.2 Auslegung des Messsystems – 186

5.3 Inbetriebnahme der Regelung – 186
5.3.1 Manuelle Inbetriebnahme – 187

5.3.2 Automatische Inbetriebnahme – 190

Abkürzungsverzeichnis – 190

Formelzeichenverzeichnis – 190

Literaturverzeichnis – 191

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_5

5.1 Auslegung des Motors und der mechanischen Komponenten

Vorschubachsen werden im Werkzeugmaschinenbau elektrisch angetrieben. Hierbei kann zwischen direkten und indirekten Antrieben unterschieden werden. Direkte Antriebe erzeugen die geforderten Bewegungsgrößen direkt durch Torque- bzw. Linearmotoren (vgl. ▶ Kap. 2.1). Bei den indirekten Antriebskonzepten werden mechanische Übersetzungselemente eingesetzt, z. B. eine Kugelgewindespindel zur Übersetzung der Rotation in eine Translation.

Eine zentrale Aufgabe bei der Auslegung von Vorschubantrieben ist die Wahl bzw. die Dimensionierung des Antriebmotors hinsichtlich der geforderten Kenndaten. Die Bestimmung des Motors geht mit der Festlegung der Übersetzung der mechanischen Getriebekomponenten, wie Zahnrad- bzw. Zahnriemengetriebe, Kugelgewindespindel und Zahnstange-Ritzeltriebe, einher. Bei der Auslegung des Vorschubantriebs muss daher immer das Wechselspiel zwischen dem Motor und dem mechanischen System beachtet werden.

In ◘ Bild 5.1 ist ein Überblick zur Vorgehensweise bei der Auslegung eines Vorschubantriebs gezeigt. Zunächst werden die grundlegenden Anforderungen und das Antriebsprinzip festgelegt. Hierzu gehören beispielsweise die Motorbauart, das mechanische System, die bewegten Massen, auftretende Kräfte sowie geforderte Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (vgl. ▶ Kap. 5.1.1). Im nächsten Schritt findet eine Vorauswahl der mechanischen Komponenten statt, da deren Kennwerte für die Motorauswahl erforderlich sind (vgl. ▶ Kap. 5.1.2). Auf Basis des Lastdrehmoments an der Motorwelle können anschließend Motoren vorausgewählt werden (vgl. ▶ Kap. 5.1.3.1). Die dynamische Auslegung erfolgt für jeden dieser Motoren einzeln, da das Trägheitsmoment des jeweiligen Rotors in die Gesamtträgheit des mechanischen Systems einbezogen werden muss (vgl. ▶ Kap. 5.1.3.2). Mit dem Verhältnis der Trägheitsmomente auf beiden Seiten eines Getriebes oder Vorschubelements ist eine optimale Übersetzung hinsichtlich der erreichbaren Beschleunigung verknüpft. Bei Bedarf wird daher nachträglich noch die Getriebeübersetzung angepasst (vgl. ▶ Kap. 5.1.3.3). Die Auswahl des Wegmesssystems hat einen großen Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit. Für Werkzeugmaschinen mit hohen Genauigkeitsanforderungen werden direkte Wegmesssysteme eingesetzt. Bei der Auslegung des Messsystems muss die Teilungsperiode so gewählt werden, dass einerseits eine anforderungsgerechte Auflösung erreicht wird, aber andererseits die Eingangsgrenzfrequenz des Antriebsreglers nicht überschritten wird (vgl. ▶ Kap. 5.2). Die Dimensionierung der Leistungsmodule des Motors ergibt sich aus dem geforderten Motorstrom. Meist bieten die Antriebshersteller zu den Motoren passende Leistungsmodule an, sodass die Auswahl der Leistungsmodule mit der Festlegung des Motors einhergeht, was hier nicht näher betrachtet wird. Zur Unterstützung der hier beschriebenen Auslegungsschritte bieten viele Antriebshersteller Spezialsoftware an, in der Auslegungsgleichungen sowie die jeweiligen technischen Kennwerte des Produktspektrums abgebildet sind.

Ein sorgfältig ausgelegter Antrieb ist eine Voraussetzung, um in der Inbetriebnahme anforderungsgerechtes dynamisches Verhalten des Lageregelkreise zu erzielen. Durch Wahl geeigneter Regelungsparameter lässt sich bei der Inbetriebnahme das Frequenzgangverhalten optimieren (vgl. ▶ Kap. 5.3).

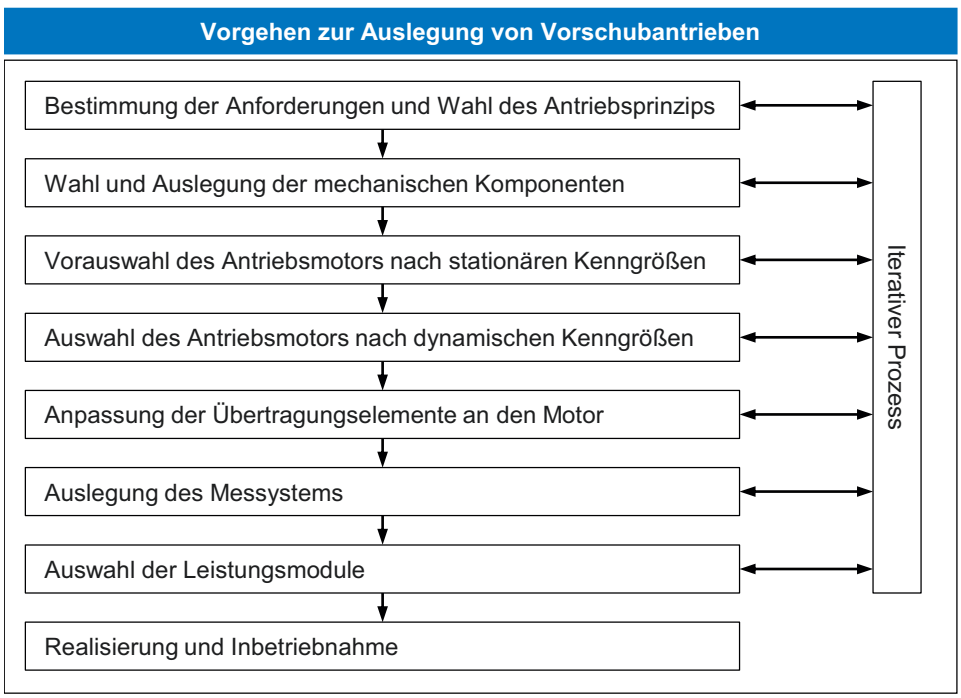


Bild 5.1 Vorgehen zur Auslegung von Vorschubantrieben

5.1.1 Bestimmung der Anforderungen und Wahl des Antriebsprinzips

Vorschubantriebe haben die Aufgabe, die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug zu erzeugen und dabei die erforderlichen Vorschubkräfte, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen aufzubringen. Die Auslegung des Vorschubantriebes erfolgt unter folgenden Gesichtspunkten:

- Erreichen der vorgegebenen Positionier- und Bahngenauigkeit sowie
- Realisieren hoher Beschleunigungen.

Hieraus lassen sich die folgenden Forderungen ableiten:

- Spielfreiheit,
- geringe statische und dynamische Nachgiebigkeit bei zugleich ausreichender Dämpfung,
- hohe erste Resonanzfrequenz der mechanischen Übertragungselemente,
- möglichst lineares Übertragungsverhalten der Konstruktionselemente des Vorschubantriebes,
- hohe geometrische und kinematische Genauigkeit der Komponenten und des montierten Antriebstrangs,
- gleichmäßiger Lauf auch bei niedrigen Geschwindigkeiten (geringe Drehmomentwelligkeit des Motors bei kleinen Drehzahlen, kein Stick-Slip-Effekt der Führungen),
- großer Vorschubgeschwindigkeitsbereich wegen der stark unterschiedlichen Achsgeschwindigkeiten beim Verfahren entlang einer Bahn,
- hohes Beschleunigungsvermögen durch ausreichendes Motormoment, hohe Kurzzeit-Überlastbarkeit, geringe Reibung und geringe Massen und Trägheitsmomente der beschleunigten Teile,
- niedrige Massen des gesamten Vorschubsystems bei aufeinander aufbauenden Achsen (Kreuzschlitten) und
- gutes Führungs- und Störverhalten des Lageregelkreises.

Moderne Antriebsmotoren und Regelkreise sind aufgrund ihrer hohen Beschleunigungen in der Lage, die Mechanik in der Resonanzfrequenz anzuregen. Dies führt dazu, dass zum Teil die dynamischen Eigenschaften der Motoren nicht voll genutzt werden können (Ruckbegrenzung). Daher ist bei der Auslegung von hochdynamischen Vorschubachsen darauf zu achten, dass ein ausreichender Frequenzabstand zwischen möglichen Anregungsfrequenzen des Lageregelkreises und den mechanischen Resonanzfrequenzen besteht. In diesem Zusammenhang gilt die Faustformel, dass die Frequenz der ersten Resonanzstelle des mechanischen Systems mindestens doppelt so groß sein soll, wie die Anregungsfrequenz der Mechanik im geschlossenen Lageregelkreis.

Elektrische Lineardirektantriebe wirken direkt auf die zu bewegenden Maschinenkomponenten. Sie benötigen daher keine mechanischen Übertragungselemente. So lassen sich höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei sehr hoher statischer und dynamischer Laststeifigkeit erreichen.

Aufgrund des iterativen Charakters des Auslegungsprozesses liegen anfangs zumeist keine sicheren Daten über die zu bewegenden Massen und die statischen bzw. dynamischen Nachgiebigkeiten der Achse bzw. ihrer Einzelkomponenten vor. Daten wie Prozesskräfte, die geforderten Beschleunigungen, die Eilganggeschwindigkeit, die durchschnittliche Bearbeitungsgeschwindigkeit, die zu bewegenden Massen und die Kosten bilden den Auslegungsrahmen. Zunächst gilt es, das Antriebsprinzip des Vorschubantriebs zu wählen. Dabei ist zwischen den verschiedenen Möglichkeiten zur Wandlung der Rotations- in eine Translationsbewegung (Spindel-Mutter-, Ritzel-Zahnstange- oder rotatorischer Antrieb mit/ohne Getriebe) oder einem Lineardirektantrieb zu unterscheiden. Welche Bauform für eine gegebene Vorschubaufgabe optimal ist, lässt sich häufig erst durch die annähernd vollständige Auslegung der Komponenten und anschließender Nachrechnung endgültig bestimmen. Wesentliche Kriterien für die Wahl des geeignetsten Antriebsprinzips sind Positioniergenauigkeit, Verfahrweg, -geschwindigkeit und -beschleunigung, geforderte statische und dynamische Steifigkeit, Fertigungs- und Montageaufwand sowie die Kosten.

5.2.2 Wahl und Auslegung der mechanischen Komponenten

Für die Dimensionierung des Motors sind die zu bewegenden und beschleunigenden Massen und Trägheitsmomente zu bestimmen. Neben dem Maschinentisch und dem zu bewegenden Werkstück sind auch Motorträgheit, Kupplungen, Getriebe, Spindel, Führungsbahnabdeckungen und Energieführungsketten zu berücksichtigen.

Für die Auslegung der mechanischen Übertragungselemente eines Vorschubantriebs sind die zulässigen Übertragungsfehler maßgebend. Welcher der Übertragungsfehler – der kinematische, der statische oder der dynamische – den größten Einfluss auf ein zu erzielendes Bearbeitungsergebnis hat, hängt vom Aufbau des Vorschubsystems, der Art des Einsatzes und von der Belastung ab.

Die im Antriebsstrang liegenden mechanischen Komponenten sind so zu wählen und auszulegen, dass unter Berücksichtigung der maximalen Schnitt- und Beschleunigungskräfte sowie des maximalen Werkstückgewichts die Verformungen und die Eigenfrequenzen der Mechanik innerhalb vorgegebener Grenzen liegen.

Bei Gewindespindeltrieben beinhaltet dies insbesondere die Bestimmung des Spindeldurchmessers hinsichtlich Steifigkeit, Knickung und kritischer Biegeeigenfrequenz. Eine Vergrößerung des Spindeldurchmessers erhöht die Steifigkeit mit der zweiten Potenz. Das Massenträgheitsmoment steigt jedoch zugleich mit der vierten Potenz. So wird durch die Vergrößerung des Spindeldurchmessers das Beschleuni-

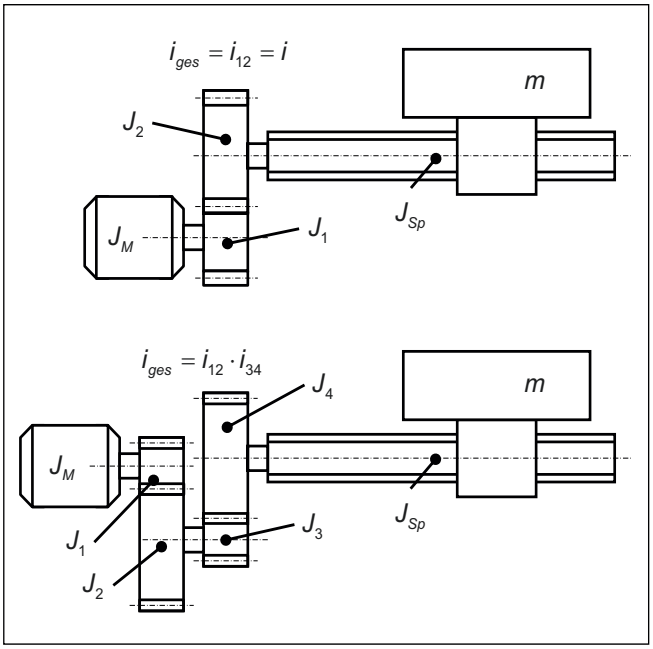


Bild 5.2 Spindelantrieb mit einstufigen und zweistufigen Vorschubgetrieben

gungsverhalten des Vorschubantriebes negativ beeinträchtigt. Dies bedeutet, dass bei der Wahl von Spindeldurchmesser und -steigung ein Kompromiss zwischen ausreichender Steifigkeit und Massenträgheitsmoment gefunden werden muss.

Bei der Systemauslegung ist darauf zu achten, dass mögliche Anregungsfrequenzen in einem ausreichenden Frequenzabstand zu den Resonanzfrequenzen liegen. Für die rechnerische Auslegung genügt hierfür in vielen Fällen die Ermittlung der untersten bzw. ersten Resonanzstelle mit Hilfe einer Abschätzung des Maschineverhaltens durch ein Verzögerungsglied 2. Ordnung. Folgende Situationen sind zu prüfen:

1. Die Eigenfrequenz des Vorschubsystems, bestehend aus den bewegten Komponenten als Masse und Getriebeelementen als Federn sollte wenigstens doppelt so hoch sein, wie die Anregungsfrequenz im geschlossenen Lageregelkreises.
2. Die Biegeeigenfrequenz der Vorschubspindel sollte mindestens das Doppelte der maximalen Drehfrequenz der Spindel bei maximaler Vorschubgeschwindigkeit betragen.

Ist der Frequenzabstand zu gering, so müssen durch Variation der Trägheitsmomente und der Federkonstanten die

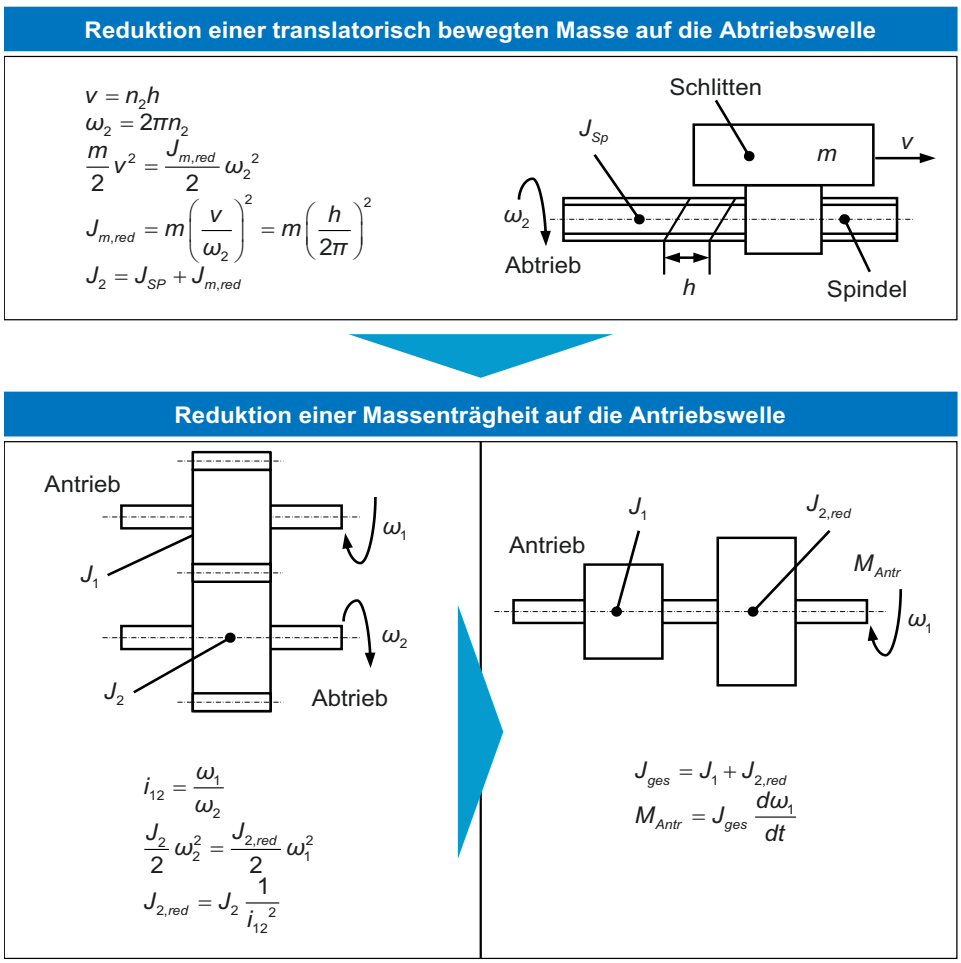


Bild 5.3 Reduktion von Massenträgheitsmomenten auf die Antriebswelle eines Vorschubantriebs

Eigenfrequenzen der mechanischen Übertragungselemente verschoben werden. Darüber hinaus kann es erforderlich sein, die Konstruktion zu verändern, z. B. im Hinblick auf die Gewindespindellagerung. Zur gezielten Auslegung des dynamischen Übertragungsverhaltens der mechanischen Bauelemente ist der Einsatz von Simulationstechniken sinnvoll.

Durch eine optimierte konstruktive Ausführung der Einzelkomponenten des Vorschubantriebs kann ein insgesamt niedrigeres Massenträgheitsmoment erzielt werden. Dies sei beispielhaft an einem Zahnradgetriebe erläutert: Bild 5.2 zeigt zwei Vorschubantriebe, die bis auf das Übersetzungsgetriebe identisch sind. Zum Bestimmen der nötigen Antriebsmomente auf der Grundlage der geforderten Beschleunigungen, müssen die Massenträgheiten und die Trägheitsmomente auf die Antriebswelle reduziert werden. In Bild 5.3 ist die dazu nötige Rechnung schrittweise dargestellt. Das auf die Antriebswelle reduzierte Trägheitsmoment des Getriebes berechnet sich für das einstufige Getriebe gemäß Gleichung (5.1) und für das zweistufige Getriebe gemäß Gleichung (5.2), wobei berücksichtigt wird, dass der Durchmesser mit vierter Potenz in das Trägheitsmoment eingeht.

Einstufiges Getriebe:

$$J_{Getriebe,red} = J_1 \cdot \left(1 + \frac{i^4}{i^2}\right) \tag{5.1}$$

Zweistufiges Getriebe:

$$J_{Getriebe,red} = J_1 \cdot \left(1 + \frac{i_{12}^4}{i_{12}^2} + \frac{1}{i_{12}^2} + \frac{i_{12}^4}{\left(i_{12} \cdot i_{34}\right)^2}\right) \tag{5.2}$$

Unter der Annahme einer Übersetzung von vier für das einstufige Getriebe, berechnet sich das Trägheitsmoment des Getriebes zum 17-fachen Trägheitsmoment des Zahnrads auf der Antriebswelle. Wird das Getriebe durch eine zweite Stufe ergänzt und beide Übersetzungen zu zwei angenommen, so beträgt das gesamte Trägheitsmoment lediglich das 6,25-fache. Damit besitzt das einstufige Getriebe bei gleichem Gesamtübersetzungsverhältnis und gleichen Radbreiten ein 2,7-fach größeres, auf die Motorwelle reduziertes Trägheitsmoment gegenüber dem zweistufigen Getriebe. Dies resultiert aus dem großen Trägheitsmoment des Antriebsrades des einstufigen Getriebes. Trotz des geringeren Trägheitsmoments des zweistufigen Getriebes wird man hier das einstufige Getriebe bevorzugen, da es außer der kleineren Nachgiebigkeit und dem geringeren Spiel den Vorteil der geringeren Fertigungskosten hat. Die Auswahl der Lösung wird somit letztlich auch durch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beeinflusst.

5.1.3 Auswahl und Auslegung des Antriebsmotors

Die Auslegung des Vorschubmotors muss im Zusammenhang mit der Bestimmung der Übersetzung der mechanischen Komponenten (Vorschubgetriebe, Spindelsteigung, Ritzeldurchmesser) gesehen werden. Diese erlauben eine Anpassung von Motormoment und -drehzahl an die Anforderungen hinsichtlich Vorschubkraft, -geschwindigkeit und -beschleunigung. Bei Lineardirektantrieben ist diese Anpassbarkeit nicht gegeben.

Die Wahl des Vorschubmotors stellt sich somit als ein Auslegungsproblem mit den Parametern Getriebeübersetzung (i) und Spindelsteigung (h) auf der einen Seite und den Motorkenndaten auf der anderen Seite dar. Aufgrund der wechselseitigen Beeinflussung der Parameter wird eine schrittweise Vorgehensweise bestehend aus Wahl einer Motor-Getriebe-Konfiguration mit anschließender Berechnung der statischen und dynamischen Eigenschaften angewendet. Soll eine anforderungsoptimale Auslegung erfolgen, sind meist mehrere Iterationen aus Wahl veränderter Komponenten und Nachrechnung notwendig.

Zur Auslegung werden in der Regel nur die Extremwerte der vorkommenden Bearbeitungs- und Beschleunigungssituationen innerhalb des Bearbeitungszyklus zugrunde gelegt. Dabei sind die maximale Geschwindigkeit im Eilgang, die maximale Beschleunigung, die Dauer der Belastung und die Stillstandszeiten nach der Bearbeitung relevant. Den Anforderungen des Bearbeitungszyklus sind die Möglichkeiten des gewählten Antriebsmotors – meist ein permanenterregter Synchronmotor – gegenüber zu stellen. Die notwendigen Angaben finden sich in den entsprechenden Drehmoment-Drehzahl-Kennlinienfeldern der Motoren. Man unterscheidet zwischen einer Kennlinie für den Dauerbetrieb (S1-Kennlinie), welche bei konstanter Belastung die maximal zulässige Motortemperatur erreicht, und einer Kennlinie für kurzzeitige Belastungen, die den maximalen Drehmoment-Drehzahl-Bereich umfasst, Bild 5.4. Unterhalb der S1-Kennlinie ist sichergestellt, dass die maximal zulässige Motortemperatur nicht überschritten wird. Die Kennlinie für kurzzeitige Belastung besteht vereinfacht aus dem Grenzdrehmoment, der Spannungsgrenze und der Grenzdrehzahl. Das Grenzdrehmoment gibt das maximale Moment des Motors ohne Beschädigung der Motorwelle an. Die Spannungsgrenze resultiert aus der maximalen Speisespannung des Motors, welche die durch Rotation induzierte Gegenspannung in der Ständer-/Ankerwicklung kompensieren muss. Aufgrund der Drehzahlabhängigkeit der Gegenspannung verläuft die Spannungsgrenze ebenfalls abhängig der Drehzahl, wobei der genaue Verlauf für die verschiedenen Motortypen unterschiedlich ist. Als drittes

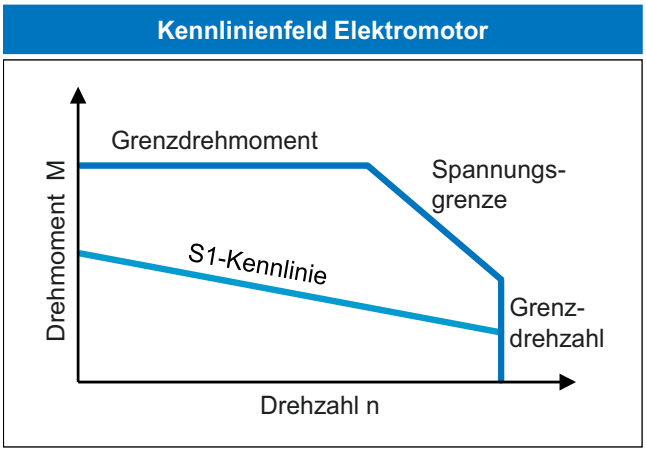


Bild 5.4 Maximale Drehmoment-Drehzahl-Grenzen für den Dauer- und kurzzeitigen Betrieb

gibt die Grenzdrehzahl die maximale Drehzahl des Motors ohne Beschädigung der Lager oder des Rotors an. Zusätzlich zu den drei Grenzen ist bei einer kurzzeitigen Belastung und Überschreitung der S1-Kennlinie (z. B. im Eilgang) zu beachten, dass die maximal zulässige Motortemperatur nicht überschritten wird [WEID08]. Neben dem Drehmoment und der Drehzahl sind bei der Auslegung daher die Dauer der geforderten Leistung und eventuelle Stillstandszeiten zu betrachten. Nachfolgend wird die Vorgehensweise am Beispiel eines Spindelantriebs dargestellt, Bild 5.2.

5.1.3.1 Auslegung nach stationären Größen

Die Auslegung des Vorschubmotors und der mechanischen Komponenten erfolgt zunächst auf Grundlage stationärer Größen. Es muss zum einen sichergestellt werden, dass die maximale Motordrehzahl ausreicht, die geforderte Verfahrgeschwindigkeit, in der Regel die Eilganggeschwindigkeit, zu erreichen. Zum anderen muss der Motor in der Lage sein, die bei den verschiedenen Bearbeitungssituationen auftretenden Lastmomente auch bei den hierbei geforderten Motordrehzahlen und über den geforderten Zeitraum aufzubringen, Gleichung (5.3).

$$M_L \le M_M \tag{5.3}$$

Das an der Motorwelle vorliegende Lastmoment lässt sich hierzu gemäß Gleichung (5.4) aus der Getriebeübersetzung und dem Getriebewirkungsgrad berechnen.

$$M_L = \frac{1}{\eta_{Ges}} \cdot \frac{1}{i} M_{Sp} \tag{5.4}$$

mit:

M_M Motormoment
M_L Lastmoment an der Motorwelle
M_{Sp}: Moment an der Spindel
η_{Ges}: Gesamtwirkungsgrad der mechanischen Komponenten ohne Spindelmutter
h: Spindelsteigung

Das Spindelmoment M_{Sp} errechnet sich bei einem Spindel-Mutter-Trieb gemäß Gleichung (5.5) aus der Gesamt-Vorschubkraft in Vorschubrichtung, der Spindelsteigung und dem Wirkungsgrad der Spindelmutter.

$$M_{Sp} = F_{Ges} \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{1}{\eta_{Spindelmutter}} \tag{5.5}$$

Die Gesamtvorschubkraft berechnet sich wiederum aus der Prozess-, Gewichts- und Reibkraft in Vorschubrichtung gemäß Gleichung (5.6).

$$F_{Ges} = F_{Vorschub,Prozess} + F_{Gewicht} + F_{Reibung} \tag{5.6}$$

Weiterhin muss der Motor in der Lage sein, die maximal geforderte Geschwindigkeit im Eilgang zu realisieren, Gleichung (5.7).

$$n_{\max} \ge n_{Eilgang} \tag{5.7}$$

Die Eilganggeschwindigkeit berechnet sich bei Spindel-Mutter-Systemen gemäß Gleichung (5.8.).

$$n_{Eilgang} = i \cdot \frac{v_{Eilgang}}{h} \tag{5.8}$$

5.1.3.2 Dynamische Auslegung

Bei modernen Maschinen stellen in der Regel die Beschleunigungsvorgänge die höchsten Anforderungen an das Motormoment. Das Maß für die Beschleunigungsfähigkeit eines Vorschubantriebs ist die Hochlaufzeitkonstante des zunächst ungeregelten Vorschubsystems. Sie berechnet sich gemäß Gleichung (5.9).

$$T = \frac{J_{Ges,red.} \cdot 2\pi \cdot n_{\max}}{M_{Beschl.,\max}} \tag{5.9}$$

Zur Berechnung müssen zum einen die einzelnen Trägheitsmomente bekannt sein und auf die Motorwelle bezogen werden ($J_{Ges,red}$, Gleichung 5.10)) und zum anderen das zur Beschleunigung verfügbare Motormoment ($M_{Beschl.,max}$) bestimmt werden.

$$J_{Ges,red} = J_{Getriebe} + J_{Motor} + J_{Spindel,red} + J_{Tisch,red} \tag{5.10}$$

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Umrechnung der Massenträgheitsmomente von rotierenden oder translatorisch bewegten Massen basierend auf dem Energieerhaltungssatz zeigt Bild 5.3. Als Beschleunigungsmoment $M_{Beschl.}$ steht das maximale Motormoment abzüglich des Lastmoments zur Verfügung. Aufgrund der Drehzahlabhängigkeit des Motormoments und ggf. des Lastmoments ist das resultierende

Beschleunigungsmoment ebenfalls eine Funktion der Drehzahl, Gleichung (5.11).

$$M_{Beschl.}(n) = M_M(n) - M_L(n) \tag{5.11}$$

Zum Beschleunigen können elektrische Motoren in der Regel kurzzeitig mit dem 3- bis 10-fachen Stillstandsmoment überlastet werden ($M_{M,max}$). Aus dem Momentengleichgewicht unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades und der Reibung in den Führungen gemäß Gleichung (5.12) folgt das zur Beschleunigung verfügbare Motormoment, Gleichung (5.13).

$$M_{M,\max} = \frac{1}{\eta_{Ges}} \cdot \left(M_{Beschl.} + M_{Reibung} \right) \tag{5.12}$$

$$M_{Beschl.} = \eta_{Ges} \cdot M_{M,\max} - M_{Reibung} \tag{5.13}$$

Die maximal mögliche Beschleunigung (Gleichung (5.16)) berechnet sich unter Verwendung der Bewegungs-DG (Gleichung (5.14)) und dem Zusammenhang zwischen translatorischer Beschleunigung und Winkelbeschleunigung bei Gewindespindeln gemäß Gleichung (5.15).

$$J_{Ges} \cdot \dot{\omega}_M = M_{Beschl.} \tag{5.14}$$

mit:

$$\omega_M = i \cdot \omega_{Sp} = i \cdot \frac{v \cdot 2\pi}{h} \tag{5.15}$$

$$\ddot{x} = \frac{h}{2\pi} \cdot \frac{1}{i} \cdot \frac{M_{Beschl.}}{J_{Ges.}} \tag{5.16}$$

5.1.3.3 Optimales Übersetzungsverhältnis

Um die Beschleunigung einer linear zu bewegenden Masse zu steigern kann das Antriebssystem ausgehend vom Motor über ein evtl. vorhandenes Zwischengetriebe bis hin zur Gewindespindel optimiert werden. Mögliche Variationsparameter sind neben dem Einsatz verschiedener Motoren ($M_{M,max}$) das Übersetzungsverhältnis des Vorschubgetriebes (i) und die Spindelsteigung (h) bzw. der Ritzeldurchmesser (d).

Bei gegebenem Motor gibt es Kombinationen aus Getriebeübersetzung und Spindelsteigung bzw. Ritzeldurchmesser zur Maximierung der Beschleunigung des Schlittens, Bild 5.5. Die optimalen Parameterwerte für i, h und d ergeben sich dabei als Lösungen der notwendigen Bedingung einer Extremwertaufgabe, Gleichung (5.17).

$$\frac{d\ddot{x}}{di} = 0, \; \frac{d\ddot{x}}{dh} = 0 \; bzw. \; \frac{d\ddot{x}}{dd} = 0 \tag{5.17}$$

Aus Gleichung (5.16) ist die Beschleunigung des Maschinentischs bekannt. Durch Einsetzen aller auf die Motorwelle reduzierten Trägheitsmomente, kann daraus die Beschleunigung für den Fall eines Spindel-Mutter-Triebs bestimmt werden, Gleichung (5.18).

Vorschubantrieb mit Zahnstange-Ritzel-System

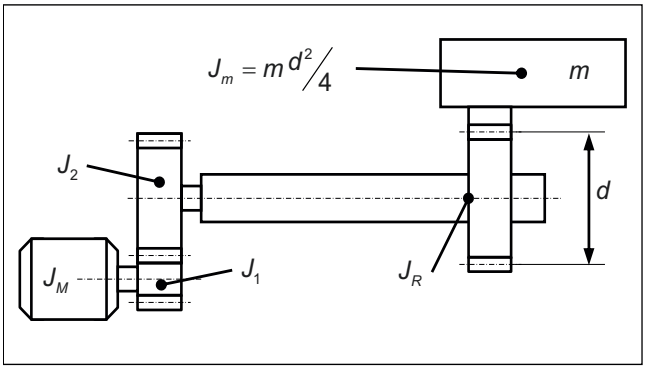


Bild 5.5 Vorschubantrieb mit Zahnstange-Ritzel-Systemen

$$\ddot{x}_m = \frac{M_{Antr.}}{J_{ges}} \frac{1}{i} \frac{h}{2\pi} = \frac{M_{Antr.}}{2\pi} \frac{h \cdot 1/i}{J_M + J_1 + 1/i^2 \cdot (J_2 + J_{Sp} + J_m)}$$
$$\Leftrightarrow \ddot{x}_m = \frac{M_{Antr.}}{2\pi} \frac{h \cdot i}{i^2 (J_M + J_1) + J_2 + J_{Sp} + h^2 m/4\pi^2} \tag{5.18}$$

Das analytische Optimum lässt sich damit und Gleichung (5.17) durch die Gleichungen (5.19) und (5.20) für ein Spindel-Mutter-System sowie durch Gleichung (5.21) und (5.22) für ein Zahnstange-Ritzel-System angeben.

$$\Rightarrow i_{opt,Beschl.} = \sqrt{\frac{J_2 + J_{Sp} + m h^2/4\pi^2}{J_M + J_1}} = \sqrt{\frac{J_{Abtrieb}}{J_{Antrieb}}} \tag{5.19}$$

$$h_{opt,Beschl.} = \sqrt{\frac{i^2 (J_M + J_1) + J_2 + J_{Sp}}{m/4\pi^2}} \tag{5.20}$$

Zu beachten ist bei den optimalen Parameterwerten eines Zahnstange-Ritzel-Systems im Vergleich zum Spindel-Mutter-System die Änderung des reduzierten Trägheitsmoments der Masse des Maschinentischs.

$$\Rightarrow i_{opt,Beschl.} = \sqrt{\frac{J_2 + J_R + m\,d^2/4}{J_M + J_1}} = \sqrt{\frac{J_{Abtrieb}}{J_{Antrieb}}} \tag{5.21}$$

$$d_{opt,Beschl.} = \sqrt{\frac{i^2 (J_M + J_1) + J_2 + J_R}{m/4}} \tag{5.22}$$

In Bild 5.6 ist der Zusammenhang von erreichbarer Beschleunigung und den Parametern Spindelsteigung und Getriebeübersetzung beispielhaft für ein Spindel-Mutter-System dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss einer geeigneten Parameterwahl auf die Beschleunigung, wobei ebenfalls ein Gebiet mit optimaler Beschleunigung festzustellen ist. Aus praktischer Sicht muss jedoch festgehalten werden, dass die möglichen Übersetzungen und Spindelsteigungen bauartbedingt durch minimale und maximale Werte begrenzt sind.

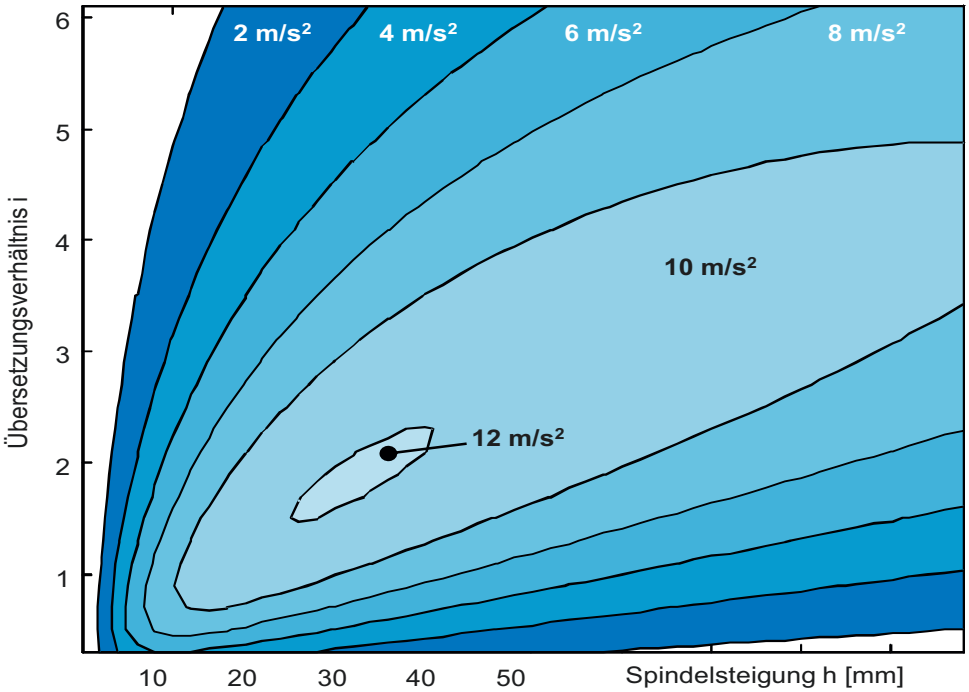


Bild 5.6 Variation der Übersetzungsverhältnisse bei Gewindetrieben

Randbedingung	
Bewegte Massen m = 935 kg	Motormomnet M_{max} = 65 Nm
Motorträgheit J_M = 0,0048 kgm²	Spindellänge l = 1000 mm
Spindeldurchmesser d = 40 mm	h, i → variabel

5.2 Auslegung des Messsystems

Elektromechanisch angetriebene Achsen verfügen in der Regel über ein Messsystem im Motor, mit dem der Drehzahl- und Lageregelkreis geschlossen werden können. Da sich jedoch die genauigkeitsbeeinflussenden mechanischen Übertragungselemente mit diesem Messsystem nicht erfassen lassen, wird in Maschinen mit höheren Genauigkeitsanforderungen das indirekte Motormesssystem meist durch ein direktes Messsystem ergänzt.

Bei der Auswahl des verwendeten Messsystems sind zwei gegenläufige Aspekte zu beachten. Auf der einen Seite muss das Messsystem die erforderliche Genauigkeit und Auflösung haben. Dies kann z. B. durch Auswahl eines Maßstabs mit einer geringen Teilungsperiode erreicht werden. Auf der anderen Seite dürfen die maximale Geschwindigkeit des Messsystems (Absenkung der Geberamplitude) sowie die Taktung des Antriebsreglers bei Eilgangbewegungen der Maschine nicht überschritten werden.

Übliche Eingangsgrenzfrequenzen liegen bei 250 kHz. Bei einem Messsystem mit einer Signalperiode von z. B. 20 µm entspricht dies einer maximalen Geschwindigkeit von 5 m/s = 300 m/min. Wird jedoch ein Messsystem mit einer Teilungsperiode von 4 µm verwendet, liegt die zulässige Maximalgeschwindigkeit bei nur 1 m/s, also bei 60 m/min. Dieser Wert wird in HSC-Maschinen (High Speed Cutting Maschinen) weit überschritten [BREC02; ZIRN06; AUCH12]. Daraus folgt, dass bei HSC-Maschinen entweder Messsysteme mit einer geringeren Teilungsperiode oder eine Auswertungseinheit mit einer höheren Grenzfrequenz eingesetzt werden müssen.

5.3 Inbetriebnahme der Regelung

Die Inbetriebnahme eines Servoantriebs und die optimale Einstellung aller Regelkreise erfordert mehrere Schritte. Abhängig von Motortyp und Fabrikat wird der Anwender dabei durch Inbetriebnahmehilfen für Antriebsverstärker und Steuerung unterstützt. Die Inbetriebnahmeprozedur für einen Antrieb, bei der alle Inbetriebnahmeschritte vom Anwender selbst ausgeführt werden müssen, erfordert in der Regel die im Folgenden beschriebenen Schritte. Dabei wird vorausgesetzt, dass die elektrische Installation vollständig ausgeführt und überprüft wurde.

5.3.1 Manuelle Inbetriebnahme

Bei der manuellen Inbetriebnahme einer Vorschubachse wird in der Regel in folgenden Arbeitsschritten vorgegangen:

- Einstellung des Stromreglers nach Herstellerangabe,
- bei analogen Systemen: Driftabgleich der Drehzahl,
- Einstellung des Drehzahlreglers,
- Anschluss der Sollwertvorgabe von der Steuerung,
- Überprüfung des richtigen Regelsinns,
- eventuell Parametrierung von Strom- oder Drehzahlsollwertfiltern,
- Einstellung und Optimierung des Lagereglers und
- Einstellung der Beschleunigungs- und Bremsrampen.

Im Folgenden wird die Einstellung des Drehzahl- und des Lagereglers exemplarisch beschrieben. Das erläuterte Vorgehen kann prinzipiell auch auf Achsen mit Lineardirektantrieb angewendet werden.

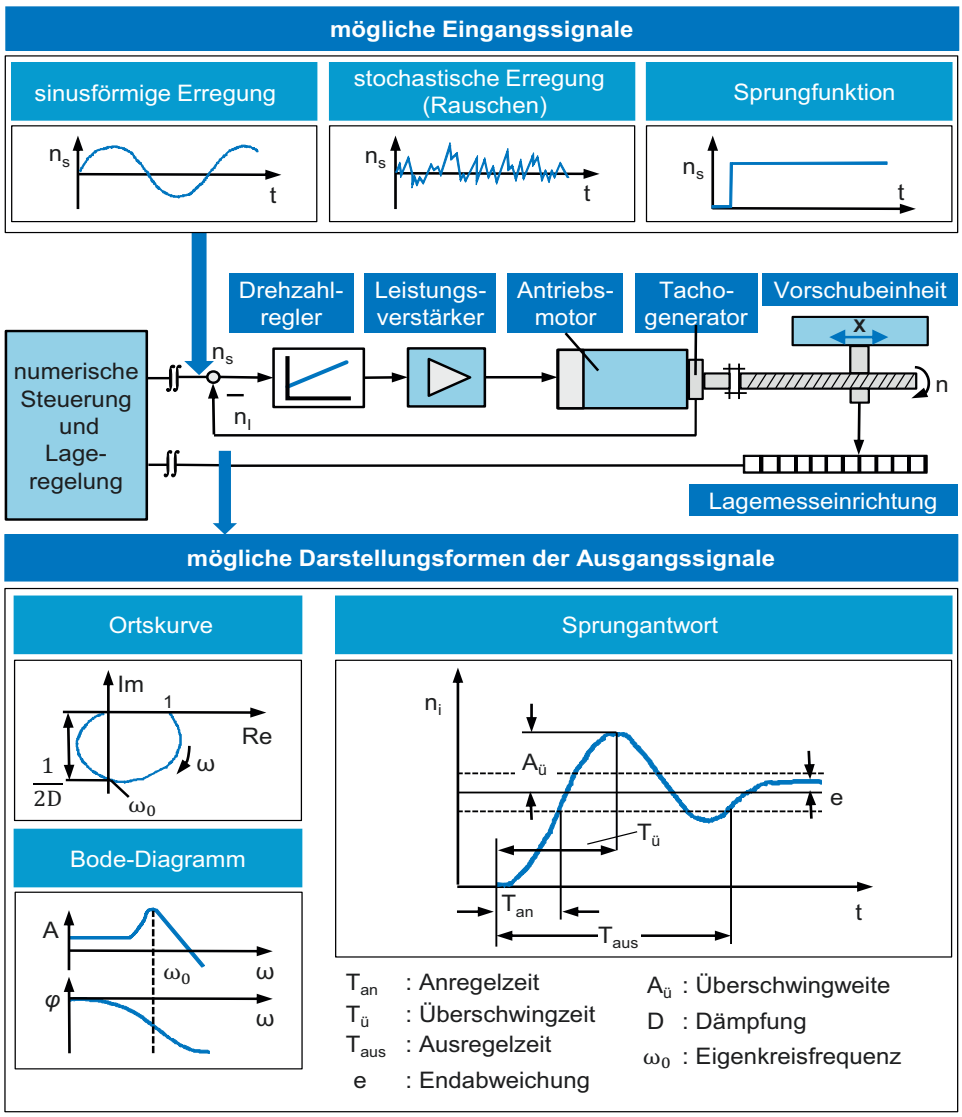
Das allgemeine Blockschaltbild eines Lageregelkreises mit unterlagerter Drehzahlregelung ist in ◘ Bild 5.9 dargestellt. Das dynamische Verhalten einer Maschinenachse wird in erster Linie vom Antriebssystem bestimmt. Daher ist es zweckmäßig, vor der Einstellung der Lageregelung zunächst den Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsregelkreis zu optimieren [HEIN98].

5.3.1.1 Einstellung des Drehzahlreglers

Der Drehzahlregelkreis wird zunächst vom übergeordneten Lageregelkreis getrennt. Die Bestimmung des dynamischen Verhaltens erfolgt durch Anregung mit definierten Testsignalen (z. B. Sprungfunktion, Rauschen, Sinusfunktion) als Drehzahlsollwert und Aufzeichnung der Istdrehzahl.

Bei analogen Antrieben kann die Vorgabe des Drehzahlsollwertes recht einfach über einen Signalgenerator am Sollwerteingang des Verstärkers erfolgen. Ebenso kann das Tachosignal abgegriffen und extern aufgezeichnet werden.

Moderne digitale Antriebe verfügen im Verbund mit entsprechenden Softwaremodulen auf der Steuerung über leistungsfähige Funktionen, die einerseits Sollwerte generieren



◘ **Bild 5.7** Bestimmung des Übertragungsverhaltens von Antrieben

und andererseits die internen Istwerte aufzeichnen können. Darüber hinaus sind in der Regel Funktionen vorhanden, die den Techniker bei der Korrelation und Auswertung der Signale unterstützen.

Sprungförmige Anregung

Zur Aufnahme der Übergangsfunktion wird häufig der Drehzahlsollwert sprungförmig geändert. Die Sprunghöhe ist dabei so einzustellen, dass der Antrieb seinen Maximalstrom nicht erreicht, um Nichtlinearitäten durch die Strombegrenzung des Antriebsverstärkers auszuschließen. Diese Drehzahl beträgt im Allgemeinen nur 5 % bis 15 % der maximal möglichen Motordrehzahl. ◘ Bild 5.8 zeigt als Beispiel die Sprungantwort und den Stromverlauf eines Vorschubantriebs bei einem Sprung von 0 auf 80 min^{-1}, bei dem die Stromgrenze von 40 A gerade noch nicht erreicht wird. Die maximale Drehzahl des Motors beträgt 2000 min^{-1}.

Unter der Voraussetzung, dass die Eigenkreisfrequenz der Vorschubmechanik deutlich höher liegt als die Eigenkreisfrequenz des Antriebsregelkreises mit Motor und angekoppelter Last, lässt sich das Zeitverhalten des Antriebssystems durch ein Verzögerungssystem 2. Ordnung annähern, dessen Übertragungsfunktion in Gleichung (5.23) beschrieben wird. Dieses Verhalten ist bei den meisten Werkzeugmaschinen gegeben. Bei Robotern liegt die Eigenkreisfrequenz der Mechanik häufig in der gleichen Größenordnung oder sogar niedriger als die der Antriebe, sodass dort die folgenden Gleichungen nicht anwendbar sind.

$$G_A(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{2D_A}{\omega_{0A}} j\omega + \frac{1}{\omega_{0A}^2}(j\omega)^2} \tag{5.23}$$

Aus der Sprungantwort lassen sich folgende Kenngrößen zeichnerisch ermitteln (vgl. ◘ Bild 5.7):

T_{an}	Anregelzeit
$T_{ü}$	Überschwingzeit
T_{aus}	Ausregelzeit
e	Endabweichung
$A_{ü}$	Überschwingweite

Damit besteht die Möglichkeit, die Kenngrößen Dämpfung D_A und Eckkreisfrequenz ω_{0A} für das System 2. Ordnung zu berechnen. Es gelten Gleichung (5.24) und Gleichung (5.25) mit $a_{ü}$: auf statischen Endwert bezogene Überschwingweite $A_{ü}$.

$$D_A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\ln a_{ü}}\right)^2}} \tag{5.24}$$

$$\omega_{0A} = \frac{\pi}{T_{ü} \cdot \sqrt{1 - D_A^2}} \tag{5.25}$$

Außerdem kann anhand der aufgezeichneten Sprungantwort sowie Gleichung (5.24) und Gleichung (5.25) auch die richtige Einstellung des Drehzahlreglers überprüft werden. Der Antrieb sollte sich in etwa wie ein Verzögerungsglied 2. Ordnung mit einer Dämpfung von 0,5 und einer möglichst hohen Eigenkreisfrequenz verhalten [GROS06]. Sind die Zeitkonstanten T_{mech} und T_{el} des Motors mit angekoppelter Last bekannt, so lassen sich die Einstellparameter des PI-Drehzahlreglers rechnerisch ermitteln. Bewährt hat sich eine Einstellung nach dem symmetrischen Optimum, mit dem sich der Verstärkungsfaktor des Drehzahlreglers K_p und die Nachstellzeit T_p gemäß Gleichung (5.26) und Gleichung (5.27) ergeben [STUT81].

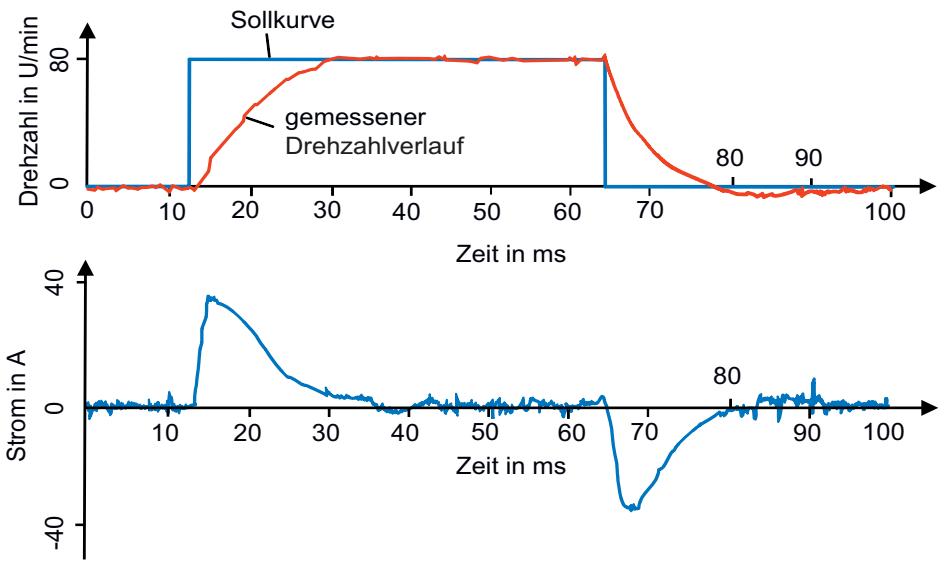


Bild 5.8 Drehzahlsprung von 0 auf 80 min^{-1} und zugehöriger Stromverlauf

$$K_p = \frac{T_{mech}}{8 \cdot T_{el}} \tag{5.26}$$

mit:

$T_{mech} = \frac{J_{ges} \cdot \omega_{\max, Motor}}{M_{St,A}}$

$M_{St,A}$ üüüüüüüüüüüüüüüüü

$$T_p = 4 \cdot T_{el} \tag{5.27}$$

Frequenzgangmessung

Eine andere Methode zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Regelkreisen ist die Aufnahme der Übertragungsfunktion (Frequenzgang) und Darstellung als Ortskurve oder im Bode-Diagramm. Hierbei wird das Verhalten des Antriebs in einem bestimmten Frequenzbereich ermittelt und dargestellt. Zur Messung wird der Drehzahlsollwert mit einem Anregungssignal beaufschlagt und der Drehzahlistwert gemessen. Mit einer Fourieranalyse wird dann aus dem Drehzahlsoll- und -istwert die Übertragungsfunktion berechnet.

Das Anregungssignal für den Drehzahlsollwert hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung. Grundsätzlich können stochastische und deterministische Signale verwendet werden, wobei auf jeden Fall das gesamte Frequenzspektrum, das vom Fourieranalysator ausgewertet werden soll, auch im Anregungssignal enthalten sein muss. Gute Ergebnisse liefert ein Sinussignal, dessen Frequenz sich während der Messung zeitlinear zwischen einem minimalen und einem maximalen Wert ändert (engl. *Sweep*).

Auch bei dieser Messung ist die Anregung (Amplitude) so zu begrenzen, dass die Stromgrenze des Antriebs nicht erreicht wird. Die Annahme eines linearen Übergangsverhaltens zur Berechnung von Dämpfung und Eigenkreisfrequenz verliert sonst ihre Gültigkeit.

Den Einfluss der Strombegrenzung auf den Frequenzgang eines Vorschubantriebs zeigt Bild 5.9. Dieser Antrieb erreicht mit sinusförmiger Anregung bei ca. 70 Hz die Strombegrenzung für eine Amplitude $\hat{n}$ der Drehzahlschwingung von 300 min^{-1}. Der nichtlineare Einfluss der Strombegrenzung zeigt sich in der Abnahme der Eigenkreisfrequenzen bei höheren Anregungsamplituden. Diese Abnahme liegt darin begründet, dass die zu erzeugende Maximalbeschleunigung linear mit der Schwingungsamplitude zunimmt. Die Beschleunigung ist wiederum in erster Näherung proportional zum Motorstrom, sodass die Strombegrenzung bei großen Schwingungsamplituden schon bei kleineren Frequenzen erreicht wird.

Als Anregungssignal wurde bei dieser Messung ein gesweepter Sinus im Frequenzbereich zwischen 2 Hz und 100 Hz verwendet. Das Verhalten des Antriebs bei Frequenzen unterhalb von 2 Hz war somit aus den Messdaten nicht zu ermitteln, sodass auch die im Bode-Diagramm dargestellten Amplituden- und Phasenverläufe bei Frequenzen kleiner als 2 Hz nicht das reale Antriebsverhalten wiedergeben.

5.3.1.2 Einstellung des Lageregelers

Um die Dynamik der Vorschubantriebe zu steigern und das Bahnverhalten zu verbessern, ist der K_V-Faktor möglichst hoch einzustellen. Ein zu hoch eingestellter K_V-Faktor führt jedoch zu Instabilitäten und Überschwingen beim Positionieren. Als Kompromiss lässt sich ein Wert ermitteln, bei dem beim Einfahren in eine Position mit normaler Bearbeitungsgeschwindigkeit gerade noch kein Überschwingen auftritt, Bild 5.10.

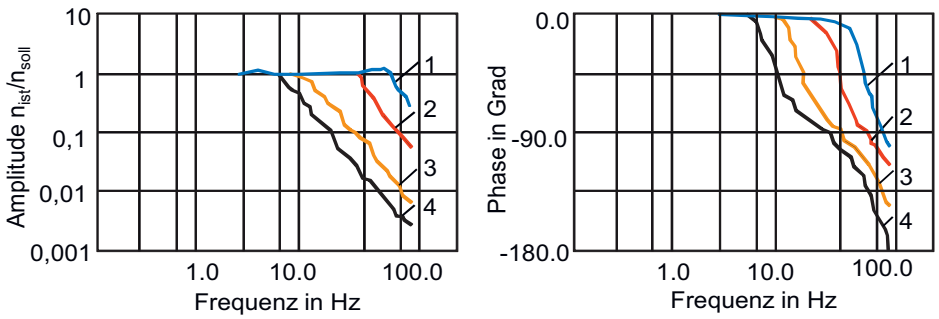


Bild 5.9 Frequenzgänge n_{ist}/n_{soll} eines Vorschubantriebs bei verschiedenen Anregungsamplituden $\hat{n}$

1: $\hat{n}$ = 300 1/min
2: $\hat{n}$ = 500 1/min
3: $\hat{n}$ = 1500 1/min
4: $\hat{n}$ = 2500 1/min

Motordaten	
Typ:	Bürstenloser Gleichstrom-Servomotor
Stillstandsdrehmoment:	10 Nm
max. Drehmoment:	38 Nm
max. Drehzahl:	2000 1/min

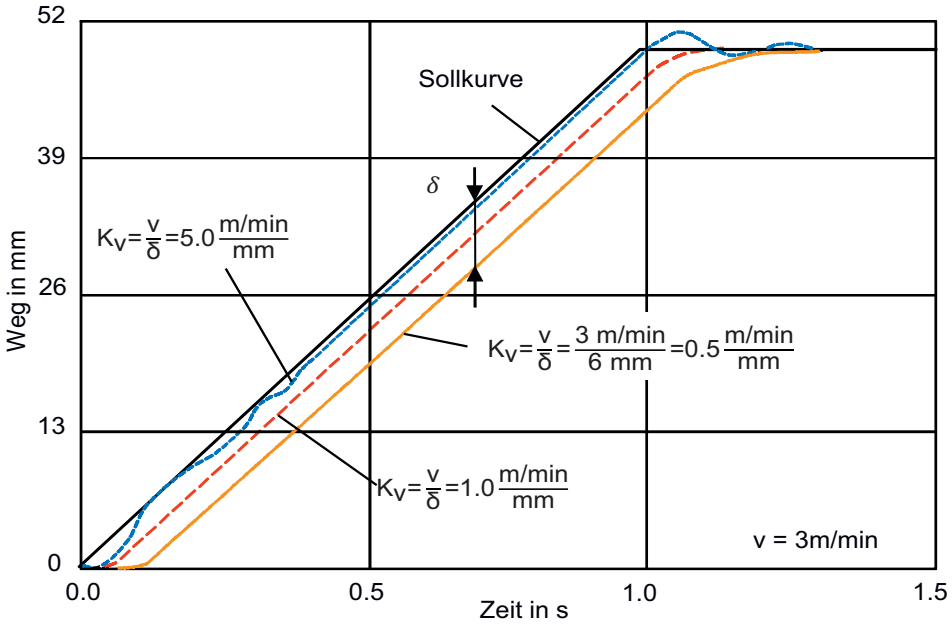


Bild 5.10 Einfluss des K_V-Faktors an einer Geschwindigkeitsrampe

Gängige Werte für den K_V-Faktor liegen im Bereich:

$$K_V = 0,6...4,8 \frac{\text{m/min}}{\text{mm}} \text{ (elektromechanisches System)}$$
$$K_V = 15...25 \frac{\text{m/min}}{\text{mm}} \text{ (Lineardirektantrieb)} \quad (5.28)$$

Die höheren K_V-Faktoren bei linearen Direktantrieben hängen mit dem Wegfall der nachgiebigen mechanischen Übertragungselemente zusammen. Bei den elektromechanischen Antrieben sorgen diese für eine zwangsläufig geringere Eckkreisfrequenz und damit Dynamik der Regelkreise.

5.3.2 Automatische Inbetriebnahme

Aus den genannten Arbeitsschritten wird deutlich, dass die Inbetriebnahme eines Servoantriebs auch vollautomatisch durchgeführt werden kann. Inzwischen bieten deshalb einige Steuerungs- und Antriebshersteller Inbetriebnahmehilfen zur Unterstützung des Anwenders an.

Die Steuerung sorgt dafür, dass die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Schritte automatisch hintereinander ausgeführt werden. Die Antriebe werden dazu mehrmals in den einzelnen Regelkreisen mit Rauschen angeregt und die entsprechende Übertragungsfunktion bestimmt. Daraus können die Parameter der PI-Regler der kaskadierten Regelkreise berechnet werden. Häufig hat der Anwender auch noch die Möglichkeit zu wählen, ob er eine gut gedämpfte oder hoch dynamische Auslegung wünscht.

Zusätzlich sind die Werkzeuge zur automatisierten Inbetriebnahme oft in der Lage, eventuell benötigte Sollwertfilter im Strom- oder Drehzahlregelkreis zu parametrieren, um Resonanzfrequenzen gar nicht erst anzuregen. Dadurch kann das Führungsverhalten der Antriebe nochmals verbessert werden.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
DGL	Differentialgleichung
HSC	High Speed Cutting
PI-Regler	Proportional-Integral-Regler
S1	Betriebsart „Dauerlast“ Elektromotor

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A_{Ü}$	1/min	Überschwingweite
D	–	Dämpfungsmaß
D_i	–	Dämpfungsmaß
F_{Ges}	N	Gesamtvorschubkraft
F_i	N	Kraft
$J_{Ges,red}$	kg·m²	auf Antriebswelle reduziertes Gesamtträgheitsmoment
J_i	kg·m²	Massenträgheitsmoment
$J_{i,red}$	kg·m²	auf bestimmte Welle reduziertes Massenträgheitsmoment
J_m	kg·m²	auf die Spindel reduziertes Massenträgheitsmoment des Schlittens
J_{SP}	kg·m²	Massenträgheitsmoment der Spindel
M_{Antr}	Nm	Antriebsmoment
M_i	Nm	Moment
$M_{i,max}$	Nm	maximales Moment

M_L	Nm	Lastmoment
M_M	Nm	Motormoment
M_{Sp}	Nm	Spindelmoment
T_{An}	s	Anregelzeit
T_{Aus}	s	Ausregelzeit
T_{el}	s	Zeitkonstante
T_{mech}	s	Zeitkonstante
T_p	s	Nachstellzeit
$T_{Ü}$	s	Überschwingzeit
V	m/s	Geschwindigkeit
d_i	mm	Ritzeldurchmesser
e	1/min	Endabweichung
h	mm	Spindelsteigung
i	-	Getriebeübersetzung
i_{ges}	-	Gesamtübersetzung
i_{jk}	-	Übersetzung der Getriebestufe *jk*
n_i	1/min	Drehzahl
t	s	Zeit
$\ddot{x}$	m/s²	Beschleunigung in *X*-Richtung
δ	mm	Schleppfehler
η_{Ges}	-	Gesamtwirkungsgrad
η_i	-	Wirkungsgrad
φ	rad	Phasenverschiebung
ω_0	rad/s	Eigenkreisfrequenz
ω_{0A}	rad/s	Eckreisfrequenz
ω_i	rad/s	Winkelgeschwindigkeit
$\dot{\omega}_1$	rad/s²	Winkelbeschleunigung

Literaturverzeichnis

[AUCH12] Auch, S.: Fertigungszentren für die sechsseitige Komplettbearbeitung. In: WB Werkstatt und Betrieb, 2012, Nr. 04, S. 50–52

[BREC02] Brecher, C.: Vergleichende Analyse von Vorschubantrieben für Werkzeugmaschinen. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik. Bd. Bd. 2002,17). Aachen: Shaker, 2002

[GROS06] Gross, H.; Hamann, J.; Wiegärtner, G.: Technik elektrischer Vorschubantriebe in der Fertigungs- und Automatisierungstechnik. Erlagen: Publicis Corporate Pub., 2006

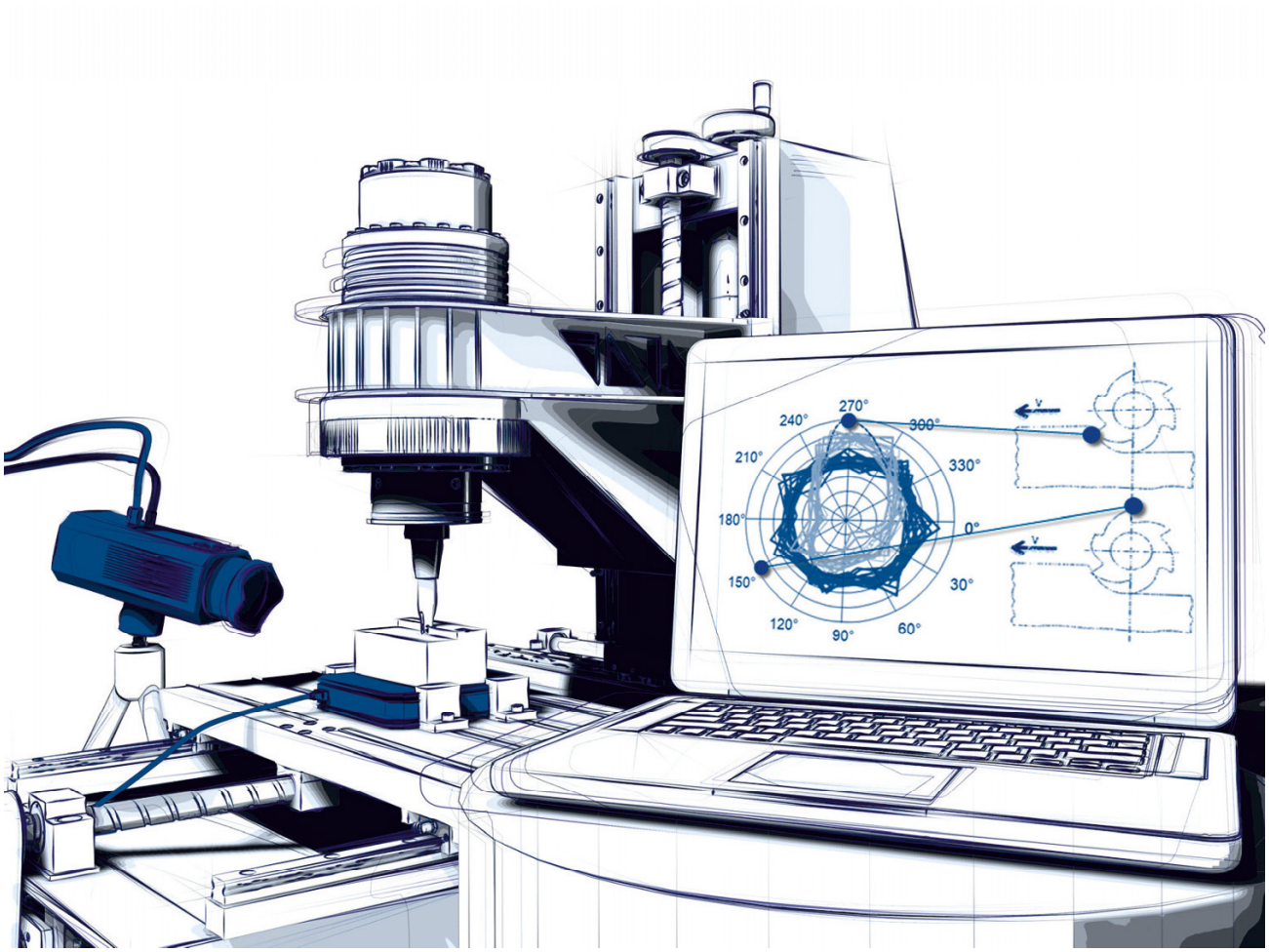
[HEIN98] Heinemann, G.; Papiernick, W.: Hochdynamische Vorschubantriebe mit Linearmotoren. In: VDI-Z Special Antriebstechnik, April 1998, S. 26–34

[STUT81] Stute, G.: Regelung an Werkzeugmaschinen. München: Hanser-Verlag, 1981

[WEID08] Weidauer, J.: Elektrische Antriebstechnik. Erlangen: Publicis Corporate Publ., 2008

[ZIRN06] Zirn, O.; Weikert, S.: Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme. Berlin: Springer, 2006

Kapitel 6

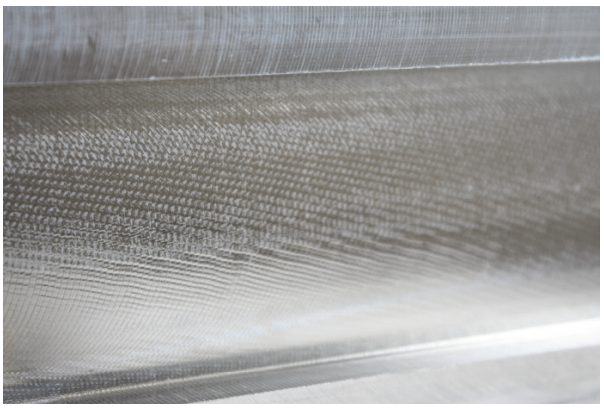


Prozessüberwachung

Ich danke meinen Mitarbeitern Dr.-Ing. Thomas Berners, Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M.Sc., Dr.-Ing. Markus Obdenbusch, Simon Storms M.Sc. und Stephan Wein M.Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

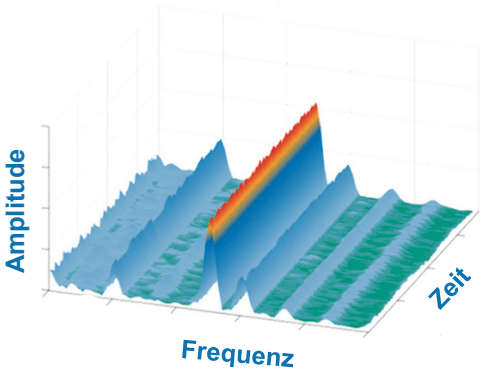
www.wzl.rwth-aachen.de

Maschinenuntersuchung

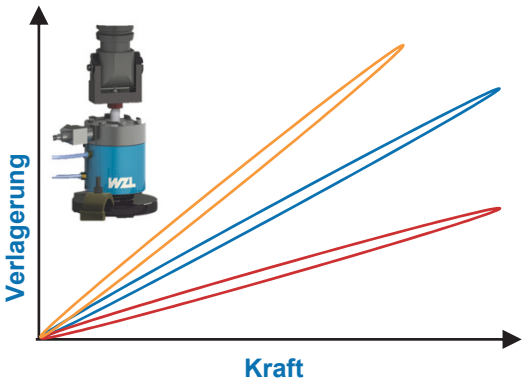


- Rattermarken
- Oberflächenschattierungen
- Schwingungsprobleme
- Geometrieabweichungen
- übermäßiger Werkzeugverschleiß

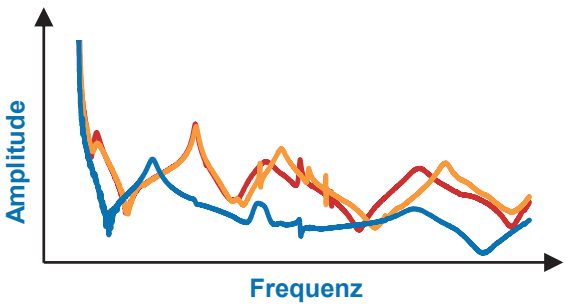
Bearbeitungsversuch



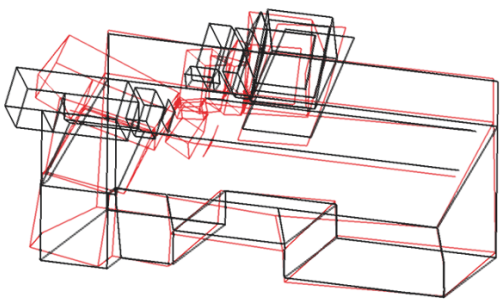
Statische Nachgiebigkeit



Dynamische Nachgiebigkeit



Experimentelle Modalanalyse



Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Steinbachstr. 19
52074 Aachen
+49 241 80 27409
Maschinentechnik@wzl.rwth-aachen.de

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Abteilung Maschinentechnik

Prozessüberwachung

6.1 Einführung – 196

6.1.1 Hintergrund, Begriffe und Ziele – 196

6.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung von Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Instandhaltungsmaßnahmen – 199

6.1.3 Einflussgrößen auf die Funktion der Fertigungsmittel und die Qualität der Produkte – 199

6.1.4 Strategien und Struktur von Überwachungssystemen – 200

6.1.5 Prinzipien der Prozessregelung – 205

6.2 Signalverarbeitung und Mustererkennung – 206

6.2.1 Analoge Signalaufbereitung – 208

6.2.2 Digitale Vorverarbeitung – 211

6.2.3 Merkmalsextraktion – 211

6.2.4 Klassifikation – 212

6.3 Technologische Prozessüberwachung und Prozessregelung bei verschiedenen Fertigungsverfahren – 216

6.3.1 Drehbearbeitung – 216

6.3.2 Fräsbearbeitung – 226

6.3.3 Bohren – 244

6.3.4 Schleifen – 249

6.3.5 Funkenerosive Bearbeitung – 252

6.3.6 Kollisionsüberwachung – 256

6.4 Statistische Prozessregelung – 259

6.5 Maschinenzustandsüberwachung – 260

6.5.1 Verfahren der Instandhaltung und Wartung – 260

6.5.2 Maschinenzustandsüberwachung – 264

6.5.3 Messwertanalyse – 268

Abkürzungsverzeichnis – 276

Formelzeichenverzeichnis – 277

Literaturverzeichnis – 279

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_6

6.1 Einführung

Neben der Bearbeitungsgeschwindigkeit und -genauigkeit ist die Nutzungszeit eines Fertigungssystems von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung. Zur Sicherstellung einer hohen Nutzungszeit werden qualitätssichernde Aufgaben unter bestimmten zeitlichen Bedingungen durchgeführt (vgl. ▶ Kap. 6.1.1 und ▶ Kap. 6.1.2).

Von den Einflüssen auf die Funktion der Fertigungsmittel und auf die Qualität der Produkte (vgl. ▶ Kap. 6.1.3) hängt es ab, ob eine kontinuierliche Überwachung erforderlich ist.

In ▶ Kap. 6.1.4 sind die Bestimmungsgrößen bei Überwachungsaufgaben und die Struktur von Überwachungssystemen beschrieben.

Mit der Prozessregelung wird das Ziel verfolgt, die Prozessführung unter ständiger Anpassung an das Verhalten von Maschine, Werkzeug, Werkstück und Material automatisch zu optimieren (vgl. ▶ Kap. 6.1.5).

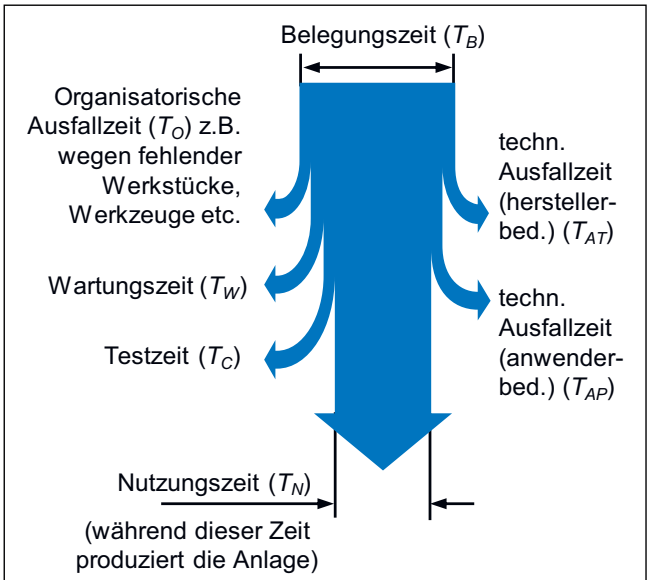
6.1.1 Hintergrund, Begriffe und Ziele

Die heutige Fertigungstechnik ist durch hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit und -genauigkeit geprägt. Dies führt zu hohem Verschleiß bzw. zu hoher Belastung von Werkzeug und Maschine und verlangt vielfältige Maßnahmen der Prozessüberwachung und -regelung, Diagnose und Instandhaltung, um Störungen und Ausfälle möglichst zu vermeiden.

Um das Ziel einer hohen Produktivität zu erreichen, müssen die Maschinenstillstandszeiten minimiert und eine hohe Prozesssicherheit während der beaufsichtigten und unbeaufsichtigten Bearbeitung erreicht werden. Die tatsächliche Nutzungszeit T_N eines Fertigungssystems, also die Zeit, in der die Anlage produziert, wird durch verschiedene Ausfallzeiten beeinflusst (■ Bild 6.1), die in der VDI-Richtlinie 3423 [FIRM95] definiert sind. Hier ist zum einen die organisatorische Ausfallzeit T_O als die Summe aller Ausfallzeiten, die auf mangelnde Organisation, wie etwa das Fehlen von Material, zurückzuführen ist, zu nennen.

Zum anderen beschreibt die technische Ausfallzeit T_A die Zeit aller Ausfälle, die durch technische Störungen der betrachteten Anlage verursacht werden. Hier wird weiterhin unterschieden, ob die Ausfälle hersteller- (T_{AT}) oder anwenderbedingt (T_{AP}) aufgetreten sind. Zusätzliche Ausfallzeiten sind die Wartungszeit T_W sowie Testzeit T_C, diese aber nur dann, wenn die Anlage nicht produzieren kann. Die Testzeit ist zur Nutzungszeit zu rechnen, wenn ein Produktionsfortschritt stattfindet. Die Gesamtheit dieser Ausfallzeiten reduziert die Belegungszeit T_B auf die tatsächliche Nutzungszeit T_N. Unabhängig vom Schichtmodell und der Anlagenkomplexität lassen sich so Vergleichskriterien wie der gesamte Nutzungsgrad und der technische Nutzungsgrad definieren, aus denen Rückschlüsse auf Schwachstellen und Abhilfemaßnahmen gezogen werden können.

Nutzungszeit und technischer Nutzungsgrad



Gesamter Nutzungsgrad N_G:

$$N_G = \frac{T_N}{T_B} \cdot 100\%$$

$$= \left(1 - \frac{T_O + T_{AT} + T_{AP} + T_W + T_C}{T_B}\right) \cdot 100\%$$

Technischer Nutzungsgrad N_T:

$$N_T = 1 - \frac{T_{AT}}{T_B} \cdot 100\%$$

■ **Bild 6.1** Bestimmung der Nutzungszeit sowie Definition des gesamten und technischen Nutzungsgrads (nach VDI 3423)

Die zu überwachenden Objekte können sich zum einen auf den Prozess und zum anderen auf die Maschine beziehen. Aus diesem Grund müssen sowohl der Prozess, d. h. Werkzeug und Werkstück, als auch alle Maschinenkomponenten beobachtet werden.

Die Überwachung des Prozesses hat das Ziel, eine möglichst hohe Prozesssicherheit zu gewährleisten. Die Prozesssicherheit beinhaltet, dass die vorgegebene Produktqualität eingehalten und Prozessstörungen (z. B. Werkzeugbruch) verhindert bzw. beseitigt werden.

Ziel der Maschinenüberwachung ist es, den aktuellen Zustand einzelner Komponenten der Maschine zu überwachen und fehlerhafte Funktionen einzelner Komponenten oder Baugruppen zu erkennen.

Eine genauere Abgrenzung dieser beiden Überwachungsarten erfolgt in ▶ Kap. 6.1.4.3.

Um die Prozesssicherheit und Maschinenverfügbarkeit zu erhalten bzw. weiter zu steigern, werden neben organisatorischen Maßnahmen, wie Personalqualifizierung, rechtzeitiger Betriebsmittelbereitstellung, optimiertem Maschinenbelegungsplan oder regelmäßigen Wartungsintervallen, in zunehmendem Maße automatisierte Überwachungs- und Diagnosesysteme eingesetzt.

Diese Einrichtungen müssen

- die Prozessfunktionen und die Produktqualität auf Abweichungen oder Fehler (Störungen) überwachen,
- ggf. bei Abweichungen den Prozess regeln oder
- auf Anforderung die Störungen diagnostizieren (d. h. Fehlerart, -ort und -ursachen bestimmen) und
- dem Benutzer nach Möglichkeit Funktionen zur Unterstützung bei der Fehlerbehandlung bereitstellen.

Im Rahmen der Qualitätssicherung wird für die beiden Teilaufgaben Zustandserfassung und Zustandsvergleich (Bild 6.2) der Begriff „Überwachung“ verwendet, der jedoch aus technischer Sicht auch eine funktionale Zuordnung hat (vgl. ▶ Kap. 6.1.4.2).

Die Zustandserfassung der Anlage oder des Prozesses beinhaltet die Aufnahme von Prozess- und Maschinenkennwerten, die den gegenwärtig vorliegenden Zustand des Fertigungsmittels wiedergeben. Der Zustandsvergleich ist der Vergleich dieses Istzustands mit einem vorgegebenen Sollzustand. Dieser Sollzustand wird je nach betrachtetem Parameter durch die bei der Maschinenabnahme festgestellten Maschinendaten unter Berücksichtigung umweltbedingter Veränderungen beschrieben oder durch vorgegebene prozess-, werkstück- und werkzeugabhängige Größen definiert.

Der Zustandsvergleich erfüllt zwei Hauptaufgaben. Diese sind zum einen die Überprüfung von Grenzwerten und Trends und zum anderen die Kontrolle zeitlicher Abläufe. Eine Grenzwertüberprüfung kann dabei sowohl die Überprüfung auf Einhaltung eines minimalen oder maximalen Wertes als auch die Überprüfung auf Einhaltung von Toleranzen – sogenannten erlaubten Bändern – sein. Als Grenzwerte kommen eine Vielzahl von Betriebsparametern der Maschine in Betracht, wie z. B. Temperaturen, Kräfte, Drücke, Wege, Werkstückmaße, Schaltzeiten usw., ihr Über- oder Unterschreiten lässt Rückschlüsse auf Fehler zu. Das Ergebnis des Zustandsvergleichs sind die „Symptome“, die als Eingangsgrößen für die eigentliche Diagnose dienen. Mit Hilfe der Diagnose ist es möglich, die Funktion und Qualität der am Fertigungsprozess beteiligten Komponenten sicherzustellen. Die Diagnose wertet die Ergebnisse des Zustandsvergleichs aus, lokalisiert den Fehlerort und ermittelt die Fehlerursache. Das Ergebnis der Diagnose ist eine gezielte Aussage über Fehlerort und Fehlerursache. Eine systematische, durch entsprechende Hilfsmittel, wie z. B. Fehlerbäume, unterstützte Diagnose kann den Fehlersuchaufwand reduzieren. Darüber hinaus ermöglicht eine Diagnose das frühzeitige Erkennen eines Fehlers sowie dessen Ursache, wodurch auftretende Abweichungen über einen maschineninternen Regelkreis kompensiert werden können. Ebenso können rechtzeitig erkannte, notwendig werdende Reparaturen (d. h. störungsbedingte Instandhaltung oder Instandsetzung) gezielt angegangen sowie Ersatzteilbestellungen und andere organisatorische Maßnahmen frühzeitig eingeleitet werden. Die als Fehlerfolge auftretenden Ausfallzeiten und die damit

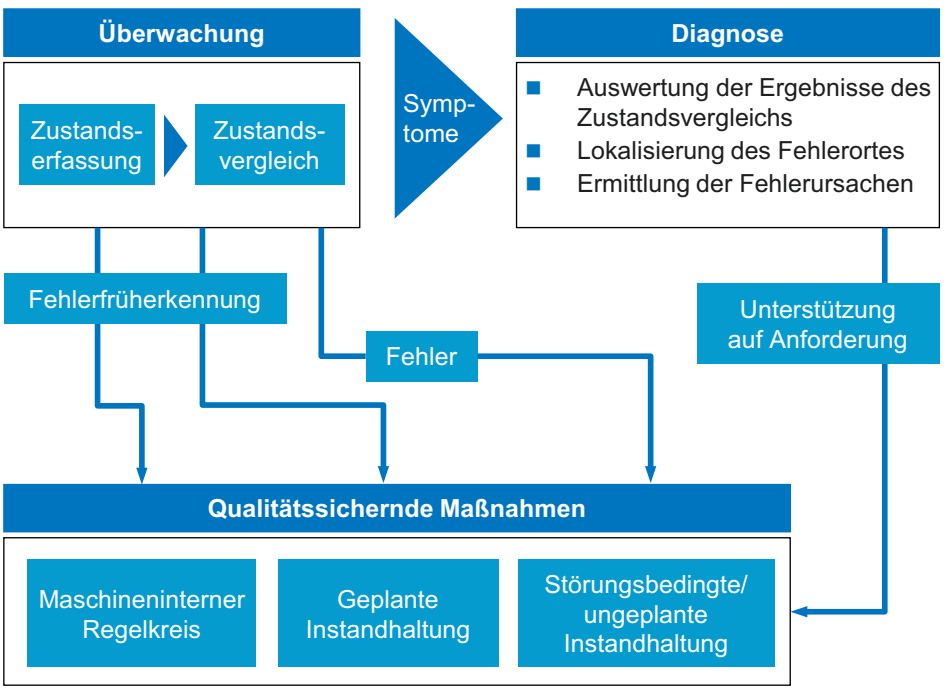
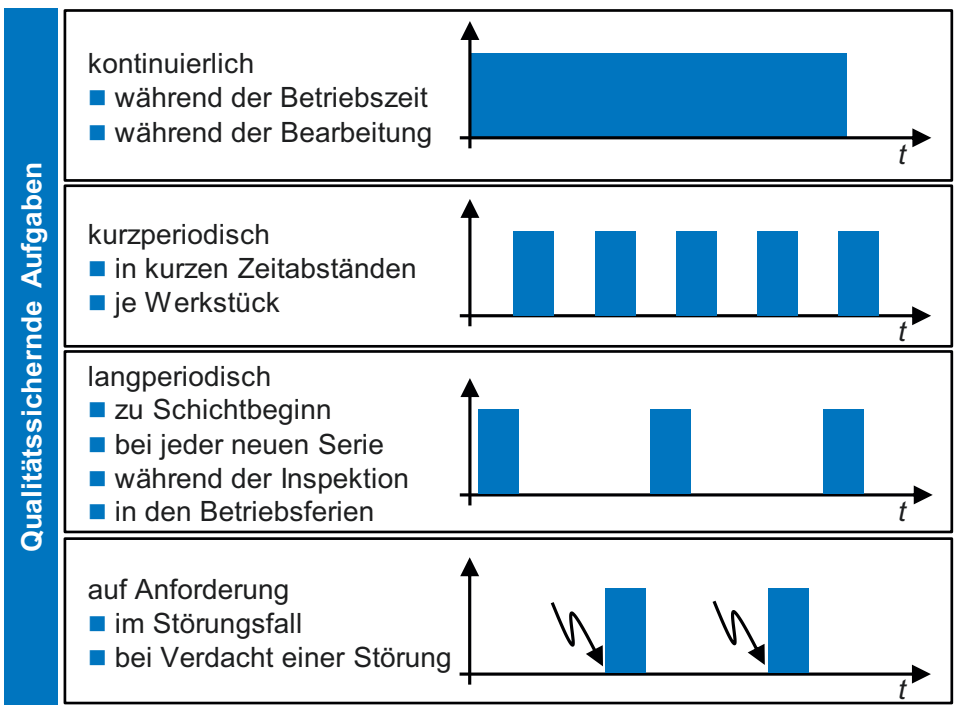


Bild 6.2 Aufgaben und Maßnahmen im Umfeld der Fertigung aus Sicht der Qualitätssicherung

verbundenen Kosten können so gesenkt werden. Trendauswertungen ermöglichen es darüber hinaus, Fehler schon in ihrer Entwicklung zu erkennen und zu beseitigen.

Diese qualitätssichernden Aufgaben, in [SSBA99] als Qualitätsregelung und Fehlerbehandlung in der Qualitätssicherung bezeichnet, können direkt oder indirekt ausgeführt werden. Das heißt, Maschinen- und Überwachungsparameter werden einerseits zeitlich und örtlich direkt oder indirekt über die Auswirkung auf messbare Größen ausgewertet [INDR97]. Letzteres ist beispielsweise bei der Verschleißüberwachung mit Hilfe von Kraftsignalen der Fall. Zum qualitativ sicheren Betrieb, der sich an der in [SSBA99; SIEM98] beschriebenen „Total-Quality-Management"-Philosophie (TQM) orientiert, sind zusätzlich geplante Wartungs- und Inspektionsmaßnahmen vorzusehen, die z. B. während Pausenzeiten (Schichtwechsel, Urlaub) ausgeführt werden können. Die Zuverlässigkeit von Maschinen und Fertigungsprozess wird nicht nur von den qualitätssichernden Aufgaben und Maßnahmen selbst, sondern auch entscheidend von deren zeitlichen Prüfkriterien Häufigkeit und Ausführungszeitpunkt beeinflusst. Deshalb muss ein Zeitraster abhängig von der gewünschten Produkt- und Prozessgüte und den eingesetzten qualitätssichernden Einrichtungen im Vorfeld der Produktion festgelegt und während des Herstellungsprozesses beibehalten werden. Eine beispielhafte Einordnung ist im ◘ Bild 6.3 dargestellt.

Einerseits gibt es qualitätssichernde Aufgaben und Maßnahmen, die kontinuierlich, z. B. während der gesamten Betriebszeit der Maschine oder während einer Bearbeitung, durchgeführt werden müssen. Die Temperatur gefährdeter, schnelllaufender Arbeitsspindelsysteme muss beispielsweise während der gesamten Betriebszeit der Maschine überwacht werden. Dagegen wird die Schnittkraft sowie der Verschleiß von Werkzeugen sinnvollerweise nur während der Bearbeitung überwacht und bei Bedarf geregelt. Andererseits gibt es Parameter, die periodisch überwacht werden müssen. Ein einfaches Beispiel dafür ist die Zentralschmierung. In Zeitabständen von einigen Minuten kommt bei Bedarf ein Schmierimpuls. Während dieses Schmierimpulses müssen die Höhe des dabei auftretenden Drucks und der Schmiermitteldurchsatz überwacht werden. Andere Überwachungsaufgaben, z. B. Messaufgaben, werden nur einmal je Werkstück durchgeführt. Die Überwachung des Spannweges erfolgt z. B. nur einmal beim Spannen eines jeden Werkstücks. Neben diesen kurzperiodischen gibt es auch langperiodische qualitätssichernde Aufgaben, die nur einmal je Schicht oder vor Beginn einer neuen Werkstückserie notwendig sind. Zu langperiodischen Aufgaben und Maßnahmen in größeren Zeitabständen zählen alle diejenigen, die nur während einer Inspektion oder in den Betriebsferien erforderlich sind (Wartung). Dazu gehören vor allem die Überprüfung geometrischer, kinematischer und dynamischer Maschineneigenschaften, die sich verschleißbedingt nur sehr langsam ändern und deren Erfassung einen erheblichen Messaufwand erfordert. Als Letztes sind noch die sporadisch anfallenden qualitätssichernden Aufgaben, wie z. B. die durch eine aufgetretene Störung an der Maschine ausgelösten manuellen oder teilautomatisierten Fehlerbehandlungsmaßnahmen, zu nennen. Als Störungen gelten in diesem Zusammenhang auch Maschinenschäden, die z. B. durch einen Crash oder die Verwendung von falschen Werkzeugen hervorgerufen werden und größere Reparaturen an der Maschine erfordern.



◘ **Bild 6.3** Zeitliche Einordnung qualitätssichernder Aufgaben und Maßnahmen

6.1.2 Wirtschaftliche Bedeutung von Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Instandhaltungsmaßnahmen

Vor allem wenn es gilt, die Produktivität der Fertigung, unter anderem durch Einsatz von Fertigungseinrichtungen in Schichten mit reduziertem Bedienungspersonal, zu steigern, ist es wichtig, bei der Auslegung der qualitätssteigernden Maßnahmen außer der technischen Realisierbarkeit auch die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Lösung zu berücksichtigen.

Eine gezielte Entwicklung von Überwachungs-, Regelungs-, Diagnose- und Instandhaltungssystemen erfordert detaillierte Kenntnisse über die Abweichungen und Störungen, deren Ursachen und mögliche Auswirkungen. Dabei ist es im Hinblick auf eine Produktivitätssteigerung wichtig, sich besonders auf Störungen und deren Ursachen zu konzentrieren, die den größten Fertigungsausfall und die höchsten Folgekosten mit sich bringen.

6.1.3 Einflussgrößen auf die Funktion der Fertigungsmittel und die Qualität der Produkte

Alle Lösungen der Funktions- und Qualitätsüberwachung setzen ebenso wie mögliche konstruktive oder organisatorische Lösungen eine weitgehende Kenntnis der möglichen Einflussgrößen auf die Funktion des Fertigungsmittels und die Qualität der Produkte voraus. Einen Überblick über mögliche Einflussgrößen gibt Bild 6.4.

Funktionsstörungen des Fertigungsmittels und ein Qualitätsmangel am gefertigten Werkstück haben ihren Ursprung in Fehlern, die an verschiedenen am Fertigungsprozess beteiligten Komponenten auftreten können. Dazu gehören auf der einen Seite die elektrischen Komponenten, wie die Steuerung, Antriebe inklusive Regelung und die Messsysteme. Zu den hier möglichen Fehlern zählen Bauteilausfälle, Lesefehler oder auf der Antriebsseite Änderungen der Reglereinstellungen, welche zu einer Verschlechterung der Antriebsdynamik führen können. Bei den Messsystemen kann der Fehler in einer Verschmutzung oder Dejustage der Maßstäbe liegen. Auf der anderen Seite sind die Fehler an den mechanischen Komponenten des Fertigungsmittels zu berücksichtigen. Fehler an den Übertragungselementen machen sich beispielsweise durch ein ungleichmäßiges Spannen des Werkzeugs oder des Werkstücks, eine ungenaue Ausrichtung des Spindelkastens nach einer Kollision oder ein zu großes Umkehrspiel in einer Bearbeitungsachse bemerkbar [BEUC89].

Eine wesentliche Fehlerursache ist der Mensch selbst, der aufgrund von Unachtsamkeiten möglicherweise falsche Schnittdaten in die Steuerung eingibt oder durch einen allgemeinen Bedienungsfehler eine Kollision verursacht. Die

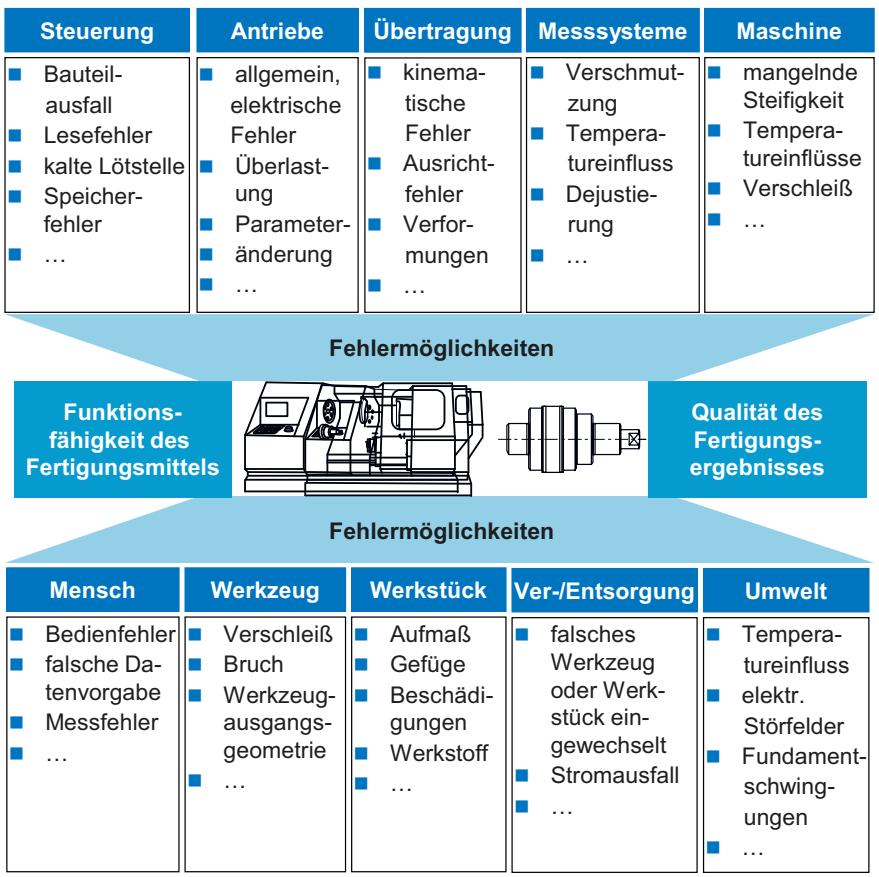


Bild 6.4 Einflussgrößen auf die Funktion der Fertigungsmittel und die Qualität der Produkte

dabei auftretenden Schäden und die damit verbundenen Maschinenstillstandszeiten und Kosten sind oft erheblich, sodass automatische Überwachungseinrichtungen eingesetzt werden, die Werkzeug- und Werkstückposition erkennen und Kollisionen vermeiden helfen (vgl. ▶ Kap. 6.3.6). Geeignete Prozessüberwachungseinrichtungen ermöglichen es darüber hinaus auch, Fehlereinflüsse zu verringern oder zu vermeiden, die beispielsweise durch Werkzeugverschleiß oder -bruch sowie Aufmaße und fehlerhafte Werkstoffzusammensetzungen des Werkstücks verursacht werden (vgl. ▶ Kap. 6.3).

6.1.4 Strategien und Struktur von Überwachungssystemen

Die Komplexität von Prozessen und Maschinen führt zu einer Vielzahl von Überwachungsaufgaben und Problemstellungen. Viele Anwendungen sind deshalb für spezielle Technologien oder Aufgaben entwickelt (vgl. ▶ Kap. 6.3).

In ▶ Kap. 6.1.4.1 wird gezeigt, welche Punkte beim Entwickeln einer Strategie für eine konkrete Problemstellung berücksichtigt werden müssen.

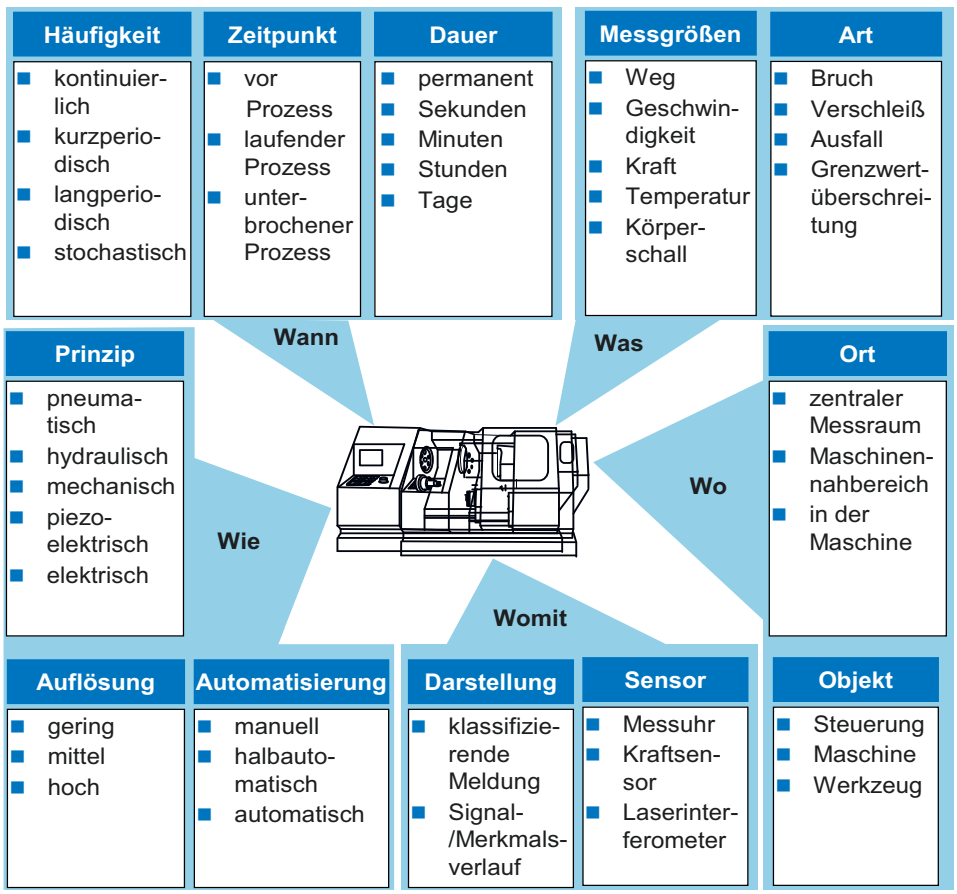
Darauf aufbauend wird in ▶ Kap. 6.1.4.2 eine Strukturierung von Überwachungssystemen vorgestellt, wie sie insbesondere im Bereich der Prozessüberwachung, aber auch für die Überwachung mechanischer Komponenten an der Maschine verwendet werden kann.

Im dritten Kapitel wird auf die funktionalen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Prozess- und Maschinenüberwachung eingegangen. Daraus ergibt sich, welche nachfolgenden Grundlagen gemeinsam und welche technologischen Spezifika getrennt diskutiert werden.

6.1.4.1 Strategien für Überwachungssysteme

Für die technisch-organisatorische Realisierung jeder Überwachungsaufgabe stehen eine Vielzahl alternativer Strategien zur Auswahl. Welche dieser Strategien dabei jeweils am günstigsten ist, hängt unter anderem vom gewünschten Automatisierungsgrad des Gesamtsystems, von der Zuverlässigkeit der Messwerterfassung sowie von den Qualitätsanforderungen des Werkstückspektrums ab. Werden diese und weitere Randbedingungen berücksichtigt, so ist es möglich, eine geeignete Überwachungsstrategie zu ermitteln, die durch eine Reihe unterschiedlichster Bestimmungsgrößen definiert wird. Diese Bestimmungsgrößen müssen dabei folgende Frage beantworten: „Was muss wann und kann wo, wie und womit überwacht werden?“ (■ Bild 6.5).

Abhängig von der Störungsart, der zu überwachenden Messgröße und der Erfassungsart stehen zeitorientierte Größen, wie Häufigkeit, Dauer und Zeitpunkt der Überwachung,



■ **Bild 6.5** Bestimmungsgrößen zur Ableitung einer Überwachungsstrategie (hier Werkzeugbruch)

im Vordergrund. Die Wirtschaftlichkeit der Überwachungsstrategie wird hingegen überwiegend vom Automatisierungsgrad, der Auflösung und dem Ort der Überwachung geprägt. Bestimmungsgrößen, deren Auswahl vorrangig unter technischen Gesichtspunkten erfolgen sollte, sind das Objekt, die Messgröße und das Prinzip der Überwachung. Die Geometrie eines Gegenstandes kann so beispielsweise optisch mit Hilfe von Kamerasystemen oder mit einfachen mechanischen Tastern ermittelt werden. Der letzte Schritt bei der Herleitung einer Überwachungsstrategie ist die Festlegung des einzusetzenden Sensors und der zugehörigen Darstellungsart auf dem Auswertesystem. Neben dem reinen Signal-/Merkmalverlauf können auch klassifizierende Meldungen dargestellt werden, die ein Störungsereignis beschreiben. Hierzu sind jedoch Schlussfolgerungsstrategien notwendig (vgl. ▶ Kap. 6.2.4).

Für jeden Anwendungsfall kommen je nach Ausprägung der Randbedingungen unterschiedliche Strategien in Betracht. Eine mögliche Lösung des Problems der Werkzeugbrucherkennung, welche unter der Zielsetzung unbeaufsichtigt ablaufender Fertigungsprozesse als eine zentrale Aufgabe anzusehen ist, wird ebenfalls im ◘ Bild 6.5 dargestellt. Sie wird im Wesentlichen charakterisiert durch:

- eine permanente Überwachung während der laufenden Bearbeitung,
- eine kontinuierliche Messwertaufnahme,
- eine damit verbundene, vernachlässigbar kurze Erfassungsdauer je Messwert [GEOR98] sowie
- eine sichere Korrelation von Messgröße und Verschleißwert.

Andere Systeme, die z. B. auf Taster zurückgreifen, können den Zustand des Werkzeugs nur während der Prozesspausen erfassen und benötigen teilweise einige Sekunden zur Messdatenerfassung und -verarbeitung [HENN99]. Allgemeine, technische Voraussetzungen für Überwachungsstrategien werden anhand der einsetzbaren Sensoren, der Signalverarbeitung und der Mustererkennung im ▶ Kap. 6.2 beschrieben. Daran anschließend erfolgt im ▶ Kap. 6.3 die Erläuterung verschiedener Verfahren zur Prozessüberwachung und -regelung bei ausgewählten Fertigungsverfahren sowie der Kollisionsüberwachung im ▶ Kap. 6.3.6.

6.1.4.2 Die Struktur von Überwachungssystemen

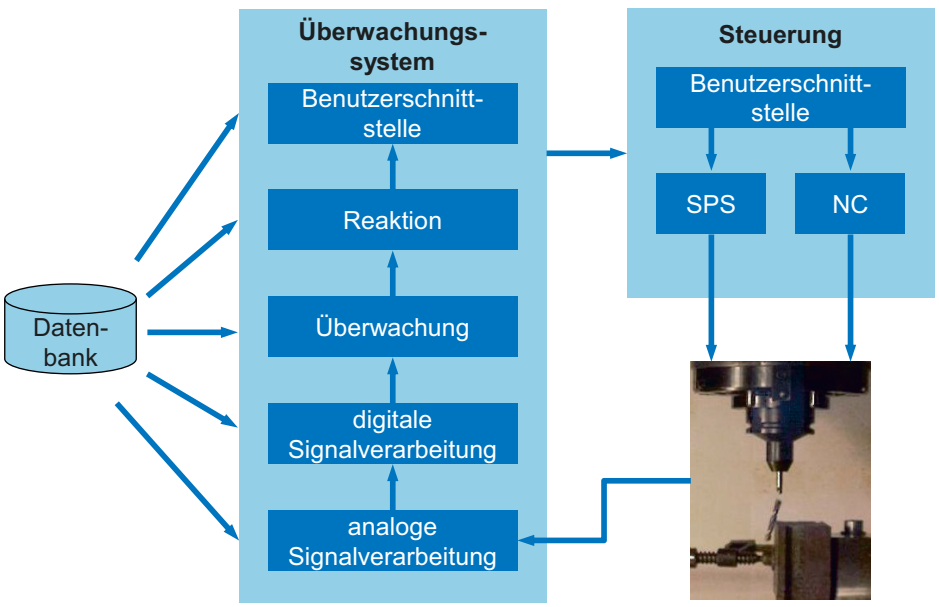
Zunächst wird ein Überwachungssystem entsprechend seiner funktionalen Aufgaben gegliedert (◘ Bild 6.6).

Der Bearbeitungsprozess bzw. das Maschinenverhalten spiegelt sich in physikalischen Größen wider, die mittels Sensoren (vgl. ▶ Kap. 6.1.4.4) erfasst und als Signale analog und nach Wandlung digital weiterverarbeitet (vgl. ▶ Kap. 6.2) werden.

Aufbauend auf diesen digitalen Signalen können die Informationen klassifiziert werden, um das Verhalten des Prozesses bzw. der Maschine zu beurteilen (▶ Kap. 6.2.4). Entsprechend dieser Klassifikation kann anschließend eine geeignete Reaktion eingeleitet werden.

Für die einzelnen Schritte dieser Signalverarbeitungskette gibt es verschiedene Vorgehensweisen und Verfahren, die in den folgenden Kapiteln genauer vorgestellt werden. Die konkrete Auswahl der geeigneten Verfahren hängt jedoch direkt mit der spezifischen Anwendung zusammen. Für den Bereich der Prozessüberwachung werden verschiedene Ansätze in ▶ Kap. 6.3 vorgestellt. Weitere Verfahren für die Maschinenüberwachung sind in ▶ Kap. 6.5 dargestellt.

◘ Bild 6.6 zeigt auch die Module, die für den Aufbau eines Überwachungssystems erforderlich sind. Danach lässt sich ein Überwachungssystem in drei Module unterteilen:



◘ **Bild 6.6** Informationsfluss und Komponenten von Überwachungssystemen

- Sensormodul,
- Überwachungsmodul und
- Bedieneinheit.

Grundsätzlich wird man immer versuchen, den Sensor möglichst nah am zu überwachenden Objekt (Prozess oder Maschinenkomponente) zu montieren. Dies ist jedoch in der Regel mit einem hohen Aufwand verbunden, sodass man in der Praxis einen Kompromiss zwischen Signalqualität und Integrationsaufwand finden muss. Die einzelnen Sensorsysteme werden ausführlich in ▶ Kap. 9, Band 2 behandelt.

In den Überwachungsmodulen werden die vorverarbeiteten Signale ausgewertet. Der Informationsaustausch zwischen Überwachungssystem und Maschinensteuerung erfolgt im Allgemeinen über die SPS. Das Überwachungssystem wird mit dem Bearbeitungsablauf synchronisiert, indem z. B. Triggersignale für Bearbeitungsbeginn und Bearbeitungsende sowie werkzeugspezifische Überwachungsparameter übertragen werden. In der anderen Richtung werden Störungsmeldungen des Überwachungssystems an die Maschinensteuerung über die Eingänge der SPS übertragen. Die Überwachung kann ebenfalls in dem Echtzeitteil der NC-Steuerung realisiert werden, wenn hier eine entsprechende Offenheit vorliegt [ECKH93]. Die internen Signale können hier mit der Zykluszeit der NC verarbeitet werden. Die Auswertung der Signale belastet in diesem Fall die NC. Dies kann z. B. bei Maschinen mit sehr vielen Achsen dazu führen, dass die Zykluszeit der NC vergrößert werden muss.

Aufgrund des hohen Verbreitungsgrades PC-basierter Benutzerschnittstellen bei Maschinensteuerungen lässt sich insbesondere die Bedieneinheit des Überwachungssystems heutzutage in zunehmendem Maße in die Steuerung integrieren.

6.1.4.3 Zusammenhang und Abgrenzung zwischen Prozessüberwachung und Maschinendiagnose

Ziel der Überwachung ist es im Allgemeinen, das Verhalten des Objektes zu beurteilen, das überwacht werden soll.

Die Prozessüberwachung fokussiert dabei auf den Bearbeitungsprozess. Das kann sowohl geometrische Aspekte als auch technologische Aspekte betreffen. Herausragendes Anwendungsbeispiel ist hierbei die Werkzeugüberwachung, bei der Schäden am Werkzeug erkannt werden, um Folgeschäden im weiteren Prozessverlauf zu vermeiden.

Die Maschinenüberwachung hat den Schutz der Maschine und ihrer einzelnen Komponenten zum Ziel. Dadurch werden die durch die Maschine ermöglichte Fertigungsqualität sowie die Verfügbarkeit der Maschine gesichert.

Grundsätzlich ähneln sich Werkzeuge und Strategien in beiden Anwendungsfeldern in vielen Bereichen. So können für beide Bereiche häufig gleiche Sensorprinzipien eingesetzt werden. Auch ähneln sich die Ansätze und Problemstellungen für die Signalverarbeitung und die Überwachungsstrategien. Aus diesem Grund werden die grundsätzlichen Prinzipien in den nachfolgenden Kapiteln gemeinsam behandelt (▶ Kap. 6.2).

Jedoch bestehen in den spezifischen Anforderungen an Sensorik, Elektronik und Algorithmik quantitative Unterschiede. So ist beispielsweise für die Sensorik von entscheidender Bedeutung, an welcher Stelle der Sensor zur Erfassung der signifikanten Größen platziert wird. Man wird immer versuchen, die Sensorik nahe am zu überwachenden Objekt, also dem Prozess oder der Maschinenkomponente, zu applizieren, da die Komponenten, die zwischen dem Überwachungsobjekt und der Sensorik liegen, immer eine Übertragungsstrecke darstellen.

Prinzipiell ist es möglich, die Eigenschaften der Übertragungsstrecke mit einer gewissen Genauigkeit zu identifizieren und entsprechende Korrekturen am erfassten Signal durchzuführen. Somit kann bei der Prozessüberwachung im Rahmen der Genauigkeit dieser Signalkorrektur vom Sensorsignal auf die interessierende Prozessgröße geschlossen werden. Jedoch stellt diese Übertragungsstrecke auch eine physikalische Begrenzung der Signalqualität dar, sodass nicht jedes Ereignis überwacht werden kann. Kritische Anwendungsfälle sind beispielsweise die Bruchüberwachung kleiner Bohrer, da hier das Prozesssignal im Verhältnis zur Signaldämpfung durch die Übertragungsstrecke zu gering sein kann.

Bei der Maschinenüberwachung ist die Signalquelle das Verhalten der Maschinenstruktur. Dieses stellt bei der Prozessüberwachung als Übertragungsstrecke zwischen Prozesssignal und Sensor eine Störung dar. Finden in der Maschinenstruktur Eigenschaftsänderungen statt, wie sie beispielsweise durch Verschleiß oder beschädigte Bauteile auftreten können, so stellen diese für die Maschinenüberwachung ein zu erkennendes Ereignis dar. Für die Prozessüberwachung hingegen führen sie zu einem Fehler in der zuvor fixierten Signalkorrektur.

Jedoch sind bei der Maschinenüberwachung die zu erkennenden Änderungen häufig so gering, dass eine sichere Überwachung der kritischen Ereignisse schwierig ist.

An dieser Stelle muss die Anregung des zu überwachenden Objektes etwas genauer betrachtet werden. Bei der Prozessüberwachung wird, im Wesentlichen durch die Spanbildung bzw. Verformung des Werkstückes bedingt, das System Werkzeug-Maschine angeregt. Die Signale dieser Anregung können dann durch die Sensorik erfasst werden. Dem gegenüber sind diese prozessbedingten Signale für die Maschinenüberwachung durch ihre Signaldominanz und stochastische Art als Störung aufzufassen, sodass hier eine Anregung der Maschinenstruktur zur Systemidentifikation außerhalb des Prozesses erfolgen muss. Hier liegt ein signifikanter Teil der Qualität der Signale in der geeigneten Anregung der zu überwachenden Komponente bzw. Struktur begründet.

Schließlich ist auch bei der Sensorik nach dem konkreten Einsatzfall zu unterscheiden. Anforderungen an Signal-

Bild 6.7 Gemeinsamkeiten und Abgrenzung zwischen Prozess- und Maschinenüberwachung

Unterscheidungskriterium	Prozessüberwachung	Maschinenüberwachung
Sensorprinzip	in weiten Bereichen ähnliche Prinzipien einsetzbar	
Sensorkenngrößen	Abtastrate, Signal-Rauschabstand etc. unterschiedlich	
Überwachungsstrategie	Strategien können gleich sein, meist sind sie jedoch anwendungsspezifisch	
Übertragungsverhalten der Maschinenstruktur	stört die Signalgüte bei der Überwachung, Kompensation möglich	Überwachungsobjekt
Systemanregung	erfolgt „automatisch“ durch den Prozess	gezielte Systemanregung kann zur geeigneten Signalgenerierung genutzt werden
Bearbeitungsprozess	Überwachungsobjekt	stört die Überwachung

Rauschabstand, Abtastraten etc., die für das Sensorsystem charakterisierend sind, sind für die spezifische Anwendung unterschiedlich. Sie sind insbesondere von der gewählten Überwachungsstrategie abhängig. Beispiele hierzu werden in ► Kap. 6.3 vorgestellt. Zusammenfassend ist dies in Bild 6.7 dargestellt.

6.1.4.4 Mechanische und optische Sensoren

Für die Prozess- und Werkzeugüberwachung werden als mechanische Sensoren hauptsächlich Taster verwendet, mit denen ein Antasten und damit in Verbindung mit den Wegmesssystemen eine Bestimmung der Werkzeuggeometrie möglich ist. Hochgenau arbeitende Taster werden auch zur Kontrolle der Werkstückgeometrie innerhalb des Arbeitsraumes der Maschine genutzt. Dazu wird der Messtaster anstelle eines Werkzeuges eingewechselt und damit z. B. der Durchmesser einer Bohrung abgetastet. Die Kommunikation des Tasters mit der Maschinensteuerung kann beispielsweise über eine Infrarotstrecke erfolgen.

Als optische Sensoren kommen Lichtschrankensysteme zum Einsatz, die wie schaltende Messtaster eingesetzt werden. Der Schaltpunkt ist dabei aber ungenauer als bei entsprechenden mechanischen Tastern. Eine ein- oder zweidimensionale Bilderfassung ist mit Hilfe von Photodiodenarrays möglich, die auf einer Linie bzw. auf einer Fläche verteilt sind. Einige Anwendungsbeispiele zum Einsatz mechanischer und optischer Sensoren in der Werkzeugüberwachung sind im ► Kap. 6.3.3.1 aufgeführt.

6.1.4.5 Steuerungsinterne Informationen

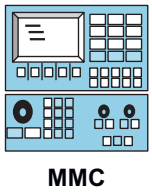
Steuerungsintern stehen die Moment- bzw. die Stromwerte bei Drehstromvorschubmotoren und meistens auch bei Spindelantrieben zur Verfügung, da diese mit einem unterlagerten Drehmomentregelkreis geregelt werden (► Kap. 3). Hat man Zugang zu den internen Werten, beispielsweise durch den Einsatz offener Steuerungen (► Kap. 6.2.6, Band 4), können die zu deren Erfassung erforderlichen Sensoren entfallen. Dies hat insbesondere dann Vorteile, wenn alle Achsen eines Systems überwacht werden sollen, da hierbei der Mehrfachaufwand für die Sensorik entfällt. Dabei besteht jedoch eine hohe Abhängigkeit von der Offenheit der Steuerung und der Signalqualität, die vom Steuerungshersteller an der offenen Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird. Die standardmäßig vorhandenen Diagnose- und Inbetriebnahmeschnittstellen sind in der Regel auf die notwendigen Funktionen eingeschränkt.

Neben diesen Antriebssignalen stehen in der Steuerung auch noch weitere Informationen des Bearbeitungsprozesses und Signale aus dem NC-Programmablauf zur Verfügung (Bild 6.8).

In der Steuerung sind alle Informationen zum Synchronisieren der Überwachung mit dem Bearbeitungsablauf, wie Triggersignale für Bearbeitungsbeginn und Bearbeitungsende und Werkzeug- und Schneideninformationen vorhanden, ohne dass NC- oder PLC-Programme verändert werden müssen. Weiter stehen Lage, Geschwindigkeits- und Beschleunigungssoll- und -istwerte zur Verfügung, die dazu genutzt werden können, die Einflüsse der mechanischen Übertragungsstrecke zu kompensieren (► Kap. 6.2).

Nachfolgend werden kurz zwei Systeme vorgestellt, die auf Basis der Sinumerik 840D Steuerung der Firma Siemens entwickelt wurden. Bei dieser Steuerung wurden sowohl anwenderspezifische Erweiterungen im echtzeitfähigen Teil der Steuerung (NC-Kern, NCK) als auch im Bedienbereich der Steuerung integriert.

In Zusammenarbeit zwischen den Firmen Artis und Siemens wurde ein System entwickelt, das es ermöglicht, die Strom- und Drehmomentwerte extern auszuwerten



Signale des Bearbeitungsprozesses

- Bewegungssignale, z. B. Lage, Drehzahl, Geschwindigkeit
- Leistungsindikatoren, z. B. Wirkleistung, Antriebsauslastung
- sonstige Reglergrößen, z. B. Reglerdifferenz, Schleppabstand

Signale aus dem NC-Programmablauf

- Hilfsfunktionen und M-Befehle
- Informationen zum aktuellen Werkzeug
- die aktuelle NC-Betriebsart (Hand-, Halbautomatik-, Automatikbetrieb)
- Ereignisse im Programmablauf bzw. bei der Bedienung, z. B. NC Start, Stopp, Reset
- Lage-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungssollwerte

Bild 6.8 Steuerungsinterne Informationen

[ETEL95], Bild 6.9 links. Bei diesem System werden die Strom- und Drehmomentwerte über die PLC bzw. den PLC-Bus dem externen Überwachungssystem zur Verfügung gestellt. Die Auflösung der Signale ist durch die in der NC verfügbaren Genauigkeit gegeben. Der Bustakt (ca. 12 ms), und damit die Frequenz der Signale, richten sich nach der möglichen zusätzlichen Belastung der PLC.

Ein vollständig steuerungsintegriertes Überwachungssystem wurde am Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der RWTH Aachen (WZL) in Zusammenarbeit mit den Firmen Siemens und dem Werkzeugmaschinenhersteller Chiron entwickelt. Bei diesem System sind alle Funktionen des Überwachungssystems in die Steuerung einer Werkzeugmaschine integriert, Bild 6.9 rechts. Als Sensorik wurden nur steuerungsinterne Signale verwendet. Die Signalvorverarbeitung, eine Kompensation von Beschleunigungs- und Reibungseffekten, und die Überwachungsalgorithmen werden im NC-Kern der Steuerung durchgeführt. Sensorsignale und Algorithmen werden im Lagereglertakt der Steuerung ausgeführt (ca. 2 bis 4 ms). Zur Konfiguration und Parametrierung des Überwachungssystems wurde die steuerungseigene Benutzerschnittstelle erweitert [ECKH93]. Jedoch wird durch die Berechnungen im Echtzeitteil der Steuerung die NC belastet. Komplexe, um-

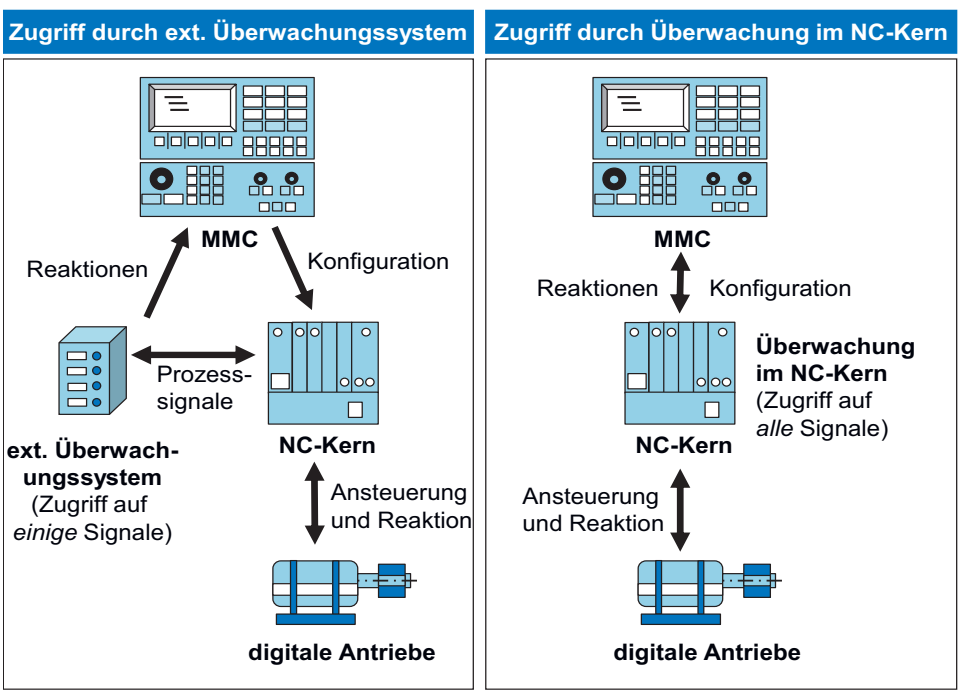


Bild 6.9 Zugriffsmöglichkeiten auf steuerungsinterne Funktionen

fangreiche Berechnungen müssen somit im nicht-echtzeitfähigen Teil der Steuerung ausgeführt werden, um die Funktionseigenschaften der NC nicht negativ zu beeinflussen.

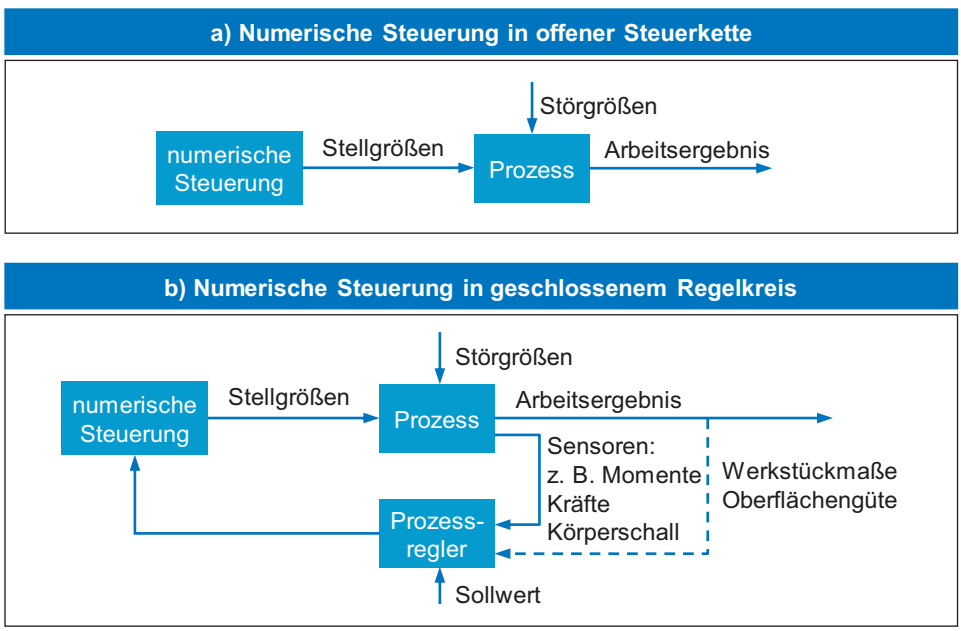
6.1.5 Prinzipien der Prozessregelung

Die Prozessregelung hat das Ziel, die Prozessführung zu optimieren. Bei der statistischen Prozessregelung werden in periodischen Abständen Werkstücke vermessen und mit den Ergebnissen systematische Fehler durch Verschleiß und thermische Drift der Maschine ausgeglichen (vgl. ► Kap. 6.4). Die meisten Bearbeitungsprozesse unterliegen jedoch stochastischen Störeinflüssen wie Materialabweichungen und Werkzeugqualitätsschwankungen. Man kann daher nicht genau voraussagen, wie der Prozess verläuft, ob die Werkzeuge und die Maschine nicht überlastet werden oder ob sich der Werkzeugverschleiß wie vorausberechnet einstellt. Um die Maschinen und Werkzeuge nicht zu überlasten, werden Maschineneinstellungen gewählt, die auf der „sicheren Seite" liegen, sodass auch im ungünstigen Fall ein ordnungsgemäßer Prozessablauf gewährleistet bleibt. Bei dieser auf Sicherheit gegen Maschinen- und Werkzeugüberlastung basierenden Vorgehensweise wird normalerweise die Leistungsfähigkeit von Maschine (minimale Haupt- bzw. Nebenzeiten) und Werkzeug (maximale Zerspanleistung) nicht voll ausgenutzt. Die Bearbeitung verläuft daher nicht im wünschenswerten wirtschaftlichen Optimum.

Eine Verbesserung kann mit einem maschineninternen Regelkreis erreicht werden (vgl. ► Kap. 6.3). Bei Bearbeitungszentren wird ein entsprechender Regelkreis dazu genutzt, die temperaturbedingte, relative Verlagerung zwischen Spindel und Werkstück, ausgehend von der Lagertemperatur der Frässpindel und dem Isothermenfeld, auszugleichen. Ebenfalls zu nennen sind in diesem Zusammenhang alle Regelungen, die im Rahmen von Adaptive-Control-Systemen (AC) entwickelt wurden. Durch eine Erfassung von Störgrößen und Rückführung der Prozessgrößen, das heißt durch Schließen der offenen Steuerkette aus ◘ Bild 6.10a mit einem Prozessregler zu einem geschlossenem Regelkreis gemäß ◘ Bild 6.10b, können die Qualität und die Sicherheit der Bearbeitung verbessert werden. Dazu werden die für den Prozessverlauf relevanten Kenngrößen erfasst, mit vorgegebenen Sollwerten verglichen und entsprechend der Regelabweichung die notwendigen Stellgrößen zur Konstanthaltung der Regelgrößen berechnet.

Unter dem Stichwort Adaptive Control [SCHU93; KLÖC95; RUMM92] sind in den frühen 1970er Jahren des letzten Jahrhunderts viele Systeme entwickelt worden, die verschiedene Ziele der Prozessführung und Optimierung verfolgten. Man unterscheidet hier zwischen technologischen und geometrischen AC-Systemen. Bei ersteren werden die technologischen Prozessparameter derart angepasst, dass z. B. die Maschinenleistung voll genutzt wird oder das Maß des Werkzeugverschleißes in vorgegebenen Toleranzen bleibt. Bei geometrischen AC-Systemen sind die Werkstückabmessungen oder Maschinenverformungen die Regelgrößen.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Regelgrößenvorgabe. Man spricht von Adaptive Control Constraint (ACC), wenn sich die Sollwerte an festen Grenzen, wie beispielsweise der Leistungs- oder Stabilitätsgrenze, orientieren. Unter Adaptive Control Optimization (ACO) versteht man Prozessregler, die zur Minimierung von Fertigungszeiten oder Fertigungskosten dienen.



◘ **Bild 6.10** Gegenüberstellung: Konventionelle Steuerung und Steuerung mit geschlossenem Regelkreis

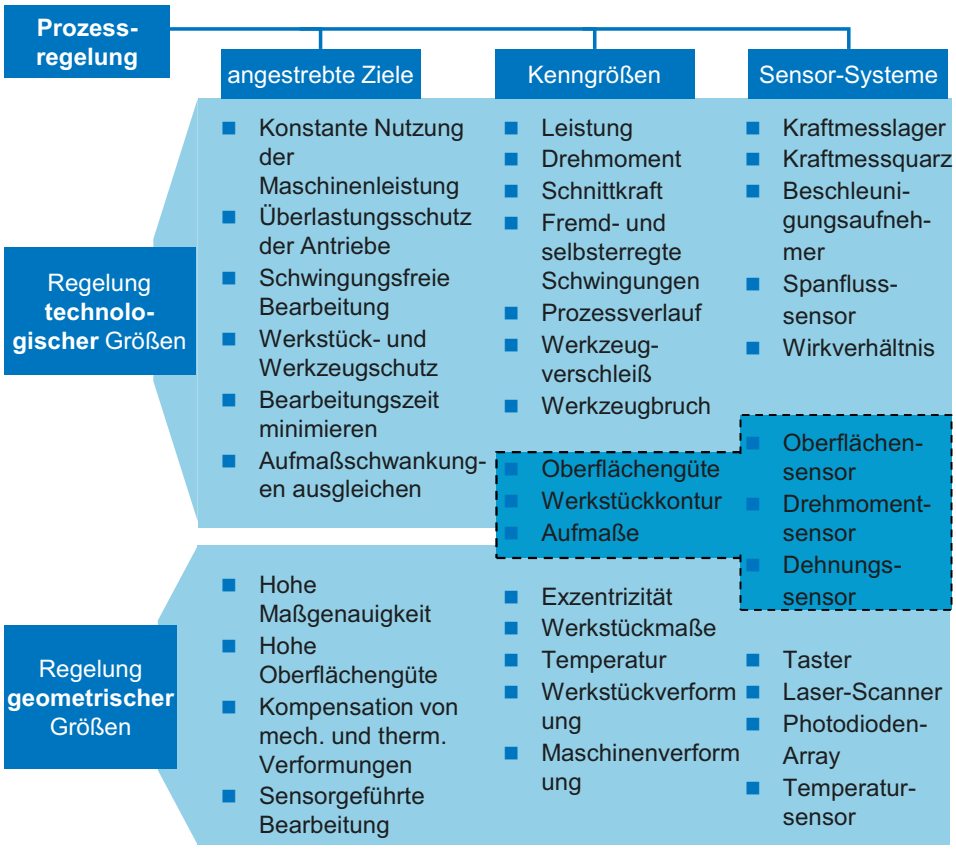


Bild 6.11 Zusätzliche Möglichkeiten bei der Prozessregelung

In Bild 6.11 sind die Ziele mit den entsprechenden Kenngrößen und erforderlichen Sensoren zusammengefasst, die mit Hilfe der Prozessregelung angestrebt werden.

6.2 Signalverarbeitung und Mustererkennung

Die zu erfassenden Prozess- oder Maschinenzustandsgrößen, wie z. B. Werkzeugverschleiß, Lagerverschleiß, Pittings auf Zahnflanken oder sich anbahnende Zahnbrüche bei Zahnradgetrieben, lassen sich im Betrieb bzw. während des Prozesses nicht direkt messen. Es kommen daher in den meisten Fällen indirekte bzw. prozessbegleitende Erfassungsverfahren zum Einsatz. Hierbei werden messbare Auswirkungen der sich ändernden Zustandsgröße z. B. in Form von Kraft-, Beschleunigungs- oder Schwingungssignaländerungen oder Größen wie Strom oder Körperschall erfasst.

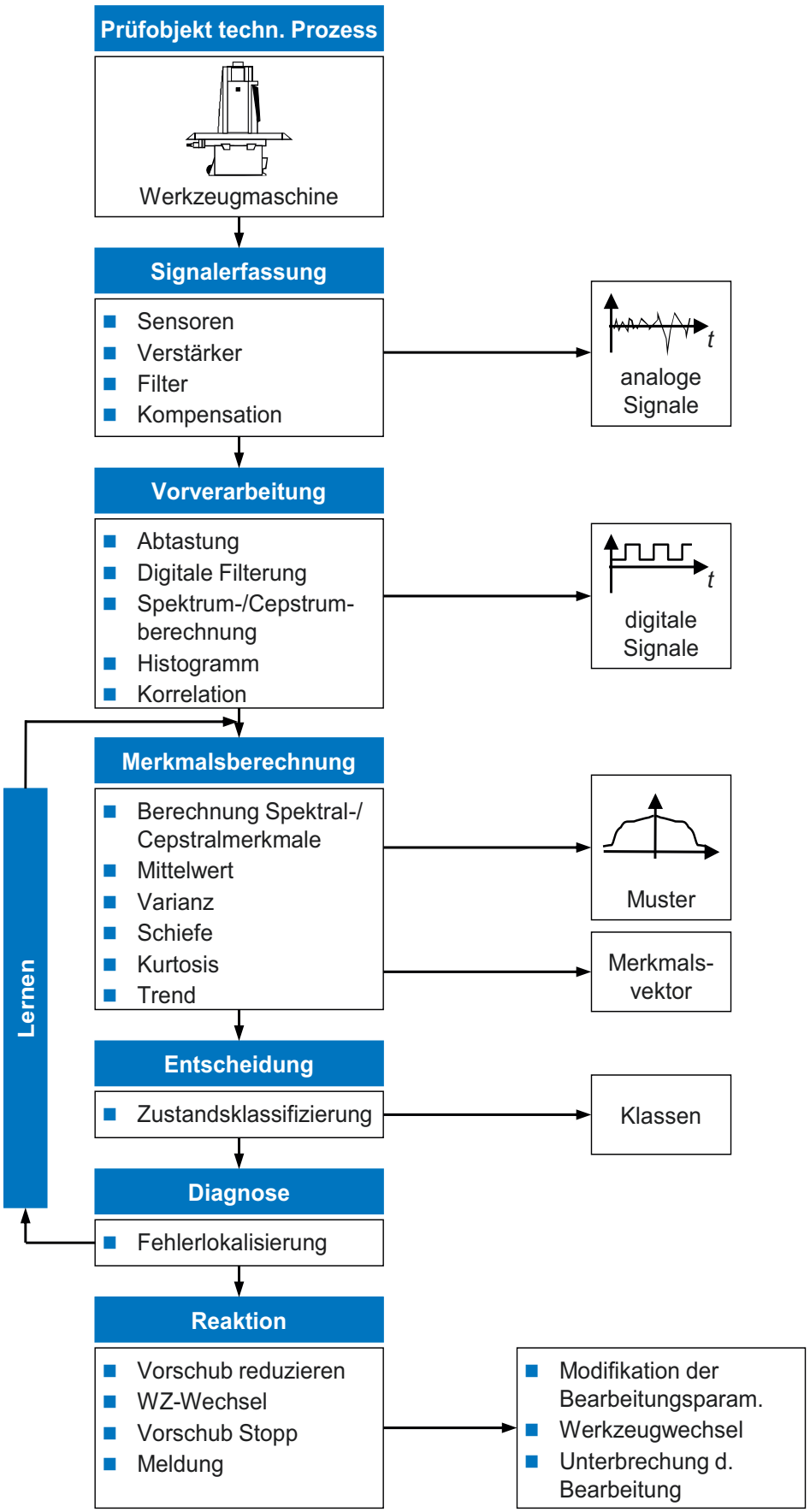
Die einzelnen Verarbeitungsschritte dieser physikalischen Größen durch ein Mustererkennungssystem für Überwachungs- und Diagnoseaufgaben sind im Bild 6.12 dargestellt [NIEM74; NIEM83] und werden nachfolgend im Einzelnen diskutiert.

Nach der Signalerfassung durch die Sensorik (vgl. ► Kap. 9, Band 2) schließt sich die Signalvorverarbeitung an. Ziel der Signalvorverarbeitung ist es, bestimmte Merkmale aus den Signalverläufen zu extrahieren, um eine sichere Aussage über den momentanen Prozess- oder Maschinenzustand machen zu können.

Da zwischen Signalquelle und Signalerfassung im Allgemeinen eine Übertragungsstrecke liegt und da die erfassten Signale immer eine Summe aus verschiedenen Signalquellen sind, ist eine analoge und digitale Signalvorverarbeitung erforderlich. Während die analoge Signalvorverarbeitung im Wesentlichen die Signale derart aufbereitet, dass durch deren Digitalisierung keine bedeutenden Fehler auftreten, dient die digitale Signalverarbeitung dazu, Signalkorrekturen durchzuführen, um aus den erfassten Signalen die für die Überwachung interessierenden Anteile zu extrahieren. Dies geschieht im Allgemeinen über entsprechende Modelle, die beispielsweise den Antriebsstrang als Übertragungsstrecke derart nachbilden, dass Motorstromsignale in entsprechende Vorschubkräfte überführt werden. Die hier zum Einsatz kommenden Modelle können je nach Aufgabenstellung verschiedene Komplexität haben (vgl. ► Kap. 6.2.2).

Durch die Merkmalsberechnung werden aus den aufbereiteten Signalen spezifische Größen ermittelt, die das zu erkennende Ereignis beschreiben. Das Finden dieser zustandsbeschreibenden Merkmale setzt detaillierte Untersuchungen über das Maß der Aussagesicherheit dieser Merkmale hin-

Bild 6.12 Überwachung und Diagnose mit den Begriffen der Mustererkennung



sichtlich der Charakterisierung der zu detektierenden Fehler voraus. Aus diesem Grund war und ist die Ermittlung geeigneter Merkmale und deren Kombination zu aussagefähigen Mustern für die verschiedenen Überwachungsaufgaben Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben.

Sind Merkmale gefunden worden, die in einem eindeutigen Zusammenhang mit dem zu diagnostizierenden Zustand stehen, so können geeignete Klassifikationsverfahren bestimmt und für die automatische Klassifikationsphase vorgegeben werden. Bei der Entscheidung werden die aufgetretenen Merkmale somit derart klassifiziert, dass sie das gewünschte Beobachtungsergebnis abbilden.

Grundsätzlich sind die Lern- oder Parametrierungsphase und die automatische Klassifikationsphase zu unterscheiden. Die Lernphase ist nötig, um geeignete Grenzwerte und andere Parameter für die spezifische Aufgabe zu ermitteln. In dieser Phase wird das Mustererkennungssystem so eingestellt, dass im Betrieb (Klassifikationsphase) eine sichere Aussage über die Maschinen- bzw. Prozesszustandsgrößen möglich ist. In der Lernphase des Systems werden aus den Stichproben von Merkmalen die Zustandsmustervektoren (Merkmalvektoren) ermittelt und mit den Prozess- oder Anlagenzuständen in Korrelation gesetzt. Als Eingangsgröße können prinzipiell alle prozess- und anlagensignifikanten Signale, wie Kraft, Moment, Schwingungen usw., herangezogen werden.

Die Parametrierung des Klassifikators erfordert oft eine langwierige, iterative Vorgehensweise. Da die Parametervielfalt kaum zu beherrschen ist, werden zurzeit überwiegend einzelne Merkmale und einfache Klassifikationsverfahren, z. B. der Vergleich eines Merkmales mit einem oder mehreren Grenzwerten, eingesetzt.

Nach Auswahl der Merkmale und Parametrierung des Klassifikators ist die Lernphase abgeschlossen.

In der Klassifikationsphase werden die ausgewählten Merkmalvektoren mit den dafür ausgelegten Verfahren Klassen zugeordnet, d. h. klassifiziert. Mögliche Klassen können z. B. „Werkzeug arbeitsscharf“ oder „Werkzeug verschlissen“ sein.

6.2.1 Analoge Signalaufbereitung

Durch die analoge Signalverarbeitung werden Störungen eliminiert und informationstragende Signalanteile so aufbereitet, dass sie möglichst unverfälscht und mit größtmöglicher Auflösung digitalisiert werden können. Das zeit- und amplituden-kontinuierliche Sensorsignal $u(t)$ wird durch die Analogdigital-Wandlung (A/D-Wandlung) in eine Folge von diskreten Werten ui umgesetzt, indem das Signal zu äquidistanten Zeitpunkten abgetastet wird. Damit durch die Digitalisierung keine Information verloren geht, muss das Abtasttheorem von Shannon erfüllt sein. Das Abtasttheorem verlangt, dass die höchste im Signal vorkommende Frequenz f_{max} kleiner als die Hälfte der Abtastfrequenz f_a ist:

$$f_{max} < \frac{1}{2} \cdot f_a \tag{6.1}$$

Das analoge Signal wird mit einer Auflösung von $2w$-Wertestufen diskretisiert. Die Wortbreite w entspricht der Anzahl Bits des erzeugten Digitalwortes. Damit durch die Diskretisierung des kontinuierlichen Signals $u(t)$ kein Informationsverlust entsteht, muss die Wortbreite w des A/D-Umsetzers so gewählt werden, dass die kleinste informationstragende Signaländerung U_{min}, meist begrenzt durch Signalrauschen, und der größte vorkommende Signalwert U_{max} erfasst werden können. Das Verhältnis

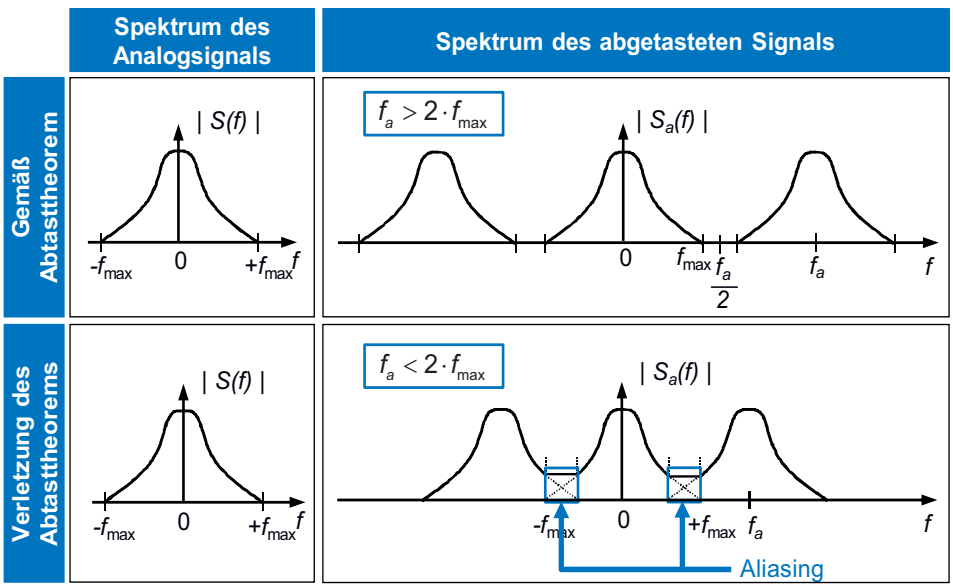


Bild 6.13 Auswirkung der Abtastung auf das Spektrum des Signals

$$D = 20 \cdot lg\left[\frac{U_{max}}{\Delta U_{min}}\right] \text{ [dB]} \tag{6.2}$$

wird als Signaldynamik bezeichnet. Um U_{min} und U_{max} und damit die volle Signaldynamik zu erfassen, muss gelten:

$$w \geq \log_2\left(10^{\frac{D}{20}}\right) \approx \frac{D}{6\text{ dB}} \tag{6.3}$$

Um diese Forderungen hinsichtlich Frequenz-Bandbreite f_{max} und Dynamik D des Signals einhalten zu können, muss das Sensorsignal vor der Abtastung tiefpassgefiltert und verstärkt werden. Die Tiefpassfilterung verhindert eine Verletzung des Abtasttheorems. Die Verstärkung ist nötig, um den Eingangsspannungsbereich des A/D-Wandlers voll auszunutzen.

Tiefpassfilterung

Durch die Abtastung des Signals verändert sich das Frequenzspektrum des Signals. Es entstehen neue Frequenzanteile im Spektrum, die sich aus einer periodischen Fortsetzung des Spektrums des analogen Signals mit der Periode f_a (Abtastfrequenz) ergeben [WECK99]. Dieser Zusammenhang ist im Bild 6.13 dargestellt.

Wie im Bild 6.13 zu erkennen ist, entsteht durch eine Abtastung mit $f_a < 2f_{max}$ eine Überlappung der gespiegelten Frequenzbänder und dadurch eine Verfälschung des Signals. Dieser Effekt wird als Aliasing bezeichnet. Der Informationsverlust durch Verletzung des Abtasttheorems kann vermieden werden, indem das analoge Signal so tiefpassgefiltert wird, dass die größte verbleibende Signalfrequenz kleiner als $f_a/2$ ist.

Reale analoge Tiefpassfilter haben allerdings eine endliche Flankensteilheit und eine begrenzte Dämpfung δ_s im Sperrbereich (Sperrdämpfung), Bild 6.14 b. Die Sperrdämpfung δ_s gibt den Pegel in dB an, um den Frequenzanteile im Sperrbereich des Filters gedämpft werden.

Um die Signalverfälschung durch Aliasing im Nutzfrequenzbereich möglichst gering zu halten, müssen Sperrdämpfung δ_s und Signaldynamik D, sowie Abtastfrequenz f_a und Sperrfrequenz f_s wie folgt gewählt werden, Bild 6.14:

$$f_a > f_g + f_s \tag{6.4}$$

f_g Grenze des Nutzfrequenzbereiches
f_s Sperrfrequenz des Tiefpass-Filters

$$\delta_s > D \tag{6.5}$$

Die Bedingung nach Gleichung (6.4) verhindert eine Signalverfälschung im Nutzfrequenzbereich aufgrund der endlichen Flankensteilheit des Filters, Bild 6.14 c.

Die Bedingung nach Gleichung (6.5) bewirkt, dass Aliasingeffekte durch die endliche Sperrdämpfung des Filters so gering gehalten werden, dass sie in der Größenordnung des Signalrauschens liegen.

Verstärkung

Die Ausgangssignale der Sensorelemente, insbesondere die der piezoelektrischen Sensoren, sind von sehr geringer Leistung und werden meist an einer hohen elektrischen Impedanz abgegriffen. Dadurch sind die Sensorsignale sehr störanfällig. Die Verstärkung des Signals vermindert zum einen dessen Störempfindlichkeit und ermöglicht zum anderen eine optimale Anpassung an den Spannungsbereich des A/D-Umsetzers und damit eine gute Auflösung des Signals.

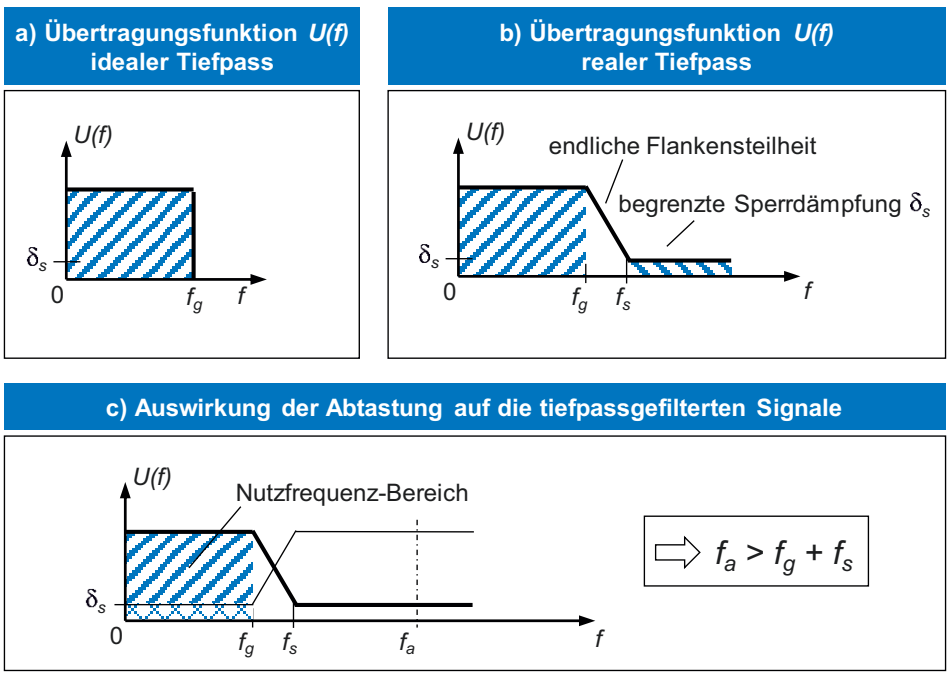


Bild 6.14 Begrenzung des Aliasing-Effektes durch Tiefpassfilterung

Analoge Signalverarbeitungskette

Zur analogen Signalverarbeitung sind folglich mindestens ein Verstärker und ein Anti-Aliasing-Tiefpassfilter erforderlich. Für Kraft-, Dehnungs- und Stromsignale ist eine Signalverstärkung mit anschließender Tiefpassfilterung ausreichend.

Die Nutzbandbreite des Signals ist hierbei abhängig von der Messgröße und der Überwachungsaufgabe.

Für die Verschleißerkennung müssen z. B. Kraft- und Dehnungssignale bis 50 Hz ausgewertet werden. Zur Brucherkennung ist dagegen eine Auswertung bis zu mehreren Kilohertz (kHz) erforderlich, da die bruch-typischen Signalspitzen sonst nicht erfasst werden können.

Analoge Signalverarbeitung bei Körperschall-Signalen

Zur analogen Verarbeitung von Körperschall-Signalen ist eine aufwendigere Signalkonditionierung erforderlich, da die relevante Information in höherfrequenten Signalanteilen enthalten ist. Das Signal wird hier zunächst hochpassgefiltert, ◘ Bild 6.15 [KÖNI92]. Dadurch können niederfrequente Störungen wie Netzbrummen, Gleichspannungsdrift oder Maschinenschwingungen, z. B. durch die Unwucht rotierender Wellen, unterdrückt werden. Diese Störungen könnten ansonsten zur Übersteuerung nachfolgender Komponenten (z. B. Verstärker, A/D-Wandler) führen. Dann wird das Signal aus den oben genannten Gründen verstärkt.

Die Bandpassfilterung dient anschließend dazu, aussagekräftige anwendungsspezifische Frequenzbänder zu selektieren. Sie liegen, je nach Anwendungsfall, im Bereich von 1 kHz bis über 1 MHz [MEYE91; SCHE91]. Diese hochfrequenten Signale würden bei einer direkten Digitalisierung eine aufwendige A/D-Umsetzung erfordern (Abtastfrequenzen bis zu 2 MHz). Bei einer direkten Abtastung würde zudem eine Datenmenge entstehen, die kaum zu handhaben ist (bis zu $2 \cdot 10^6$ Werte/s).

Deshalb wird das Signal durch Gleichrichtung und anschließende Tiefpassfilterung in ein niederfrequentes Hüllkurvensignal (50 Hz bis 4 kHz) gewandelt. Diese Art der Signalverarbeitung entspricht einer Demodulation des bandpassgefilterten Signals, wie sie auch in der Nachrichtentechnik eingesetzt wird.

Durch die Gleichrichtung wird das Frequenzband in den Frequenzbereich ab 0 Hz transformiert. Der Verlauf des so erzeugten Hüllkurvensignals enthält die überwachungsrelevante Information und wird zur Weiterverarbeitung digitalisiert.

Derart aufbereitete Körperschall-Signale werden sowohl zur Anlagen- als auch zur Prozessüberwachung eingesetzt. Es ist dadurch möglich, die aussagekräftigen, hochfrequenten Signalanteile trotz des geringen Aufwands bei A/D-Umsetzung und digitaler Signalverarbeitung zu nutzen. Durch die Transformation des relevanten Frequenzbandes in den Frequenzbereich ab 0 Hz können die erforderliche Abtastrate und die bei der Abtastung entstehende Datenmenge stark reduziert werden.

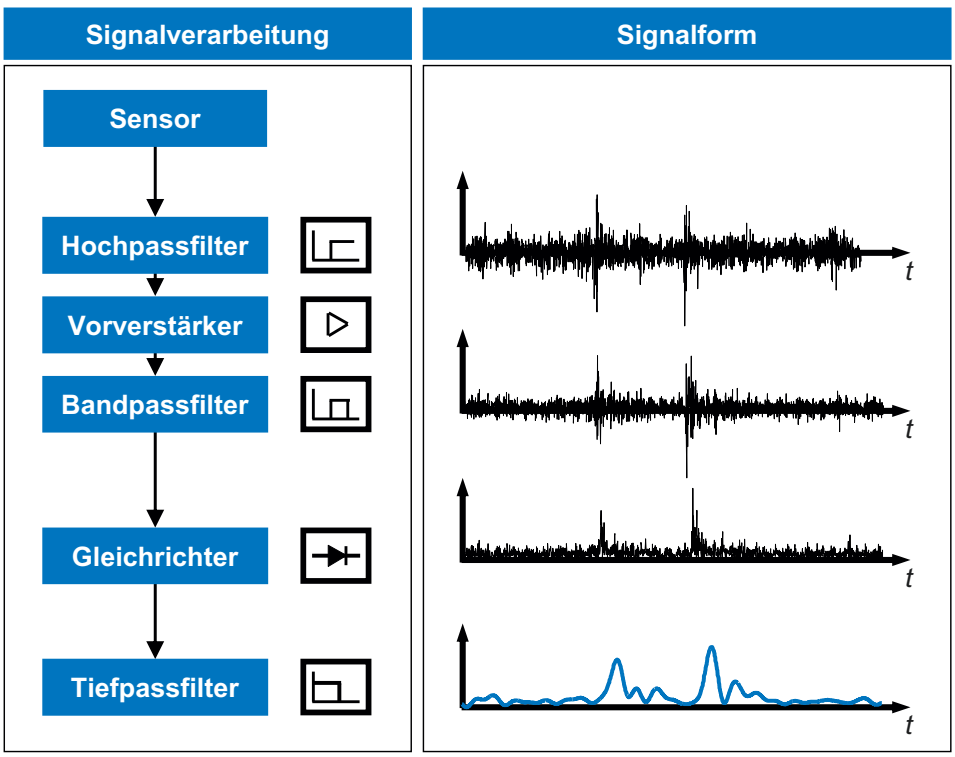


Bild 6.15 Analoge Vorverarbeitung von Körperschall-Signalen. Nach König

6.2.2 Digitale Vorverarbeitung

Die digitale Signalvorverarbeitung bereitet die erfassten Signale derart auf, dass aus ihnen durch die Merkmalsberechnung die das Beobachtungsobjekt beschreibenden Signalmerkmale extrahiert werden können.

Hierzu ist zunächst eine Signalkorrektur erforderlich, die die Störeinflüsse auf das Signal von seiner Quelle zum Sensor sowie eventuelle Einflüsse der Sensorik kompensiert.

Typische Beispiele für diese Signalkorrektur sind:

- digitale Filterung zur Unterdrückung bekannter Störfrequenzen [EX-C93],
- Mittelung zur Verringerung stochastischer Einflüsse,
- Spektralanalyse, Cepstralanalyse [STEA79],
- Ermittlung der Häufigkeitsverteilung (Histogramm) [NIEM83].

Darüber hinaus können aber auch Modelle zur Signalkorrektur herangezogen werden, die das Verhalten der Übertragungsstrecke im Detail nachbilden. Ein typischer Anwendungsfall ist hier die Nachbildung der Antriebsmechanik zwischen der Prozesswirkstelle und den Motoren.

Für eine solche Nachbildung der mechanischen Eigenschaften kommen üblicherweise Modelle auf Basis von Feder-Dämpfer-Masse zur Anwendung. Die elektrischen Komponenten (Motor, Stromrichter und Regler) werden durch bekannte regelungstechnische Ansätze nachgebildet. Ein solch hoher Detaillierungsgrad bringt jedoch einen hohen Aufwand zum einen für die Modellierung und zum anderen für die spätere Parametrierung des Modells mit sich. Für die Maschinenüberwachung kann eine solche Detaillierung sinnvoll sein, da hier insbesondere das Verhalten der einzelnen mechanischen Komponenten im Antriebsstrang interessiert und die stochastischen Einflüsse geringer sind als bei der Prozessüberwachung.

Für die Prozessüberwachung können bereits einfachere, auf Basis weniger, einfacher regelungstechnischer Übertragungsglieder (z. B. PT_1) aufbauende Modelle sinnvoll sein. Nachteil ist die geringere Genauigkeit des Modells insbesondere für höhere Frequenzen. Jedoch kann ein solches Modell schneller erstellt und parametriert werden.

Weitere regelungstechnische Ansätze zur Signalkorrektur, wie beispielsweise das Beobachterprinzip, werden hinsichtlich ihrer Eignung derzeit untersucht [FRIT99].

6.2.3 Merkmalsextraktion

Aus den vorverarbeiteten Signalen werden dann Merkmale (Kennwerte) extrahiert, die den zu überwachenden Prozess- oder Maschinenzustand beschreiben.

Zur Merkmalsfindung aus Prozess- und Maschinensignalen kommen beispielsweise folgende Signalauswertungen in Betracht [KÜHN85]:

- absolute und gewichtete Werte,
- Trends, Ableitungen der Mittelwertverläufe,
- statistische Parameter (Mittelwert, Verteilung, Häufigkeitsverteilung, Varianz, Schiefe, Kurtosis usw.) [DIN95],
- Parameter der Spektren,
- Parameter der Cepstren,
- Abweichungen von Sollwerten (Residuen).

Ein bei der Prozessüberwachung häufig verwendetes Merkmal wird im Folgenden näher beschrieben.

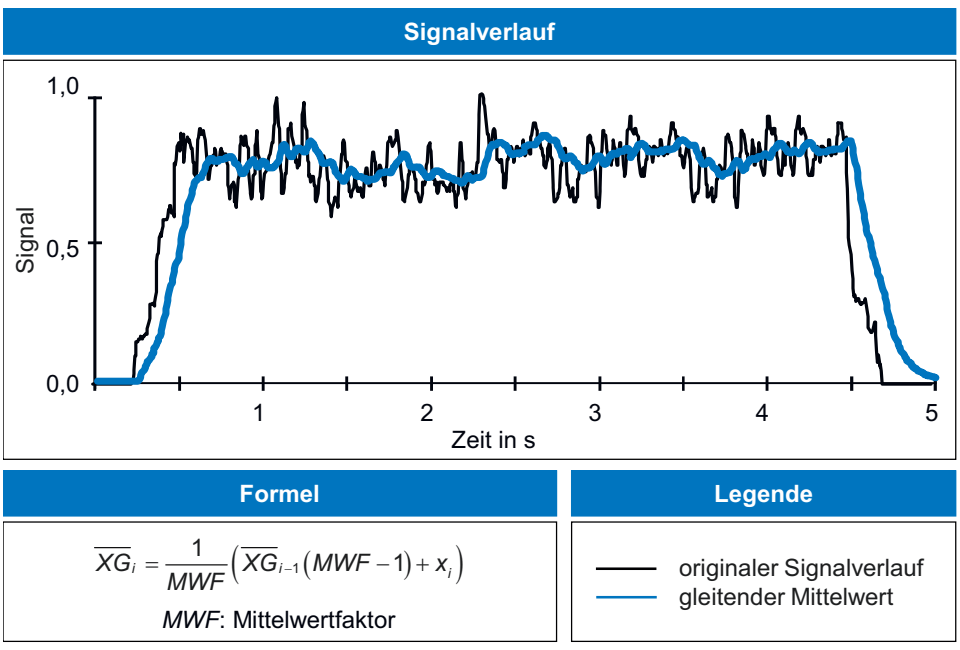


Bild 6.16 Bildung des gleitenden Mittelwertes. Quelle: König

Gleitender Mittelwert

Der gleitende Mittelwert wird z. B. zur Erkennung von Stufen im Abrichtprozess beim Schleifen oder zur Eliminierung stochastischer Signalanteile im Körperschallsignal bei der Lagerüberwachung eingesetzt. Der gleitende Mittelwert eines Messsignals ist beispielhaft im Bild 6.16 [DIN99] dargestellt und entspricht einem Tiefpassfilter mit PT_1-Glied. Er wird folgendermaßen berechnet:

$$\overline{XG_i} = \frac{1}{MWF}\left(\overline{XG_{i-1}}(MWF-1) + X_i\right) \tag{6.6}$$

mit:

$\overline{XG_i}$	neuer gleitender Mittelwert,
MWF	Mittelwertfaktor,
X_i	aktueller Mittelwert,
$\overline{XG_{i-1}}$	vorheriger gleitender Mittelwert.

Dabei gibt der einstellbare Mittelwertfaktor MWF an, mit welcher Gewichtung der jeweilige Messwert in den neuen (zu berechnenden) Mittelwert XG_i eingeht. Ein hoher Mittelwertfaktor lässt den gleitenden Mittelwert dem Originalsignal entsprechend langsam folgen. Das heißt, je größer der Mittelwertfaktor ist, desto größer ist die Tiefpasswirkung der Mittelwertbildung.

Weitere wichtige Merkmale sind statistische Kenngrößen, wie Varianz oder Schiefe [WALC74], sowie spektrale Merkmale, wie z. B. Teilleistungen aus dem Frequenzspektrum und Kenngrößen, die sich aus der Cepstralanalyse ergeben.

6.2.4 Klassifikation

Die aus den Messwerten extrahierten Merkmale müssen in der nächsten Verarbeitungsstufe bewertet werden, damit eine Aussage über den Prozess- oder Maschinenzustand möglich ist. Die Reaktionen, die auf die Zustandserfassung erfolgen, sind je nach Anwendungsfall verschieden. Hinweise auf sich anbahnende Maschinenschäden, die möglichst

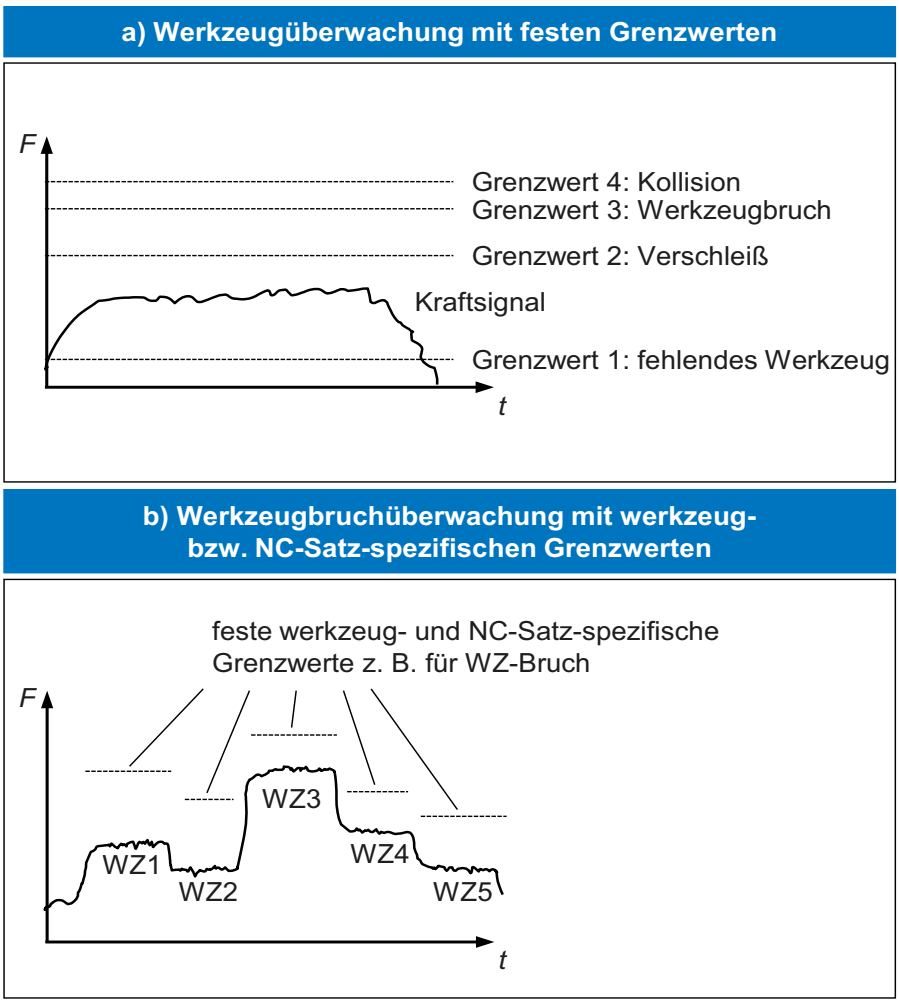


Bild 6.17 Werkzeugüberwachung mit festen Grenzen

zu günstigen Zeiten zu beseitigen sind, oder die erreichte Grenze des Werkzeugverschleißes, die einen Werkzeugwechsel nach sich zieht, sind einige anschauliche Beispiele.

Stetige Änderungen, z. B. der Freiflächenverschleiß, der eine Maßänderung am Werkstück bewirkt, können durch eine intermittierend oder stetig wirkende Prozessregelung ausgeglichen werden. Hierzu werden die vorverarbeiteten Sensorsignale in anwendungsspezifischen Reglern weiterverarbeitet. Die Funktionsweise von Prozessreglern ist beispielhaft in ▶ Kap. 6.3 beschrieben. Bei der Prozess- und Anlagenüberwachung werden die berechneten Kennwerte mit Hilfe der im Folgenden beschriebenen Klassifikationsverfahren in Klassen eingeteilt (z. B. „Werkzeug arbeitsscharf"/ „Werkzeug verschlissen"). Hierbei bedarf es für die wirkungsvolle Klassenfindung vielfach der Intuition und Erfahrung entsprechender Fachleute.

6.2.4.1 Feste Grenzen

Die einfachste Möglichkeit der Klassifikation ist der Vergleich eines Merkmales mit einem festen Grenzwert. Eine Überschreitung oder Unterschreitung des Grenzwertes zeigt je nach Überwachungsaufgabe eine Prozessstörung oder ein defektes Maschinenelement an.

Das Prinzip ist beispielhaft im ◘ Bild 6.17a für die Werkzeugüberwachung dargestellt. Es werden hier vier Grenzwerte, für „fehlendes Werkzeug", „Verschleiß", „Werkzeugbruch" und „Kollision", festgelegt [BRAA97]. Eine Überschreitung des Kollisions-Grenzwertes führt zur sofortigen Abschaltung der Vorschubantriebe. In weniger kritischen Fällen (z. B. Verschleißgrenze überschritten) hat die Grenzüberschreitung nur eine Meldung an den Benutzer oder einen automatischen Werkzeugwechsel zur Folge. Die Grenzwerte werden in der Regel relativ zu den im Werkzeugneuzustand gemessenen Werten automatisch vom System eingestellt, müssen jedoch durch den Benutzer nachjustiert werden.

Bei der Prozessüberwachung ist es häufig erforderlich, die Grenzwerte an wechselnde Prozessbedingungen anzupassen. In solchen Fällen besteht die Möglichkeit, z. B. NC-Satz- bzw. werkzeugspezifische Grenzwerte zu definieren. Im ◘ Bild 6.17 b ist beispielhaft ein Kraftverlauf für die Bearbeitung eines Werkstückes über fünf NC-Sätze mit fünf verschiedenen Werkzeugen skizziert.

In ähnlicher Form werden feste Grenzwerte zur Maschinen- und Anlagenüberwachung eingesetzt. Beispielsweise werden Wälzlagerschäden daran erkannt, dass ein fester Grenzwert des Körperschall-Summenpegels überschritten ist.

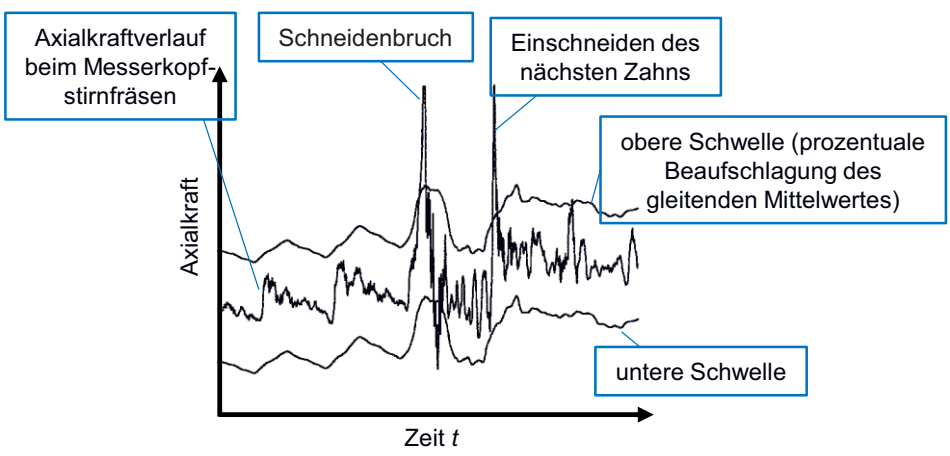
6.2.4.2 Mitlaufende Schwellen

Die mitlaufenden Schwellen dienen der Erkennung plötzlicher, schadensbedingter Signalveränderungen, wie sie z. B. bei Werkzeugbruch oder Kollision auftreten. Die Berechnung der mitlaufenden Schwellen erfolgt im Betrieb und basiert auf dem aktuellen gleitenden Mittelwert (vgl. ▶ Kap. 6.3). Das Prinzip ist beispielhaft für die Werkzeugbruchüberwachung im ◘ Bild 6.18 dargestellt.

Auf den gleitenden Mittelwert wird ein bestimmter Betrag addiert, um die sogenannte obere Schwelle zu berechnen. Die untere Schwelle errechnet sich durch Subtraktion des gleichen Betrages vom gleitenden Mittelwert. Da die beiden Schwellen auf den gleitenden Mittelwert bezogen sind, der dem Signal verzögert folgt, kommt es bei schnellen Veränderungen des Originalsignals zu einem Über- oder Unterschreiten der Schwellen. Die Breite des Toleranzbandes wird in der Regel proportional an den Absolutwert der zu überwachenden Größe angepasst. Der Vorteil dieser dynamisch nachgeführten Schwellen gegenüber den oben beschriebenen festen Grenzen ist die Anpassung des Toleranzbandes an den Signalverlauf bei veränderlichen Prozessparametern, z. B. Aufmaßschwankungen, Chargenveränderungen oder Werkzeugverschleiß bei der Werkzeugbruchüberwachung.

6.2.4.3 Mehrdimensionale Klassifikation

Wie oben erwähnt, reicht häufig die Auswertung eines einzelnen Merkmals nicht aus, um die Überwachungsaufgabe durchzuführen. In diesem Fall werden entweder



◘ **Bild 6.18** Werkzeugbruchüberwachung mit mitlaufender Schwelle

mehrere unterschiedliche physikalische Größen oder verschiedene Kennwerte, die aus einem Signalverlauf extrahiert wurden, betrachtet, wobei deren Veränderungen und Relationen zueinander zur Entscheidungsfindung ausgewertet werden.

Diese Merkmale bilden die Komponenten des sogenannten n-dimensionalen Merkmalsvektors $\underline{c}$ (n = Anzahl der Merkmale). Dieser Merkmalvektor könnte z. B. folgende Komponenten enthalten:

$$\underline{c} = \begin{bmatrix} L_{0-1000} \\ L_{ges} \\ \mu \\ \sigma \end{bmatrix} \tag{6.7}$$

mit:

L_{0-1000} Summenleistungspegel des Körperschall-Signals im Frequenzbereich von 0 bis 1000 Hz,
L_{ges} Summenleistungspegel des gesamten aufgeommenen Körperschall-Signals,
μ Mittelwert des Vorschubkraft-Signals,
σ Standardabweichung der Häufigkeitsverteilung des Körperschall-Signals.

Wenn die Merkmale gut ausgewählt sind, bilden die zu klassifizierenden Zustände separierbare Punktmengen im entsprechenden Zustandsraum. Im Bild 6.19 ist zur Verdeutlichung dieser Tatsache ein Beispiel im zweidimensionalen Raum dargestellt. Aufgetragen sind an den Achsen des Koordinatensystems die Merkmale M_{m1} und M_{m2}. Als Zerlegungsvorschrift müssen sogenannte Trennfunktionen $g(\underline{c})$ gefunden werden, mit deren Hilfe die verschiedenen Prozesszustände eindeutig einer definierten Klasse (= Punktmenge) zugeordnet werden können. Die Algorithmen zur Bestimmung der Trennfunktionen sind meist iterative Verfahren [LUDA91]. Im Beispiel von Bild 6.19a ist dies für den zweidimensionalen Fall mit zwei linear separierbaren Klassen skizziert [VDI19]. Die Trennfunktion ist eine Gerade. Diese Klassen lauten z. B. für das betrachtete Problem Werkzeugüberwachung: Klasse 1: „Werkzeug in Ordnung“ und Klasse 2: „Standzeitende“.

In der Lernphase wird eine Stichprobe mit Merkmalvektoren typischer Prozesszustände ermittelt. Diese Stichprobe dient zur Berechnung der Trennfunktion. Geeignete Merkmale, sowie die Parameter der Trennfunktion müssen für jede Überwachungsaufgabe neu bestimmt werden.

Nach diesem Verfahren der Mustererkennung ist an einem Bearbeitungszentrum das Standzeitende von Bohrwerkzeugen erfasst worden (Bohrerdurchmesser 4 mm und 6 mm).

Als Eingangssignale für das Überwachungssystem dienten das Vorschubkraftsignal, das Körperschallsignal eines an der Werkstückeinspannung montierten Beschleunigungsaufnehmers sowie je ein der Spindeldrehzahl und der Vorschubgeschwindigkeit in z-Richtung proportionales Signal. Während die beiden letztgenannten Signale zum automatischen Erkennen eines neuen Bearbeitungszyklusses notwendig sind, enthalten das Vorschubkraftsignal und das Schwingungssignal die den Prozesszustand beschreibenden Informationen. Als Ergebnis der Analyse- und Lernphase sind folgende vier Merkmale für einen vierdimensionalen Mustervektor bestimmt worden (vgl. ► Kap. 6.3.3):

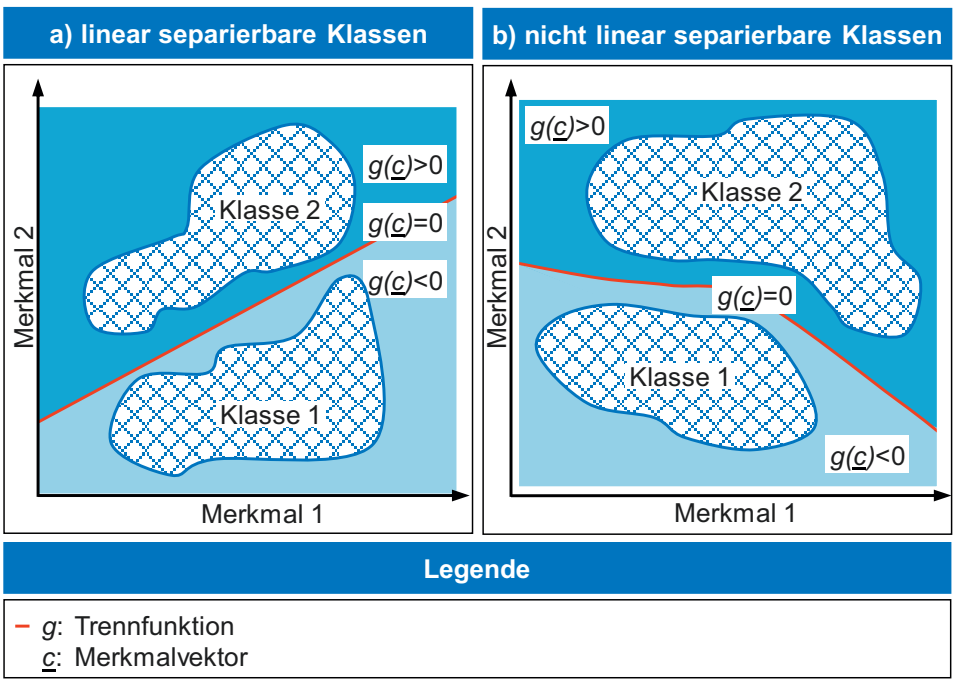


Bild 6.19 Klassifikationsregel bei einem Zweiklassenproblem

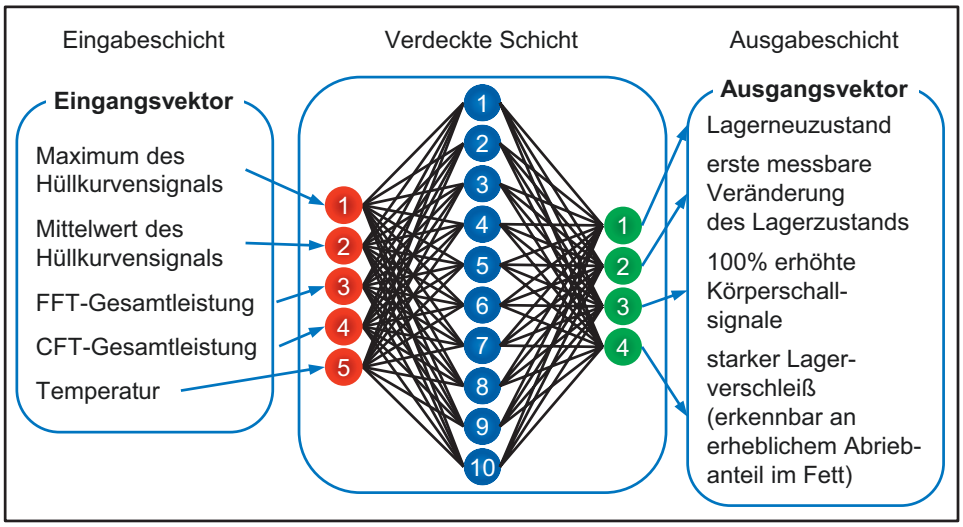


Bild 6.20 Struktur eines Neuronalen Netzes am Beispiel Lagerüberwachung

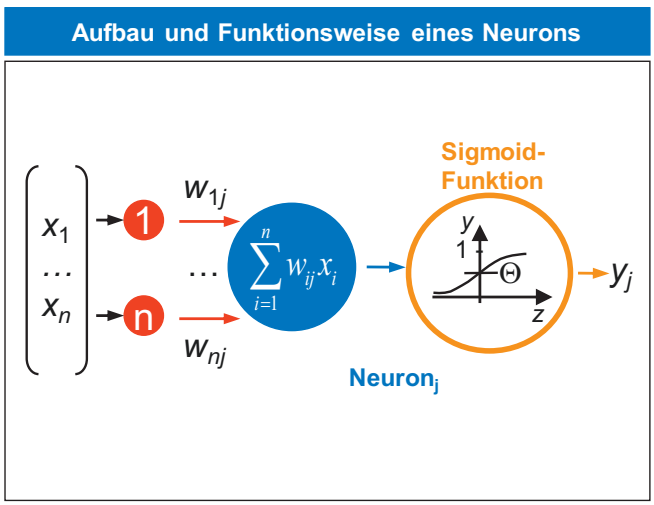


Bild 6.21 Aufbau und Funktionsweise eines Neurons

- Summenleistungspegel des Körperschall-Signals,
- Standardabweichung des Körperschall-Histogramms,
- Summenleistungspegel des Vorschubkraft-Signals,
- Standardabweichung des Vorschubkraft-Histogramms.

Die Anzahl der Merkmale sowie die Fehlerquoten bei der Klassifizierung sind hier so optimiert, dass mit 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit ein verschlissenes Werkzeug vor dem Bruch detektiert werden konnte.

Als Klassifikator wurde die lineare Trennfunktion [LUDA91] eingesetzt. Die lineare Trennfunktion ist eine Hyperebene im Merkmalsraum, die die beiden zu unterscheidenden Klassen voneinander trennt. Das heißt, Merkmale der Klasse 1 liegen auf einer Seite der Hyperebene im vierdimensionalen Merkmalsraum, Merkmale der Klasse 2 auf der anderen.

Ein anderes Klassifikationsverfahren, das auch in der Lage ist, nicht linear separierbare Klassen, wie sie im Bild 6.19 b dargestellt sind, zu trennen, sind neuronale Netze [BRAA00]. Künstliche neuronale Netze sind Systeme, die aus einfachen Verarbeitungseinheiten, sogenannten Neuronen, aufgebaut sind, die über gewichtete Verbindungsleitungen zu einem Netzwerk verknüpft sind, Bild 6.20. Neuronale Netze können entweder hardwaremäßig mit Hilfe spezieller Prozessoren aufgebaut sein oder softwaremäßig simuliert werden.

Neuronale Netze sind in der Lage, einem vorgegebenen Eingangsvektor (Merkmalvektor) einen Ausgangsvektor, der z. B. die Klassenzugehörigkeit des Merkmalvektors bestimmt, zuzuordnen. Die Parametrierung dieses neuronalen Netz-Klassifikators erfolgt durch Lernen an Beispielen. Das Netz lernt entsprechend einer vorgegebenen Lernregel automatisch. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Netztypen, die sich durch die Vernetzungsstruktur (Topologie), den Aufbau der Neuronen (Bild 6.21) und die eingesetzte Lernregel unterscheiden. Ein Beispiel für die Anwendung neuronaler Netze ist in ► Kap. 6.5.3.4 gegeben.

6.3 Technologische Prozessüberwachung und Prozessregelung bei verschiedenen Fertigungsverfahren

6.3.1 Drehbearbeitung

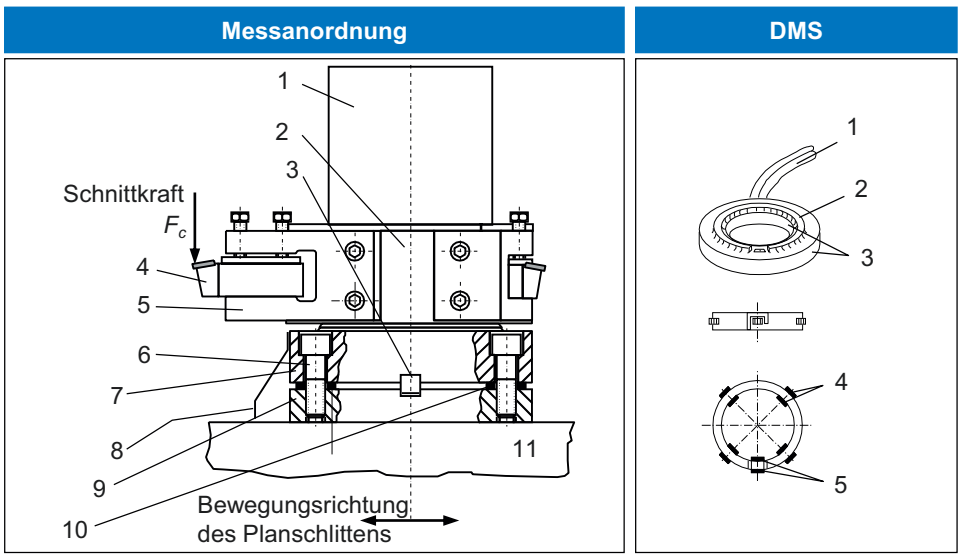
6.3.1.1 Sensorsysteme zur Drehmoment- und Zerspankraftmessung

Drehmomente und Schnittkräfte dienen der indirekten Erfassung des Prozesszustandes (z. B. Rattern) und des Werkzeugzustandes (z. B. Schärfe) insbesondere bei der Schruppzerspanung. Beim Schlichten ist die Empfindlichkeit der bekannten Sensoren zur Verschleißmessung in der Regel nicht ausreichend.

Die direkte Messung des Drehmoments wird bei Drehmaschinen selten eingesetzt. Nachteile sind hierbei die in der Regel notwendige Signalübertragung von der rotierenden Spindel nach außen und die Trägheit der Werkstückmasse, die das Signal dämpft.

Günstiger als die Drehmomentmessung ist an Drehmaschinen vielfach die direkte Schnittkraftmessung im Bereich der Meißelhalterung. Sie zeichnet sich durch geringe Störempfindlichkeit und besonders durch geringe Verzögerungszeiten aus. Bild 6.22 zeigt eine Möglichkeit zum Aufbau eines Schnittkraftsensors [MILL90]. Der die Werkzeuge tragende Vierkantrevolver ist auf vier Messringen gelagert, die unter einer hohen Vorspannung (rd. 80 kN) stehen. Die einzelnen Messringe sind mit je acht aktiven und zwei passiven Dehnungsmessstreifen (DMS) beklebt. Die elastische Verformung des von Schutzringen umgebenen Verformungskörpers ist ein Maß für die auftretende Belastung, die über die Widerstandsänderung der aktiven DMS aufgenommen wird. Die beiden nicht im Kraftfluss liegenden passiven DMS dienen zur Kompensation des Temperatureinflusses. Der Kraftfluss kann aufgrund der konstruktiven Anordnung nur über die Messringe erfolgen. Durch die Summierung aller an den Auflagepunkten gemessenen Belastungsänderungen wird die Schnittkraft F_c ermittelt. Deshalb ist die Schnittkraftmessung für beliebigeWerkzeuge unabhängig von der Schneidengeometrie, der Einstelllänge sowie der Lage des Meißels zum Werkzeugträger.

Zur zusätzlichen Messung der anderen Zerspankraftkomponenten als der Schnittkraft (Vorschub- und Passivkraft) wird zwischen Maschinenschlitten und Revolvergehäuse der Drehmaschine eine den geometrischen Abmes-



Legende

1: Hydraulikssteuerung
2: Vierkantrevolver
3: Passfeder
4: Werkzeughalter
5: Werkzeugträger
6: Befestigungsschraube
7: feststehendes Unterteil
8: Schutzhaube
9: Grundplatte
10: Messringe
11: Planschlitten

1: Anschlusskabel
2: Verformungskörper
3: Schutzringe
4: aktive DMS
5: passive DMS

Bild 6.22 Konstruktive Anordnung und Aufbau der Schrittkraftmessringe

Bild 6.23 Flexible Kraftmessplatte zur Prozessüberwachung an Drehmaschinen. Quelle: PROMETEC

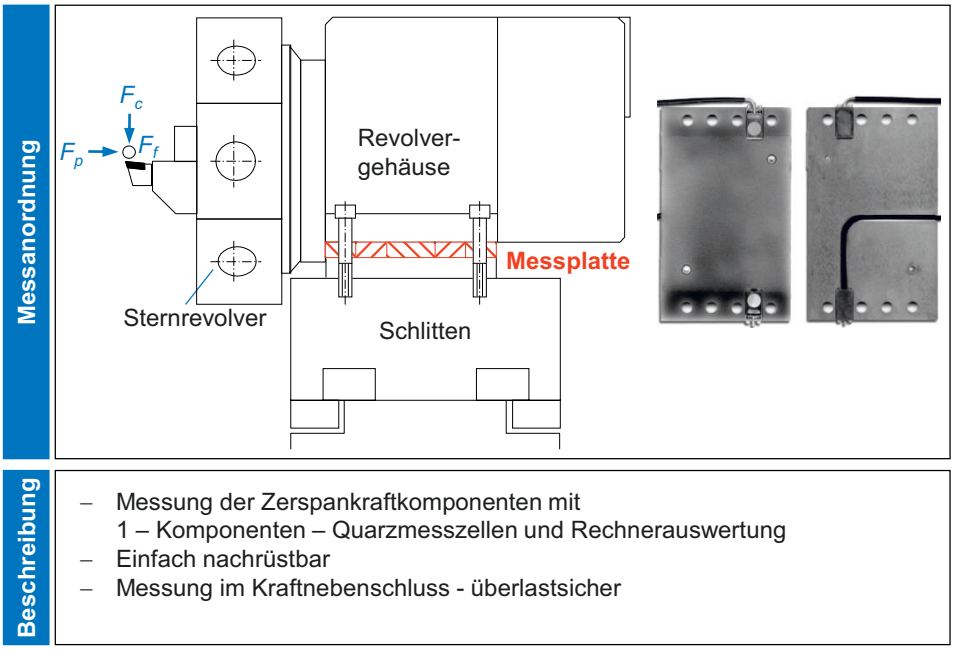
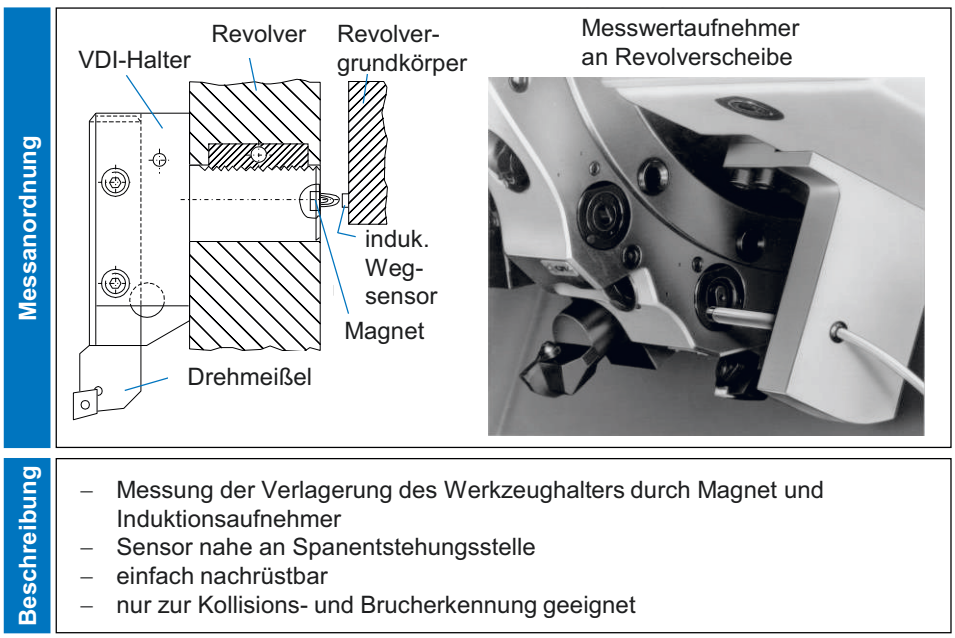


Bild 6.24 Magnetischer Dehnungssensor. Quelle: Kennametal



sungen entsprechende Messplatte montiert, Bild 6.23 [HEID00; ERNS]. Diese Platte ist aus dem gleichen Material wie die Maschine aufgebaut, sodass die statischen und dynamischen Eigenschaften der Maschine durch den Einbau nicht beeinflusst werden. Statt die Kraftmessquarze fest einzubauen, wird die Platte mit Nuten versehen, in die Keilmesselemente eingesetzt werden. Die Keilmesselemente sind öl- und kühlschmiermittelfest und in 1D- und 3D-Ausführung erhältlich. Auf diese Weise ist es einfach, die Platte an die Maschine anzupassen und das System ist einfach und preisgünstig nachrüstbar. Die Keilmesselemente sind wenige Mikrometer dicker als die Platte. Dadurch ist gewährleistet, dass die Quarze bei der Montage entsprechend vorgespannt werden, um sowohl Zug-, Druck- als auch Schubkräfte messen zu können. Die Quarzsensoren liegen im Bypass des Kraftflusses und tragen in dieser Anordnung nur einen geringen Teil der Gesamtvorspann- und Prozesskräfte. Dieses Verfahren wird bei ausreichender Empfindlichkeit des Sensors eingesetzt, um den Sensor selbst gegen Überlastung und Zerstörung zu schützen. Die Messelemente können auch zwischen Hirth-Ring und Revolvergehäuse montiert werden. Dadurch sind die Sensoren näher am Bearbeitungsprozess und die Signale sind durch die kürzere Übertragungsstrecke empfindlicher und weniger verfälscht. Die dazu erforderlichen

Konstruktionsänderungen am Revolvergehäuse haben allerdings dazu geführt, dass sich dieser Montageort noch nicht durchgesetzt hat.

Mit Hilfe der Kraft- und Momentengleichungen kann man aus den mit der Messplatte gemessenen Kräften prinzipiell die senkrecht aufeinander stehenden Bearbeitungskräfte F_c, F_p und F_f berechnen [SESS91]. Die Berechnung einzelner Kraftkomponenten erfordert einen hohen Signalverarbeitungsaufwand, ermöglicht aber eine sensiblere Verschleißerkennung.

Neben den oben beschriebenen Systemen mit DMS und Quarzsensoren sind auch andere Möglichkeiten zur Messung von Bearbeitungskräften entwickelt worden. Der im ◘ Bild 6.24 dargestellte Verformungssensor wird unmittelbar am Entstehungsort der Zerspanungskräfte hinter der Revolverscheibe angebracht [MENZ73]. Der eigentliche Sensor, ein Induktivaufnehmer, wird an der Stirnseite des Zylinderschaftes von standardisierten VDI-Werkzeughaltern montiert, ◘ Bild 6.24 links. Das Messprinzip beruht auf einer Wegmessung, d. h. Verformungsmessung der Revolverkopfscheibe. Hierbei wird die Feldänderung des Permanentmagneten mit Hilfe eines Induktivaufnehmers am Revolvergrundkörper erfasst. Die Verformung ist proportional der Vorschubkraft F_f in z-Richtung. Das System ist sehr einfach nachrüstbar, da nur ein Messwertaufnehmer (◘ Bild 6.24 rechts) je Maschine eingebaut werden muss; der Mehraufwand für die Magnetbestückung an jedem Werkzeughalter ist relativ gering.

6.3.1.2 Kraft-, Drehmoment- und Leistungsregelung bei der Drehbearbeitung

Zur Absicherung eines ordnungsgemäßen Prozessablaufs ist es sinnvoll, Werkzeug und Maschine daraufhin zu überwachen, dass bestimmte vorgegebene Grenzschnittkraftwerte und Momente nicht überschritten werden, damit keine Überlastung eintritt.

Andererseits ist es zur wirtschaftlichen Ausnutzung einer Maschine auch zweckmäßig, insbesondere bei Schruppoperationen, an der Leistungs- bzw. Kraft- oder Momentengrenze von Maschine und Werkzeug zu fahren, ohne diese Werte zu überschreiten.

Die bei der Drehbearbeitung verfolgten Ziele sind daher:

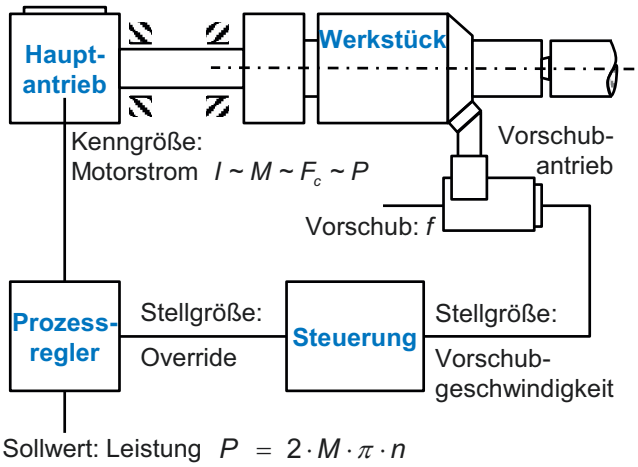
- der Schutz der Maschine durch die Begrenzung des Drehmoments M und der Leistung P:

$$M \le M_{max} \tag{6.8}$$

$$P \le P_{max} \tag{6.9}$$

- der Schutz des Werkzeugs durch Begrenzung der Schnittkraft F_c:

$$F_c \le F_{c,max} \tag{6.10}$$



◘ **Bild 6.25** Prinzipbild einer einfachen technologischen Grenzregelung (Leistungsregelung) beim Drehen

- die volle Auslastung der Maschine zur Minimierung der Bearbeitungszeit:

$$P = P_{max} \tag{6.11}$$

Durch Messung einer dieser drei Größen M, P oder F_c können mit Hilfe der folgenden Formeln die beiden anderen Größen berechnet werden, da Spindeldrehzahl n und Werkstückradius r in der NC-Steuerung bekannt sind.

$$P = M \cdot n \cdot 2 \cdot \pi = F \cdot r \cdot n \cdot 2 \cdot \pi \tag{6.12}$$

$$M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} \tag{6.13}$$

$$F_c = \frac{M}{r} \tag{6.14}$$

Im ◘ Bild 6.25 ist das Prinzip einer einfachen technologischen Grenzregelung zur Auslastung der installierten Maschinenleistung bei der Drehbearbeitung dargestellt. Regelgröße ist hier also die Maschinenleistung. Ebenso könnte das Moment oder die Schnittkraft als Regelgröße herangezogen werden. Als Kenngröße wird in diesem Beispiel der Motorstrom gemessen, der proportional der aufgenommenen elektrischen Leistung ist. Durch den Regler wird nach dem Soll/Ist-Vergleich die zum Einhalten der Soll-Leistung notwendige Vorschubgeschwindigkeit (Stellgröße) ausgegeben.

Ein entscheidender Nachteil der Leistungsmessung über die Stromaufnahme des Hauptantriebs besteht darin, dass die Messstelle relativ weit von der Zerspanstelle entfernt liegt, und sich Änderungen der Zerspanleistung mit großen Verzögerungszeiten auf die Stromaufnahme des Hauptantriebs auswirken. Ein schnelles Reagieren auf Störgrößenschwankungen ist deshalb ausgeschlossen (vgl. ► Kap. 6.3).

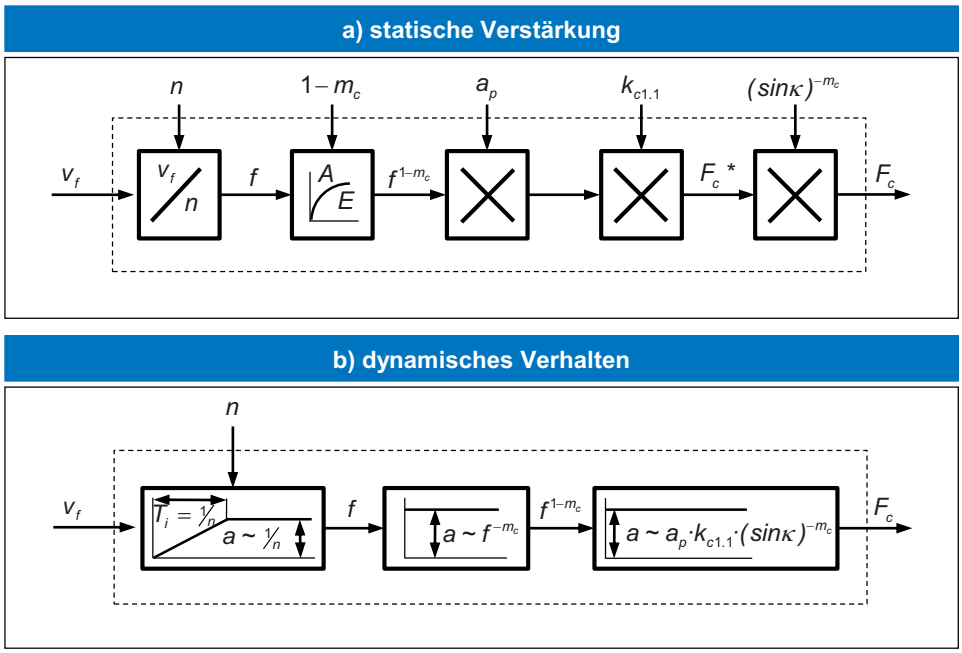


Bild 6.26 Schnittkraftregelstrecke der Drehbearbeitung

Zerspanprozess als Regelstrecke

Die Schnittkraft ergibt sich nach der Gleichung von Kienzle:

$$F_c = f^{1-m_c} \cdot a_p \cdot k_{c1,1} \cdot (\sin\kappa)^{-m_c} \tag{6.15}$$

Darin ist f der Vorschub, $1 - m_c$ der Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft, a_p die Schnitttiefe, $k_{c1,1}$ der Hauptwert der spezifischen Schnittkraft und κ der Einstellwinkel der Hauptschneide.

Im Zerspanprozess treten als Hauptstörgrößen z. B. die Schnitttiefe bei starken Schwankungen in den Rohteilaufmaßen und die spezifische Schnittkraft bei unterschiedlichen Materialhärten, sowie eine Veränderung des Schärfezustandes des Werkzeuges auf. Als wirksame Stellgröße zur Regelung der Schnittkraft bleibt somit der Vorschub f (Werkzeugweg je Spindelumdrehung), der über die Vorschubgeschwindigkeit v_f verändert werden kann. Zwischen Vorschub und Vorschubgeschwindigkeit besteht der folgende Zusammenhang:

$$f = \frac{v_f}{n}\ [\text{mm / Umdr.}] \tag{6.16}$$

Im Bild 6.26 sind das statische und dynamische Übertragungsverhalten der Schnittkraftregelstrecke dargestellt [SPIE90]. Man erkennt, dass die Störeinflüsse sich ausschließlich auf die Streckenverstärkung auswirken.

Das Zeitverhalten der Schnittkraftregelstrecke, d. h. der zeitliche Verlauf der Kraft bei einer Vorschubgeschwindigkeitsänderung, wird nur von der Drehzahl beeinflusst.

Bild 6.27 verdeutlicht den Einfluss der Spindeldrehzahl auf das Zeitverhalten der Regelstrecke. Bild 6.27a zeigt den Verlauf der Schnittkraft bei einem Schnitttiefensprung von Null auf den Wert a_0, wenn die Vorschubgeschwindigkeit konstant gehalten wird (gesteuerter Betrieb).

Nach Berührung des Werkzeugs mit dem Werkstück dauert es genau eine Spindelumdrehung, bis die Schnittkraft *Fc* von Null ausgehend einen konstanten Wert annimmt. Die Schneidkante benötigt eine Umdrehung, um aus dem Material wieder auszutreten; dabei verringert sich die Spanungsdicke kontinuierlich und die Schnittkraft wird wieder zu Null.

Im Bild 6.27 b ist der Schnittkraftverlauf dargestellt, wie er sich bei sprungförmiger Änderung der Vorschubgeschwindigkeit und konstanter Schnitttiefe ergibt. Hier sind die Auswirkungen des Stellgrößensprungs ebenfalls erst nach einer Spindelumdrehung abgeschlossen.

Leistungsregelkreis

Im Bild 6.28 ist das vereinfachte Blockschaltbild eines Leistungsregelkreises für die Drehbearbeitung wiedergegeben, bei dem das Drehmoment als Belastungskenngröße erfasst wird [NELL91]. Stellgröße ist die Vorschubgeschwindigkeit v_f, die im vorliegenden Fall von einer NC vorgegeben ist.

Die auf den Prozess und das Bearbeitungsergebnis einwirkenden Störgrößen sollen durch das Eingreifen der Regeleinrichtung ausgeglichen werden. Hierzu setzt man einen PI-Regler ein. Zur Bildung der Regeldifferenz wird das mit einem entsprechenden Sensor erfasste Drehmoment M mit der aktuellen Hauptspindeldrehzahl n multipliziert und das Ergebnis mit dem vorgegebenen Sollwert der Schnittleistung P_n verglichen. Um eine günstige Aussteuerung des Reglers bei allen Leistungsvorgabewerten P_n zu erreichen, wird durch Division eine Normierung herbeigeführt.

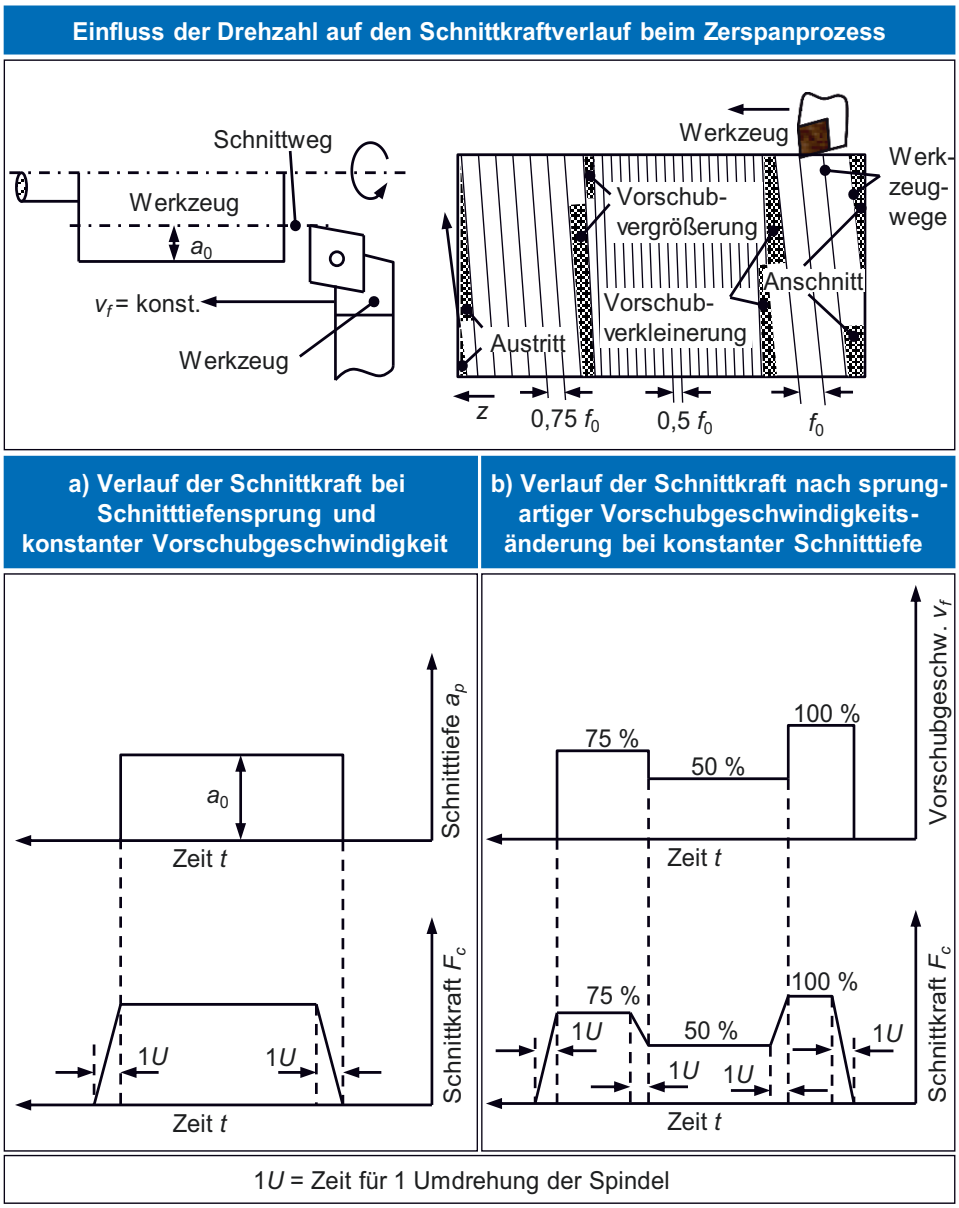


Bild 6.27 Einfluss der Drehzahl auf den Schnittkraftverlauf beim Zerspanprozess

Da Drehzahländerungen das dynamische Verhalten der Regelstrecke beeinflussen, wird ihr variables Zeitverhalten durch multiplikative Aufschaltung der Drehzahl auf den I-Teil des PI-Reglers ausgeglichen.

Die Reglerausgangsgröße wird mit dem Sollvorschub f_0 und mit der aktuellen Drehzahl n_{ist} multiplikativ verknüpft. Durch die Multiplikation mit der Drehzahl n_{ist} kompensiert man die drehzahlabhängige Änderung der Streckenverstärkung und berechnet die Stellgröße Vorschubgeschwindigkeit v_f.

Unter dieser Maßnahme wird im engeren Sinn die „Selbstanpassung", die „Adaption" des Reglers an den Prozessparameter „Drehzahl" verstanden. Die Stellgröße v_f wird an den Interpolationsbaustein der numerischen Steuerung weitergegeben, dessen Ausgabegeschwindigkeit auf diese Weise beeinflusst wird. Damit ist der Regelkreis geschlossen.

Bei der Drehbearbeitung treten häufig periodische Störgrößen auf. Typische Beispiele dafür sind unrunde oder vierkantige Werkstücke (z. B. Schmiederohlinge), bei deren Bearbeitung sich ein pulsierendes Drehmoment einstellt. Ohne Änderung der üblichen Reglereigenschaften bzw. ohne besondere Maßnahmen stellt sich hierbei nach kurzer Zeit ein stationäres Schwingen der Regelgröße um den Sollwert ein. Um die periodischen Überhöhungen der Regelgröße zu vermeiden, wird ein sogenannter Maximalwertspeicher verwendet. Diese Einrichtung leitet dem Regler als Regler-Istgröße nicht das zeitlich schwankende aktuelle Drehmoment zu, sondern das maximale Drehmoment der jeweils letzten Umdrehung. Falls bei der momentanen Um-

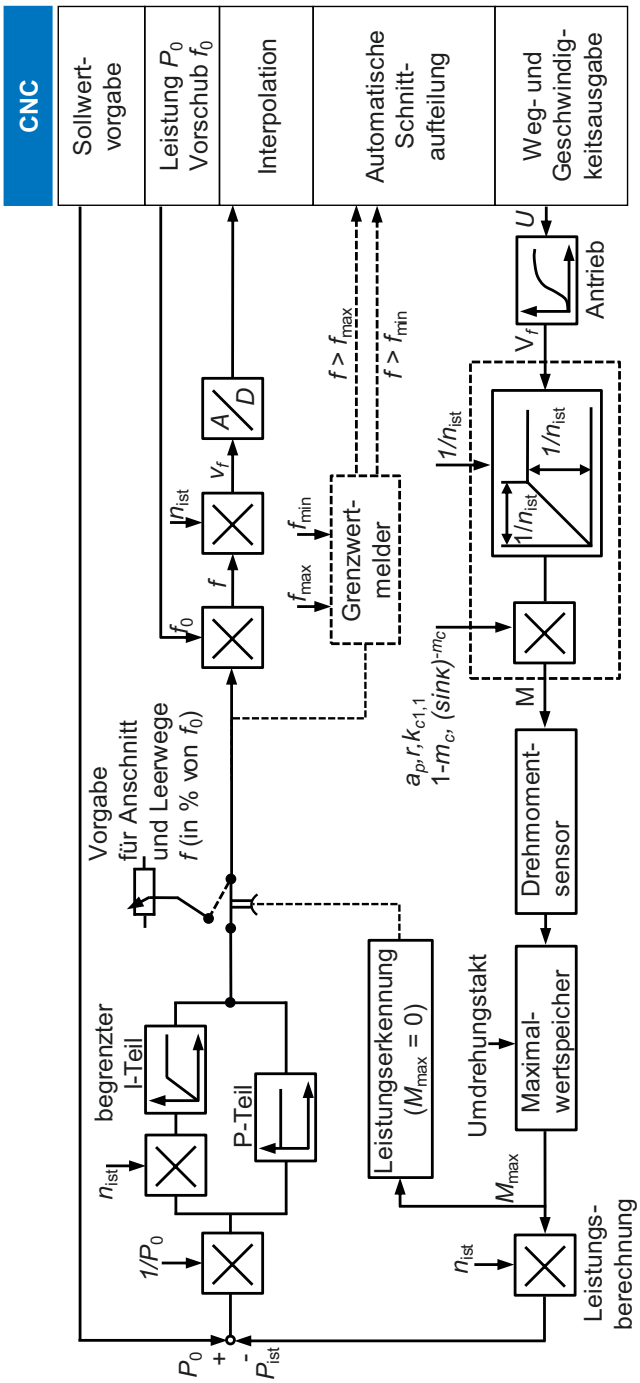


Bild 6.28 Integration der Drehprozessregelung

drehung ein noch größeres Drehmoment auftritt, wird dieses dem Regler direkt zugeleitet, Bild 6.28. Treten während der Abarbeitung von NC-Sätzen Leerwege auf (Anfahren an das Werkstück vom Startpunkt aus oder Überbrücken von Einschnitten), so können diese Wege mit erhöhter Vorschubgeschwindigkeit verfahren werden, um möglichst kurze Bearbeitungszeiten zu erreichen. Hierzu ist in der Schaltung Bild 6.28 der Baustein „Leistungserkennung ($M_{max}=0$)“ vorgesehen.

6.3.1.3 Automatische Schnittaufteilung für das Drehen

Ein NC-Programm hat immer die Abmessungen des Rohteils zu berücksichtigen. Schnitttiefen und auch erforderliche Schnittaufteilungen werden durch die Rohteilgeometrie bestimmt. Weicht ein Rohteil von den bei der Programmierung angenommenen Maßen ab, indem z. B. der Maschinenbenutzer anstelle des vorgesehenen Rohlings mit 100 mm Durchmesser einen mit 120 mm Durchmesser wählt, so sind Werkzeug und Maschine beim ersten Schnitt überlastet, und es kommt zu einem Werkzeugbruch und zu einer nachfolgenden Kollision des Werkzeugschaftes mit dem Werkstück. Häufig sind anschließend Reparaturen der Maschine mit kostenaufwendigen Stillstandszeiten unausweichlich. Es wäre daher sicher eine wünschenswerte Fähigkeit der Maschine, das Fertigteil unabhängig von den Rohteilabmaßen bearbeiten zu können, ohne dass das NC-Programm anzupassen ist. Für das Drehen liegt heute schon eine ausgereifte Lösung für die automatische Schnittaufteilung vor [SPIE90].

Zielsetzung

Als wichtigste Ziele, die mit der automatischen Schnittaufteilung erreicht werden sollen, sind zu nennen:

- Vereinfachung der NC-Programmierung,
- Unabhängigkeit von Rohteilaufmaßen,
- Verkürzung der Bearbeitungszeiten,
- Sicherung von Maschine und Werkzeug gegen Überlast.

Eine Vereinfachung der NC-Programmierung wird dadurch erreicht, dass nur die Fertigteilkontur des Werkstücks zu programmieren ist. Angaben über die Rohteilmaße sind nicht notwendig. Hiermit ist nicht nur eine Verkürzung der NC-Bearbeitungsprogramme verbunden, sondern man reduziert auch die möglichen Fehlerquellen bei der Programmerstellung.

Die rohteilunabhängige Bearbeitungsmöglichkeit ist für den industriellen Einsatz der NC-Technik ein besonders wichtiges Faktum, da mit den gleichen NC-Programmen Werkstücke mit unterschiedlichen Rohteilaufmaßen bearbeitet werden können. Dies kommt nicht zuletzt auch der Betriebssicherheit zugute. Eine Überlastung von Werkzeug und Maschine wird vermieden und ebenso sind keine Sicherheitstoleranzen beim Programmieren zu beachten, die die Schwankungen von Rohteilaufmaßen berücksichtigen. Auf diese Weise können unnötige Leerwege vermieden und damit die Bearbeitungszeiten verkürzt werden.

Bearbeitungsablauf und Strategien der automatischen Schnittaufteilung

Für ein einfaches Fertigteil (Zylinder) soll im Bild 6.29 das Funktionsprinzip der automatischen Schnittaufteilung verdeutlicht werden. Programmiert sind nur die Fertigteilkontur, die Sollwerte P_0 (Sollleistung), f_0 (Richtwert für den Vorschub) und a_0 (Sollschnitttiefe); die Rohteilkontur braucht nicht beschrieben zu werden.

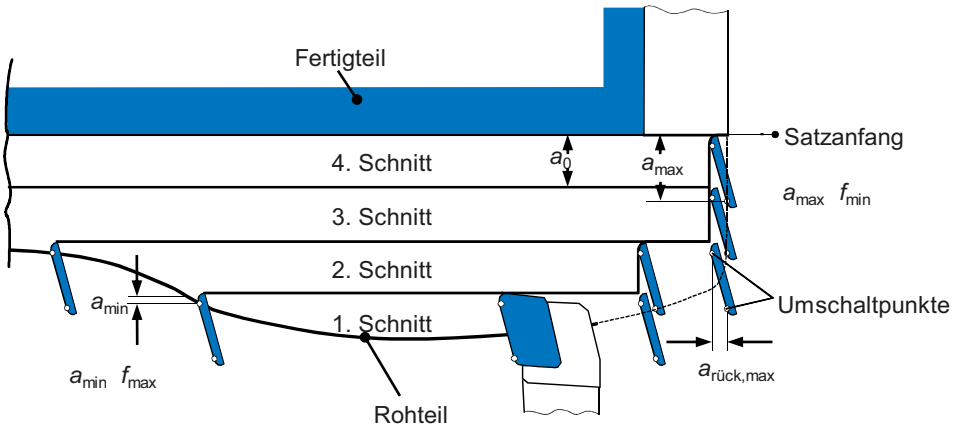


Bild 6.29 Funktionsprinzip einer selbständigen Schnittaufteilung für die Drehbearbeitung

Der Startpunkt der Bearbeitung (Satzanfang) liegt außerhalb des maximal möglichen Aufmaßes. Nach dem Start der Bearbeitung fährt das Werkzeug zur Überbrückung von Leerwegen mit erhöhtem Vorschub auf der programmierten Kontur, d. h. am Fertigteildurchmesser, an das Werkstück heran. Bei Berührung zwischen Werkstück und Werkzeug schaltet sich die Leistungsregelung ein, die durch Änderung der Vorschubgeschwindigkeit den Leistungssollwert einzuhalten versucht. Wegen der zu großen Schnitttiefe wird bei $a_0 = a_{max}$ die untere Vorschubgrenze $f = f_{min}$ unterschritten und der Alarm „$f \geq f_{min}$“ erzeugt. Dieser Alarm bewirkt unmittelbar den Abbruch des aktuellen NC-Satzes und die Abspeicherung der Ist-Position des Werkzeugs. Mit der Ausgabe des nächsten NC-Satzes, den die automatische Schnittaufteilung selbsttätig generiert, wird die Schnitttiefe um die programmierte Schnitttiefe a_0 reduziert und dazu das Werkzeug um diesen Betrag a_0 zurückgezogen. Nach der Schnitttiefenreduzierung berechnet das Schnittaufteilungsprogramm den nächsten achsparallelen Längssatz, der bis zum Schnittpunkt mit der Fertigteilkontur reicht.

Im vorliegenden Beispiel liegt nach der ersten Schnitttiefenreduzierung immer noch eine zu große Schnitttiefe vor ($f \leq f_{min}$), sodass eine weitere Schnitttiefenreduzierung um a_0 notwendig ist. Die nun vorliegende Schnitttiefe liegt innerhalb des zulässigen Schnitttiefenbereichs, und es wird so lange mit Längsvorschub bearbeitet, bis ein erneuter Alarm $f \leq f_{min}$ auftritt. Nach einer weiteren Reduzierung – hervorgerufen durch die ansteigende Rohteilkontur – wird schließlich (wie im linken Teil in Bild 6.29 skizziert) die minimale Schnitttiefe unterschritten: $a_p \leq a_{min}, f \geq f_{max}$. Hier wird die Bearbeitung abgebrochen und zum letzten Abhebepunkt zurückgefahren. Treten keine weiteren Alarme mehr auf, werden die restlichen Schnitte 2 bis 4 hintereinander abgefahren.

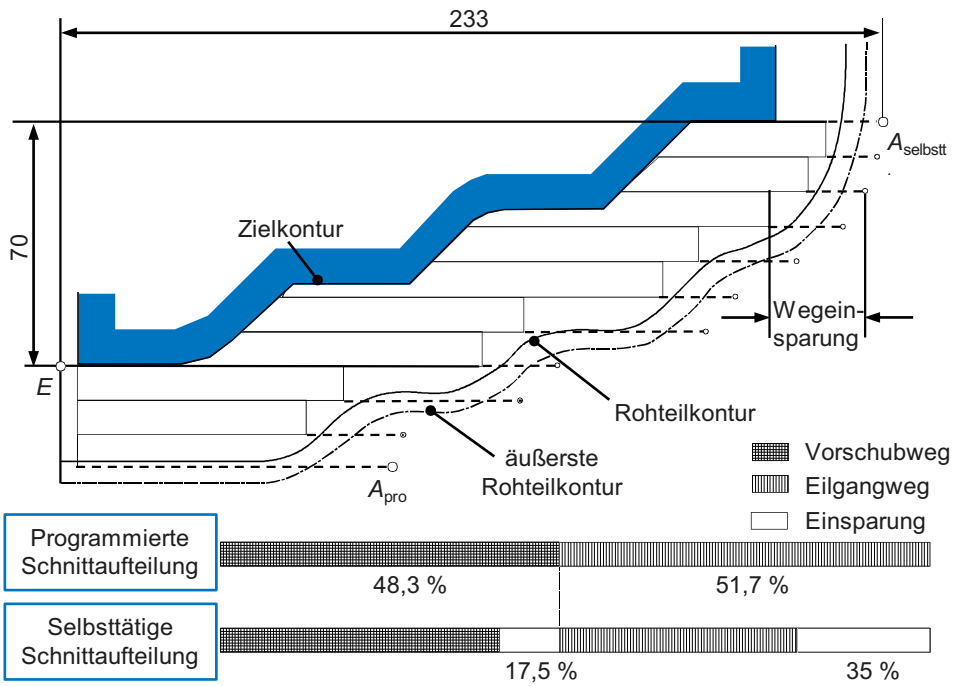


Bild 6.30 Wegeinsparung beim Einsatz einer selbsttätigen Schnittaufteilung für das Drehen

Im Bild 6.30 ist ein Arbeitsbeispiel der Fertigung eines Drehteils aus einem Schmiederohling mit programmierter und automatischer Schnittaufteilung gezeigt. Dabei ist die Summe der Wege im Eilgang und mit Arbeitsgeschwindigkeit bei der programmierten Schnittaufteilung zu 100 % gesetzt. Durch die automatische Schnittaufteilung können für dieses Beispiel 17,5 % der Vorschubwege und 35 % der Eilgangwege eingespart werden. Diese Werte können bei anderen Beispielen höher oder niedriger liegen.

Die automatische Schnittaufteilung ist jedenfalls immer dann vorteilhaft, wenn Rohteile mit einem Aufmaß von mehr als einer Schnitttiefe vorliegen (z. B. beim Drehen von Stangenmaterial) oder Rohteile mit stark schwankendem Aufmaß (z. B. Schmiede- oder Gussteile) verwendet werden. Ebenso verlangt das Abstellen von auftretenden Rattererscheinungen häufig eine Schnitttiefenreduzierung, die im automatischen Betrieb nur mit einer solchen Schnittaufteilung möglich wird.

Anforderung an Steuerung, Regelung und Werkzeug

Das Programmiersystem zur automatischen Schnittaufteilung arbeitet eng mit der adaptiven Leistungsregelung, Bild 6.28, zusammen. Letztere erzeugt bei Unter- bzw. Überschreiten festgelegter Grenzen für den aktuellen Vorschub Alarme, die im Schnittaufteilungsprogramm ausgewertet werden. Aufgrund dieser Alarme sind während der Bearbeitung NC-Sätze zu erzeugen, die den geometrischen Bearbeitungsablauf an das vorliegende Rohteil anpassen.

Bild 6.28 zeigt, wie die adaptive Grenzregelung und die NC-Steuerung mit automatischer Schnittaufteilung zusammenwirken. Das Schnittaufteilungsprogramm ist dabei zusätzlich im Steuerrechner abgelegt.

Durch Vergleich der Reglerausgangsgröße (f in % von f_0) mit den Grenzwerten f_{min} und f_{max} erzeugt ein Grenzwertmelder beim Erreichen der Grenzwerte die Alarme „$f \geq f_{max}$“ bzw. „$f \leq f_{min}$“, die an das Schnittaufteilungsprogramm geleitet werden. Da durch den Regelkreis die Leistung konstant gehalten wird, gelten folgende Beziehungen:

$$f \leq f_{\min} = a_p \geq a_{\max} \tag{6.17}$$

$$f \geq f_{\max} = a_p \leq a_{\min} \tag{6.18}$$

sodass also bei Überschreiten der maximal zulässigen Schnitttiefe a_{max} bzw. bei Unterschreiten der minimalen Schnitttiefe a_{min} die genannten Alarme einer Aussage über die aktuelle Schnitttiefe entsprechen. Für die automatische Schnittaufteilung muss man einWerkzeug mit einem Einstellwinkel $\kappa > 90°$ verwenden, damit auch Planflächen angefahren und bearbeitet werden können.

6.3.1.4 Prozessüberwachung beim Drehen

Prozessstörungen beim Drehen sind zum Einen werkzeug- oder maschinenbedingte Störungen, wie Werkzeugverschleiß, -bruch oder fehlendes Werkzeug, Maschinen oder Werkzeugüberlastung, und zum Anderen gestörte Prozessverläufe durch Rattern oder ungünstige Spanformen. Zur schnellen Erkennung dieser Störungen werden prozessbegleitende Überwachungsverfahren eingesetzt, die Prozesskräfte, Körperschall-Signale bzw. die Wirkleistung des Hauptantriebes oder die Signale der digitalen Antriebe auswerten. Diese Signale werden auch zur Kollisionsüberwachung genutzt.

Wirkleistung und Signale der digitalen Antriebe

Wirkleistung und die Signale der digitalen Antriebe werden zur Werkzeugbruchüberwachung eingesetzt. Um Werkzeugverschleiß zu erkennen, sind die Änderungen im Signal der Vorschubantriebe jedoch zu klein, da Reibung in den Führungen und Beschleunigungsvorgänge die relativ geringen Änderungen der Bearbeitungskräfte überdecken [GEOR98].

Beim Plandrehen mit konstanter Schnittgeschwindigkeit eignen sich auch die Signale der Hauptantriebe nicht zur Überwachung, da auch hier starke Beschleunigungen auftreten. Weitere Einschränkungen ergeben sich aus der begrenzten Dynamik des Signals:

- Rattern äußert sich in den niederfrequenten Wirkleistungssignalen meist nicht,
- das Erkennen eines Werkzeugbruches oder einer Kollision dauert aufgrund des Tiefpass-Verhaltens der Übertragungsstrecke 20 bis 60 ms. Im Gegensatz dazu können mit Hilfe einer direkten Messung der Bearbeitungskräfte Kollisionen und Werkzeugbrüche in 3 bis 5 ms erkannt werden.

Da Folgeschäden bei Kollisionen mit zunehmender Erkennungszeit stark progressiv steigen, eignet sich die Wirkleistungsmessung nur sehr eingeschränkt zur Werkzeugzustands- und Kollisionsüberwachung.

Die Abhängigkeit der Wirkleistung von der Gesamt-Zerspankraft schränkt ihre Empfindlichkeit bei der Verschleißmessung ein, da sich die Schnittkraft F_c als größte Kraftkomponente kaum verschleißbedingt ändert [PFEI76].

Körperschall

Untersuchungen zur Körperschall-Messung haben ergeben, dass im Frequenzbereich oberhalb 30 kHz ausgeprägte, verschleißbedingte Signalanstiege messbar sind, Bild 6.31 oben [FAHR93]. Besonders geeignet sind die Varianz und der statische Mittelwert des Körperschall-Hüllkurvensignals im Frequenzbereich größer 30 kHz. Die am besten geeigneten Frequenzbänder und die zugehörigen Anstiegswerte bis Standzeitende sind maschinen- und bearbeitungsprozessspezifisch und müssen daher stets für jeden neuen Prozess erneut ermittelt werden.

Die verschleißbedingten Signalanstiege werden durch dynamische Schnittkräfte und Kontaktänderungen in der Scherzone verursacht und sind zwei- bis dreimal größer als

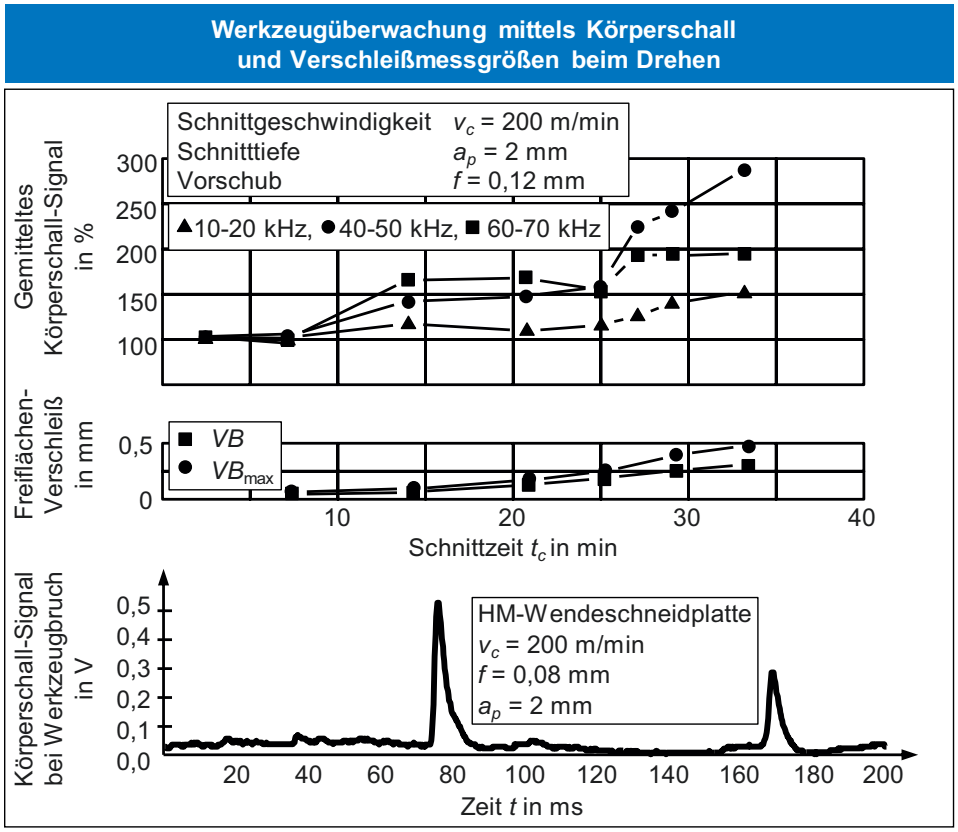


Bild 6.31 Werkzeugüberwachung mittels Körperschall und Verschleißmessgrößen beim Drehen

die entsprechenden Kraftanstiege [FAHR93]. Allerdings weisen die Körperschall-Signale trotz Mittelung stärkere Streuungen als die Zerspankräfte auf, sodass die Erkennungssicherheit vergleichbar ist.

Werkzeugbrüche äußern sich, ähnlich wie bei der Messung der Zerspankräfte, durch Signalimpulse im Körperschall-Hüllkurven-Signal ($f > 30$ kHz), Bild 6.31 unten. Der zweite etwas kleinere Impuls entstand beim Wiederauftreffen der abgebrochenen Schneide auf das Werkstück nach zwei Werkstückumdrehungen. Eine Unterscheidung zwischen Ausbrüchen und normalen Signalstreuungen oder Hartstellen imWerkstück ist nicht immer eindeutig möglich.

Zerspankräfte

Die Passivkraft F_p und die Vorschubkraft F_f sind zur Verschleißüberwachung beim Drehen gut geeignet. Die Passivkraft ändert sich jedoch bei Schnitttiefen in der Größenordnung des Eckenradius und bei einem Einstellwinkel $\kappa > 90°$ kaum mehr verschleißabhängig.

Die verschleißbedingten Änderungen der Schnittkraftkomponente F_c sind sehr gering, dadurch ist eine Messung der Gesamtkraft weniger empfindlich und so zur Verschleißüberwachung weniger gut geeignet als die Messung der Vorschubkraft [FAHR93; PFEI76].

Die Verschleißmessung sollte stets bei gleichen Schnittbedingungen durchgeführt werden, um den verschleißbedingten Kraftanstieg unabhängig von anderen Schnittbedingungseinflüssen messen zu können. Eine kontinuierliche Verschleißüberwachung ist im Allgemeinen nicht nötig, da der Verschleiß eine stetige und langsam wachsende Größe ist. Für jedes zum Einsatz kommende Werkzeug werden daher Messstellen am Werkstück mit möglichst konstanten Schnittbedingungen definiert, an denen die verschleißbedingten Kraftänderungen prozessbegleitend erfasst werden [PFEI76].

Die Erkennung des Standzeitendes erfolgt mit den im Bild 6.32 dargestellten festen Grenzwerten. Zunächst wird der gleitende Mittelwert F_{Gn} gebildet. Der erste F_{Gn}-Wert entspricht dem Kraftanfangswert F_A bei arbeitsscharfer Schneide. Der Kraftgrenzwert bei Standzeitende F_E wird entweder in Lernschnitten ermittelt oder vom Benutzer vorgegeben. Sobald dieser Grenzwert überschritten wird, erfolgt eine Standzeitende-Meldung an den Benutzer.

Um zunehmenden Kolkverschleiß, der eine Verringerung der Bearbeitungskräfte zur Folge haben kann, zu erkennen, wird der zulässige Kraftabfall F_{AB} definiert.

Auch zur Bruchüberwachung sind die Zerspankräfte geeignet. Werkzeugtotalbrüche sind in den Zerspankraftkomponenten durch impulsartige Anstiege (< 1 ms) und einen folgenden Signalabfall sehr gut erkennbar.

Die Werkzeugbruch-Überwachung erfolgt in der Regel durch mitlaufende Schwellen, damit verschleiß- und aufmaßbedingte Kraftschwankungen die Brucherkennung nicht beeinträchtigen. Kraftveränderungen bei An- und Ausschnitt oder Bohrungen gehen wesentlich langsamer vor sich

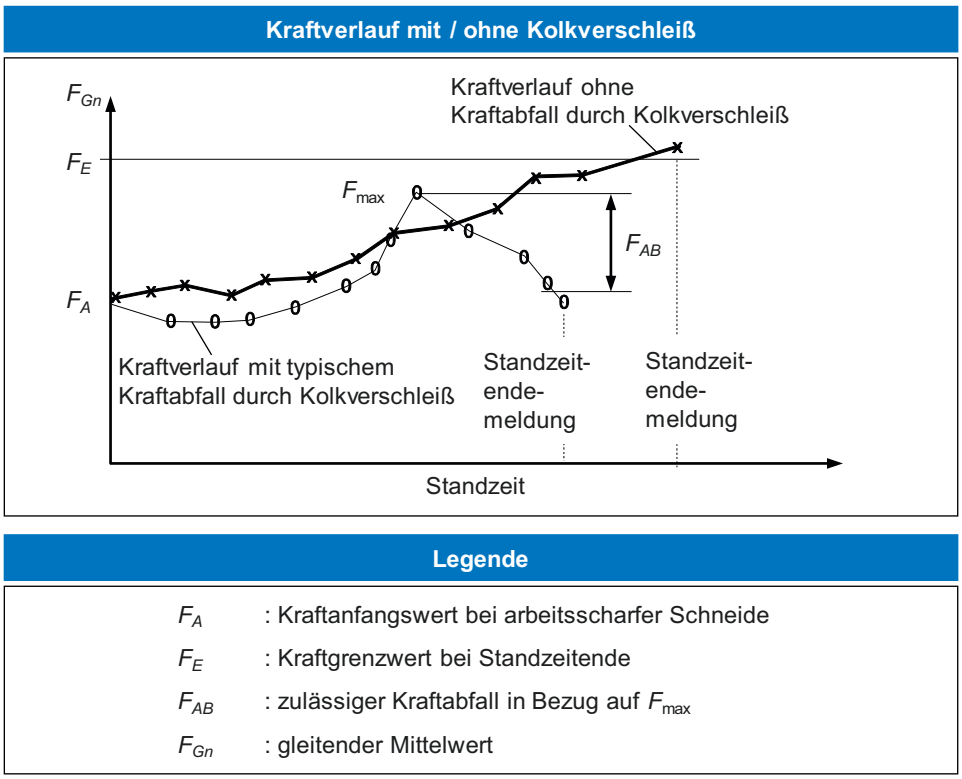


Bild 6.32 Strategie zur Erkennung des Standzeitendes. Nach Kluft

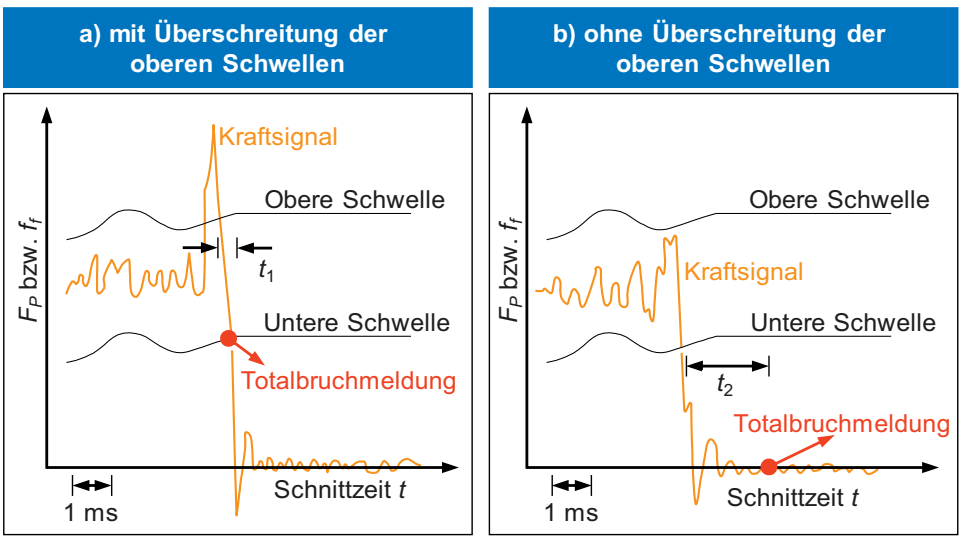


Bild 6.33 Strategie zur Bruch- und Totalbrucherkennung a) mit und b) ohne Überschreitung der oberen Schwelle

als bei Werkzeugbruch. Die verzögert mitlaufenden Schwellen folgen den schnellen Signaländerungen bei Werkzeugbruch nicht. Bei Werkzeugbrüchen werden die mitlaufenden Schwellen über- bzw. unterschritten, Bild 6.33. Liegen die im Bild 6.33 dargestellten charakteristischen Signalverläufe vor, so wird Werkzeugbruch erkannt und eine Meldung an die SPS und an den Benutzer gegeben. Falls eine schnelle Reaktion nötig ist, wird die Reglerfreigabe der Vorschubantriebe gesperrt. Dadurch können Folgeschäden an Werkzeug, Maschine und Werkstück vermieden werden.

Bevor überwacht werden kann, müssen die Überwachungsparameter von Experten eingegeben oder in einem Teach-In-Verfahren innerhalb der Standzeit des ersten Werkzeuges ermittelt werden. Wichtige Überwachungsparameter sind:

- Zerspankraft bei arbeitsscharfem Werkzeug als Bezugsgröße,
- Grenze zur Verschleiß-, Bruch- und Kollisionsüberwachung,
- Mittelwertfaktor zur Bildung des gleitenden Mittelwertes (► Kap. 6.2.3),

- Breite des Toleranzbandes bei mitlaufenden Schwellen,
- zulässige Schnittunterbrechungszeit beim Überdrehen von Bohrungen,
- geeignete Zerspanungsstellen am Werkstück zur prozessbegleitenden Verschleißüberwachung,
- Messbereich und Verstärkungsfaktoren.

Je nach Überwachungssystem werden diese Parameter entweder vom Benutzer vorgegeben, werkseitig eingestellt oder innerhalb einer Lernphase (Teach-In-Phase) vom System selbst ermittelt. Nur bei richtiger Vorgabe dieser Parameter arbeitet das System zuverlässig. Da eine große Anzahl Überwachungsparameter prozessspezifisch eingestellt werden muss, sind oft langwierige Test- und Justierphasen erforderlich.

6.3.2 Fräsbearbeitung

6.3.2.1 Sensorsysteme und Verfahren zur Prozessüberwachung beim Fräsen

Fräsmaschinen wurden für die automatisierte Produktion zu Bearbeitungszentren mit automatischem Werkstück- und Werkzeugwechsel entwickelt. Die Bearbeitungsvielfalt dieser Zentren reicht vom Fräsen und Bohren mit kleinsten Werkzeugdurchmessern über das Gewindebohren, Reiben, Ausspindeln von Passbohrungen bis zu Schwerbearbeitungen mit großen Messerkopffräsern. Dieser Umstand ist bei der Ausrüstung einer Maschine mit einem Sensorsystem zur Prozessüberwachung zu beachten. Bezüglich der Sensorfunktionsbeschreibung sei an dieser Stelle auf ► Kap. 6.2 verwiesen.

Die Applikation von Sensorsystemen zur Prozessüberwachung an Fräsmaschinen bzw. Bearbeitungszentren ist im Vergleich zu der an Drehmaschinen weitaus vielschichtiger und problematischer. Auf der Werkstückseite ist die Anbringung von Sensoren schwierig, weil durch automatischen Werkstückwechsel zusammen mit der Aufspannpalette eine Kraftmessung hinter bzw. unter der Palette erfolgen muss.

Günstigere Verhältnisse für kraftbasierte Sensorsysteme liegen auf der Werkzeugseite vor, da sich die Spindel zur Kraft- und Momentenmessung wesentlich besser eignet. Weil beim Fräsen meistens mehrere Schneiden gleichzeitig im Eingriff sind, ist eine exakte Bestimmung der Kraftkomponenten einer einzelnen Werkzeugschneide, vergleichbar zur Drehbearbeitung, nicht möglich.

Da die Applikation von externen Sensoren schwierig ist, wird auf die Strom- bzw. die Leistungsmessung oder auf steuerungsinterne Informationen zurückgegriffen, soweit die Prozesskräfte groß genug sind, um auch nach der mechanischen Übertragungsstrecke gemessen zu werden.

Im Folgenden soll ein System zur steuerungsintegrierten Prozessüberwachung auf Basis der Signale digitaler Antriebe und in die Spindel integrierter Moment-, Kraft-, und Beschleunigungssensorik vorgestellt werden.

Steuerungsintegrierte Prozessüberwachung

Moderne, offene Steuerungssysteme erlauben es, unter Zugriff auf die Strom- oder Drehmomentsignale digitaler Antriebe und Verknüpfung mit NC-Satz- und Steuerdaten, Prozessüberwachungsfunktionen zu integrieren. Hauptvorteil solcher steuerungsintegrierter Prozessüberwachungssys-

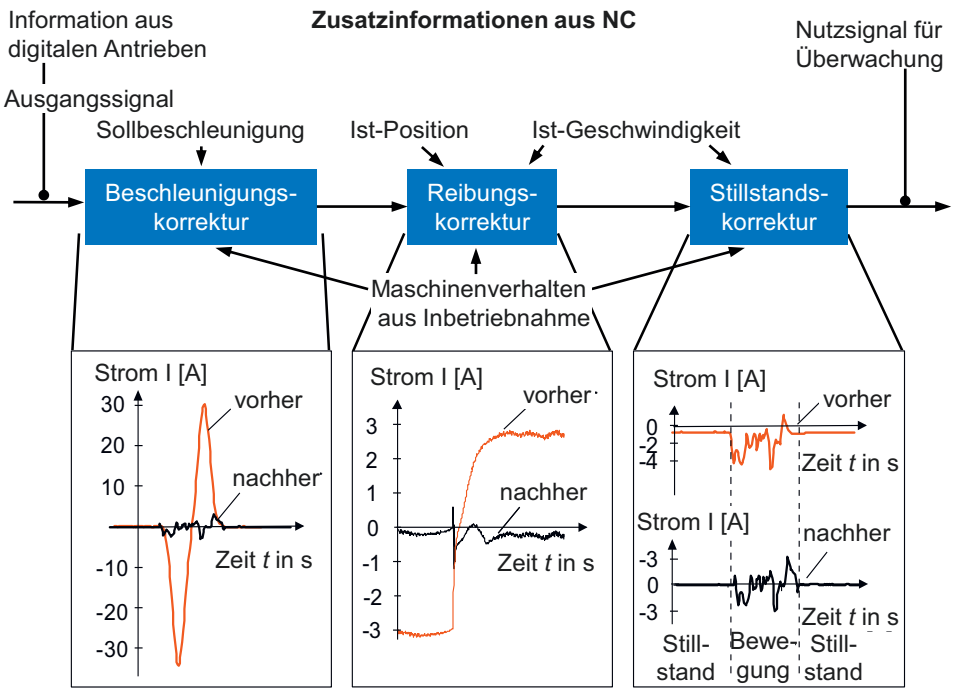


Bild 6.34 Eliminierung nicht prozessbezogener Einflüsse auf die Signale direkter Antriebe

teme gegenüber bisherigen kommerziellen Lösungen ist die Tatsache, dass in vielen Fällen eine Überwachung ohne den Einsatz von Sensoren oder sonstiger zusätzlicher Hardware möglich ist [ECKH93]. Grundlage einer zuverlässigen Prozessüberwachung ist eine hohe Informationsqualität der verwendeten Überwachungssignale. Die Antriebssignale Stromistwert und Momentensollwert sind auch ohne Zerspanprozess – d. h. im Leerlauf – nicht gleich Null. Folgende Effekte sind dabei typischerweise zu berücksichtigen:

- Beschleunigungseffekte durch Trägheitskräfte,
- Reibungseffekte bei bewegten Achsen/Spindeln z. B. durch Führungs- oder Rollreibung,
- Signaloffsets im Stillstand durch die Auswirkung der Haftreibung. Durch diese kann am Antrieb grundsätzlich jeder Stillstandsstrom anliegen, der eine Kraft unterhalb der Haftreibungsgrenze erzeugt.

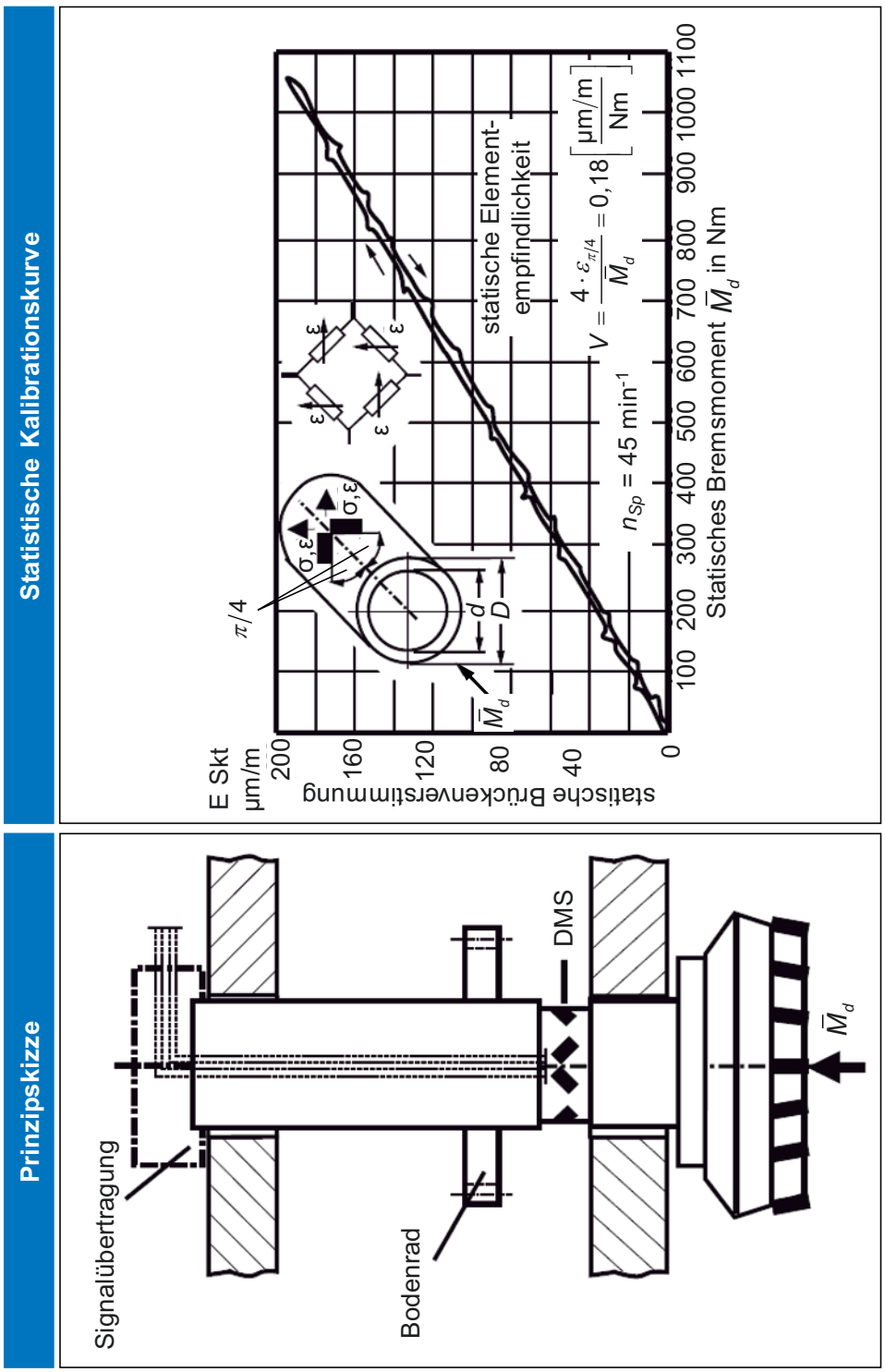


Bild 6.35 Drehmomentsensor an einer Bettfräsmaschine, konstruktive Anordnung und statistische Kalibrationskurve

Sind die Einflüsse des Leerlaufverhaltens von gleicher Größenordnung oder sogar größer als die prozessbedingten Nutzsignale beim Zerspanprozess, so kann eine Analyse des Prozesszustandes nicht mehr zuverlässig erfolgen. Bild 6.34 bietet eine Übersicht über die Korrekturmaßnahmen, die im Prototypen zur Eliminierung von störenden Signaleinflüssen und somit zur Extraktion eines qualitativ hochwertigen Nutzsignals getroffen wurden. Durch den Einsatz offener Steuerungen bieten sich für die Signalkorrektur besonders effiziente Möglichkeiten, da Zusatzinformationen wie Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung aber auch z. B. aktuelle Antriebsparameter, Getriebestufen etc. direkt in der Softwareschnittstelle der Steuerung verfügbar sind. In diesem Projekt konnten mit vergleichsweise einfachen Modellen die Störeinflüsse bereits um bis zu 90 % vermindert werden.

Werden die Anregungssignale aus dem Prozess zu gering, sodass sie durch die mechanische Übertragungsstrecke des Vorschubantriebs zu stark gedämpft werden, können die Antriebssignale nicht mehr für eine sichere Überwachung herangezogen werden. In diesem Fall muss das System mit zusätzlicher Sensorik ergänzt werden. Im Rahmen des oben genannten Projektes wurde die externe Sensorik mit einer signalprozessorbasierten Zusatzhardware an die Steuerung angebunden. Deren Aufbau wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

Maschinenintegrierte Sensorik

Ziel der maschinenintegrierten Sensorik ist es, verschiedene Prozesskräfte und -momente beim Fräsen zu erfassen, wie sie beispielsweise zur Überwachung von Werkzeugen mit kleinen Durchmessern erforderlich sind.

Ein geeigneter Aufbau eines einfachen externen Sensorsystems zur Erfassung des resultierenden Drehmoments an einer NC-Bettfräsmaschine zeigt Bild 6.35. Die Torsionsverformung der Spindel wird mit Hilfe von Dehnmessstreifen an einem geschwächten Teil der Spindel zwischen vorderer Lagerung und Bodenrad gemessen [PHIL91]. Als Nachteil dieses Drehmomentsensors ist die Schwächung der Spindel zu nennen, die nötig ist, um die gewünschte Empfindlichkeit zu erreichen, sowie die Signalübertragung von der rotierenden Werkzeugmaschinenspindel.

Will man die Schwächung der Spindel vermeiden, muss man sich ein Sensorprinzip mit höherer Empfindlichkeit zunutze machen, beispielswiese Quarzsensoren, wie in Bild 6.36 und Bild 6.37 gezeigt [HOTT20]. Auf der Kupplungshülse zwischen Hauptspindel und Motor wurde eine Drehmomentsensorik appliziert. Die durch ein Drehmoment hervorgerufene Torsion der Kupplungshülse führt zu einer relativen Verlagerung der zwei Klemmringe. Die hierdurch entstehenden Kräfte werden mit piezoelektrischen Kraftmessquarzen erfasst, Bild 6.36.

Ebenfalls auf der Spindel mitlaufend befindet sich eine Beschleunigungssensorik. Diese ist in zwei auf der Spindel mitlaufende Bauteile integriert, die die ursprüngliche Lagerdistanzhülse der Spindel ersetzen. Ein Ring enthält den Sensor und die Überträgerschleife, während eine Hülse in entsprechend ausgefrästen Taschen die notwendige Elektronik aufnimmt. Ein piezoelektrischer Beschleunigungssensor er-

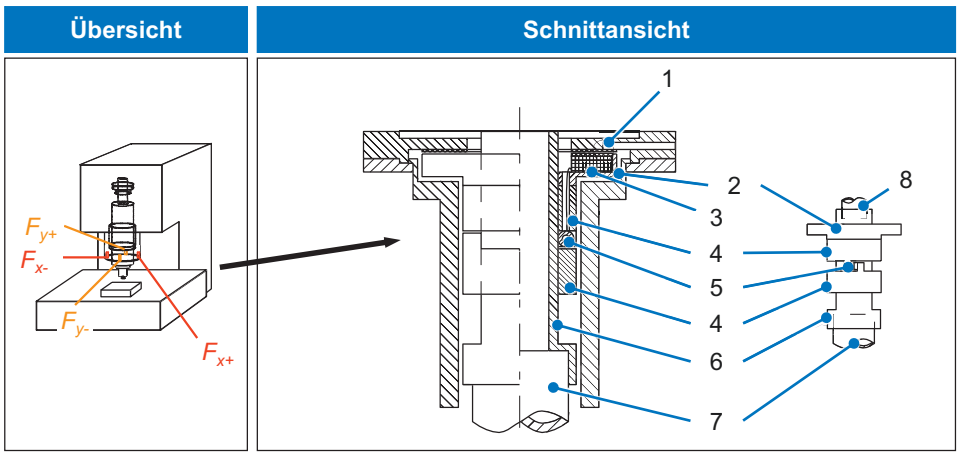


Bild 6.36 Drehmomentsensorik zur Prozessüberwachung

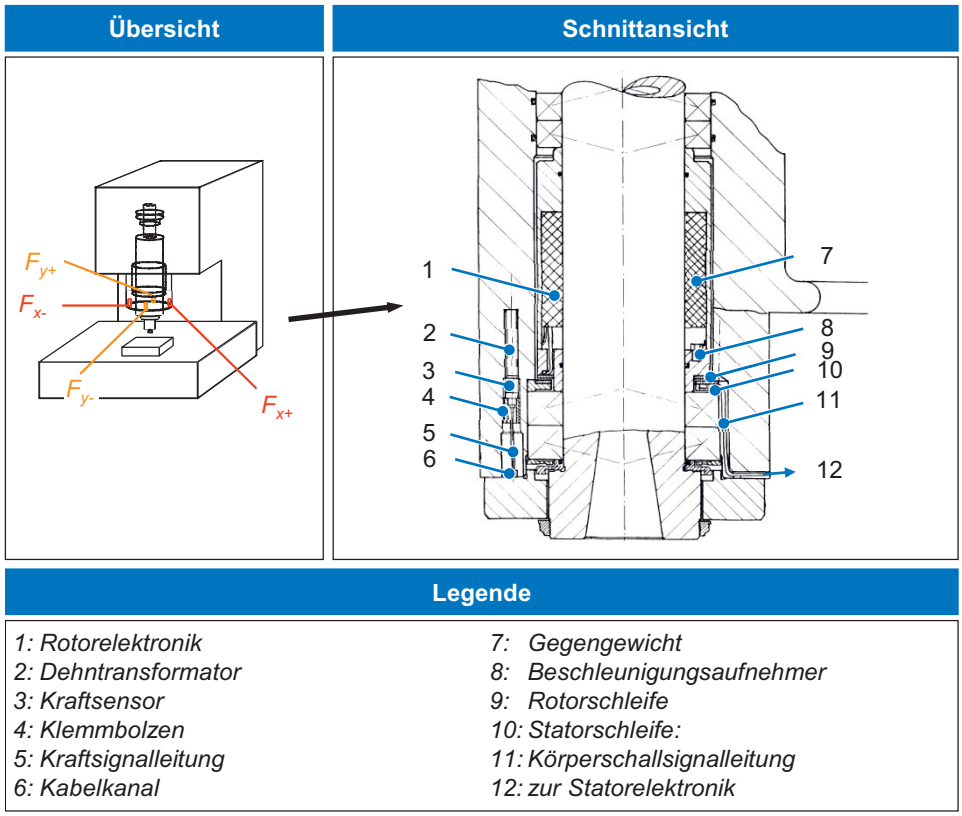


Bild 6.37 Körperschall und Kraftsensorik zur Prozessüberwachung

fasst Frequenzen bis 20 Hz. Eine Übersicht zur Historie der Ein- und Mehrspindler findet sich in [HEIS14], Bild 6.37.

Die Sensorsignale werden durch eine auf der Spindel mitlaufende Rotorelektronik, die Ladungsverstärker, A/D-Wandler und Datentransferfunktionen integriert, erfasst und vorverarbeitet. Die gleichzeitige berührungslose Übertragung von Energie- und Sensorsignalen zwischen stillstehendem und rotierendem Teil der Auswerteelektronik erfolgt durch induktiv gekoppelte Leiterschleifen. Wegen der möglichen hohen Drehzahlen der Hauptspindel (15.000 U/min) sind besondere Vorkehrungen zum Schutz der Maschine und der Sensorik notwendig. Hierzu zählt insbesondere das Vergießen aller gefährdeten Teile mittels eines elektrisch isolierenden, aber thermisch leitenden Epoxidharzkomplexes. Die stillstehende Statorelektronik führt außer der HF-Energieeinspeisung und Signalrückgewinnung auch die D/A-Wandlung zur Vorbereitung der Steuerungsankopplung durch. Die realisierte Auswerteelektronik basiert auf in [BRYA79] beschriebenen Verfahren und wurde hinsichtlich Layout und technischer Realisierung für den Einsatz auf der Hochgeschwindigkeitsspindel optimiert.

Als Ergänzung der Spindelsensorik sind vier piezoelektrische Kraftsensoren in entsprechende Bohrungen im Spindelstock eingebracht, die die Kräfte in z-Richtung messen. Keramikstäbe wirken dabei als Dehntransformator zur Erhöhung der Empfindlichkeit. Durch die Positionierung der Sensoren auf den x- bzw. y-Koordinatenachsen ist eine vereinfachte Multisensorauswertung zur Gewinnung eines dreidimensionalen Zerspankraftvektors möglich.

Unter Rückgriff auf steuerungsinterne Daten kann die Auswertung der externen Sensorsignale optimiert werden, indem z. B. die Signalqualität durch drehzahl- oder positionsabhängige Korrekturen verbessert wird.

Das im Bild 6.36 und Bild 6.37 gezeigte Sensorsystem eignet sich besonders zur Erfassung dynamischer Vorgänge im Bearbeitungsprozess. Die Erfassung rein statischer Kräfte und Drehmomente ist dagegen wegen auftretender Driften problematisch. Die Drift in den Messsignalen wird in erster Linie durch thermoelastische Verformung erzeugt, die von den Kraftmesszellen erfasst wird.

6.3.2.2 Prozessüberwachung für die Fräsbearbeitung

Werkzeug- und werkzeugklassenbezogene Überwachung

Im Rahmen des Projektes „Steuerungsintegrierte Prozessüberwachung“ (▶ Kap. 6.3.2.1) wurde der völlig neue Ansatz entwickelt, die Überlast- und Brucherkennung werkzeugbezogen durchzuführen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Überwachung weitgehend unabhängig vom NC-Teileprogramm erfolgen kann und keine Lernzyklen notwendig sind.

Werkzeugbezogene Überwachung bedeutet, dass die Überwachungsmethoden dem jeweils angewählten Werkzeug zugeordnet sind, weil das maximale Drehmoment bzw.

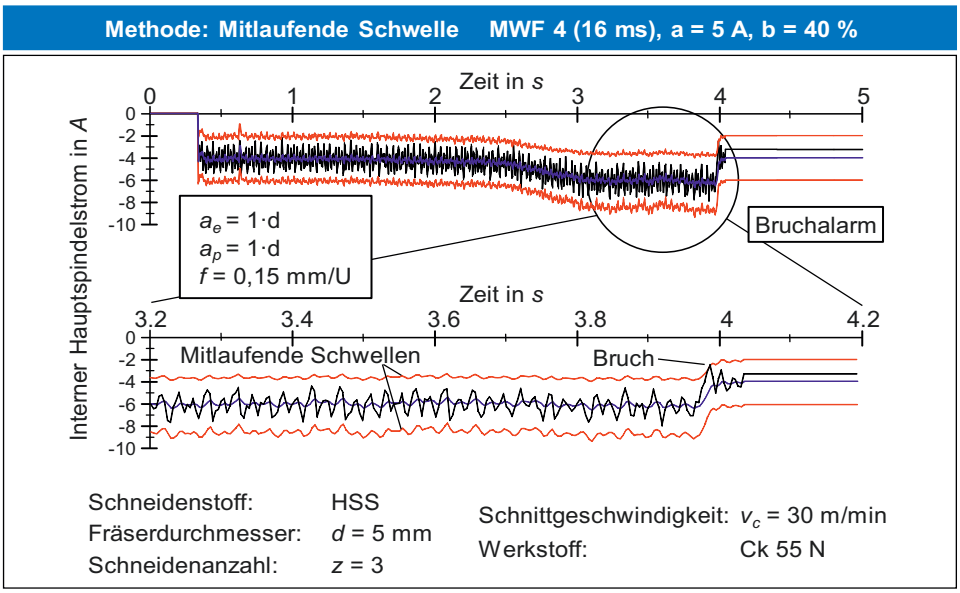


Bild 6.38 Totalbruchüberwachung bei einem Schaftfräser

6

die maximale Kraft, die ein Werkzeug ertragen kann, nur vom Werkzeug selbst, nicht aber von den Schnittbedingungen oder dem zerspanten Werkstoff abhängt.

Da es aber nicht möglich ist, für jedes beliebige Werkzeug die optimalen Parameter parat zu haben, werden die Werkzeuge in entsprechende Klassen eingeteilt, für die dann die notwendigen Parameter hinterlegt werden. Trifft der Interpreter beim Abarbeiten des NC-Programms auf einen Befehl zum Werkzeugwechsel, wird zunächst ermittelt, ob für das spezifische Werkzeug eine Methode definiert vorliegt. Ist dies der Fall, so wird diese Methode aktiviert, in den NC-Kern geladen und das Werkzeug auf dieser Basis überwacht. Anderfalls wird die der entsprechenden Werkzeugklasse zugeordnete Überwachungsmethode aktiviert. Selbstverständlich ist eine klassenbezogene Überwachung nicht so exakt wie eine werkzeugbezogene. Doch ist auf diese Weise eine Basisüberwachung ohne großen Aufwand vom ersten Schnitt an möglich.

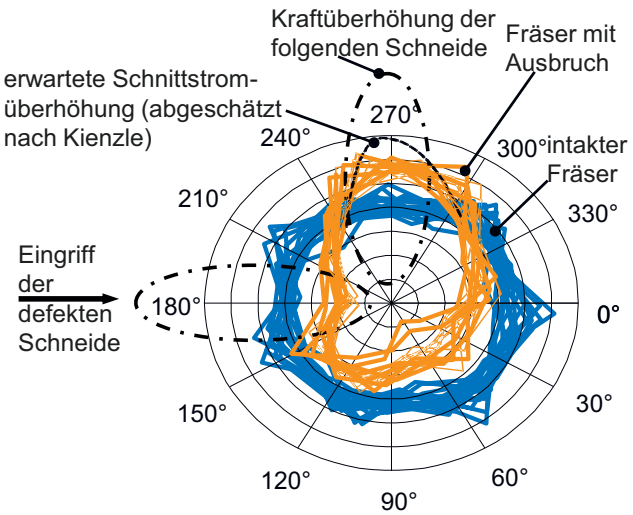


Bild 6.39 Vergleich des Hauptspindelstroms bei intaktem und bei defektem Fräser

Totalbruchüberwachung beim Schaftfräser

Zur Überwachung des Bruchs von Schaftfräsern wurde in oben genanntem Projekt der Hauptspindelstrom mittels des Verfahrens der mitlaufenden Schwellen überwacht (▶ Kap. 6.2.4.2). Für die Überwachung auf Überlast wird das Verfahren der festen Grenze (▶ Kap. 6.2.4.1) angewendet.

Bild 6.38 zeigt die mit der Methode der mitlaufenden Schwellen online überwachten internen Hauptspindelstromsignale beim Fräsen mit einem 5 mm Schaftfräser. Im Laufe der Bearbeitung kommt es zum Totalbruch des Werkzeugs. Der steile Abfall des Schnittmoments führt zu einem entsprechend steilen Abfall des Hauptspindelstroms. Durch die resultierende Überschreitung der oberen Schwelle kommt es zum Auslösen eines Bruchalarms und sofortigem Vorschubstopp.

Schneidkantenausbruch beim Schaftfräser

Ein weiteres Beispiel für die Nutzung steuerungsinterner Signale ist die Überwachung eines Fräsers auf Schneidkantenausbruch. Diese Prozessstörung bewirkt im Allgemeinen eine Verschlechterung der Werkstückoberfläche und kann auch die Vorstufe zu einem Totalbruch des Fräsers sein.

Das Problem bei der Überwachung dieser Prozessstörung besteht darin, dass der Effekt nur lokal – an einer Werkzeugschneide – auftritt und deshalb das Überwachungssignal, wie beispielsweise der Motorstrom der Hauptspindel, ebenfalls nur lokal beeinflusst wird. Der Gesamtverlauf des Signals verändert sich jedoch nicht störungscharakteristisch. Somit lässt sich diese Prozessstörung nicht mit Klassifikationsverfahren identifizieren, die nur mit einem Signal arbeiten, da der lokale Effekt im Signal von stochastischen Einflüssen nicht sicher zu trennen ist. Charakteristisches Merk-

mal dieser Störung ist das periodische Eintreten der defekten Schneide in das Werkstück (Bild 6.39). Dieser Effekt, der synchron zur Winkellage der Hauptspindel alle 360° auftritt, kann somit detektiert werden, wenn zusätzlich zum Überwachungssignal des Hauptspindelstroms die Winkellage hinzugezogen wird. Dadurch lässt sich im Zeitbereich ein einfacher Algorithmus zur Mustererkennung realisieren, der auf dem Prinzip der mitlaufenden Grenze beruht – jedoch mit wesentlich engeren Grenzen als bei der konventionellen Werkzeugbruchüberwachung. Infolge der Mustererkennung synchron zur Spindellage lassen sich somit bereits im Zeitsignal stochastische Einflüsse, die eine mitlaufende Schwelle überschreiten würden, weitgehend ausschließen und die Signifikanz des Signals bei aufgetretenem Schneidkantenausbruch sicherstellen.

Ein wesentlicher Vorteil, der sich aus der Nutzung steuerungsinterner Signale ergibt, liegt bei dieser Strategie darin, dass zwei Signale auf relativ einfache Art miteinander synchronisiert und gemeinsam verarbeitet werden können. Bei klassischen sensorbasierten Systemen sind hierfür mehrere Sensoren erforderlich und ggf. auch noch mehrere analoge Signalvorverarbeitungen. Steuerungsintern liegen beide verschiedenartige Signale in derselben Steuerungsschnittstelle vor und sind vergleichsweise einfach miteinander verknüpfbar.

Verschleißüberwachung beim Messerkopfstirnfräser

Aus den dynamischen Anteilen im Kraftsignal lassen sich auch Rückschlüsse auf den Verschleißzustand des Werkzeugs ziehen. Aufgrund veränderter Reibungsverhältnisse erzeugt eine verschlissene Schneide größere Axialkräfte als eine nicht verschlissene. Bild 6.40 zeigt die Abhängigkeit der Energie des dynamischen Anteils der Axialkraft beim Schruppen in Stahl mit einem Messerkopfstirnfräser über der Verschleißmarkenbreite der Hauptschneiden. Die Axialkraft auf das Werkzeug wird durch die Passivkräfte auf die einzelnen Schneiden gebildet. Diese Passivkraft ist zwar vom absoluten Betrag her die kleinste der auf eine Schneide wirkenden Kräfte, zeigt aber gegenüber den anderen Kraftkomponenten die größte Abhängigkeit vom Verschleiß [PAUC08]. Mit zunehmendem Verschleiß der Schneiden nimmt die Welligkeit des Kraftverlaufs zu, d. h. die Wechselleistung des Signals steigt. Integriert man diese Wechselleistung über eine feste Zeit, z. B. die Dauer eines Bearbeitungslaufs, so erhält man den Energiewert. Durch die alleinige Betrachtung des Wechselanteils werden Fehler, z. B. durch Offsetwerte und Temperaturdriften, die im statischen Messsignal vorhanden sind, nicht berücksichtigt. Diese Fehlerquellen würden sich durch die Integration besonders gravierend auswirken.

Im Bild 6.40 ist zum Vergleich ebenfalls der Zusammenhang der über einen Bearbeitungslauf integrierten Leistung im dynamischen Drehmoment und der durchschnittlichen Verschleißmarkenbreite an den Hartmetallschneiden des Messerkopfs dargestellt. Das Drehmoment ist hier proportional der Hauptschnittkraftkomponente auf eine Werkzeugschneide. Diese Komponente zeigt eine verhältnismäßig geringe Abhängigkeit von der Verschleißmarkenbreite. Aus Untersuchungen bei der Drehbearbeitung ist bekannt, dass Kolkverschleiß an einer Werkzeugschneide sogar ein Absinken der Hauptschnittkraft verursacht [PFEI76].

Die Bestimmung des Werkzeugverschleißes beim Fräsen ist im Vergleich zur Brucherkennung ungleich schwieriger. Aufmaßschwankungen des Rohteils oder unterschiedliche Festigkeiten des Materials der Werkstücke, die aus unterschiedlichen Chargen stammen, erzeugen in den Schneidkraftkomponenten teilweise wesentlich größere Schwankungen als die durch den Schneidenverschleiß ver-

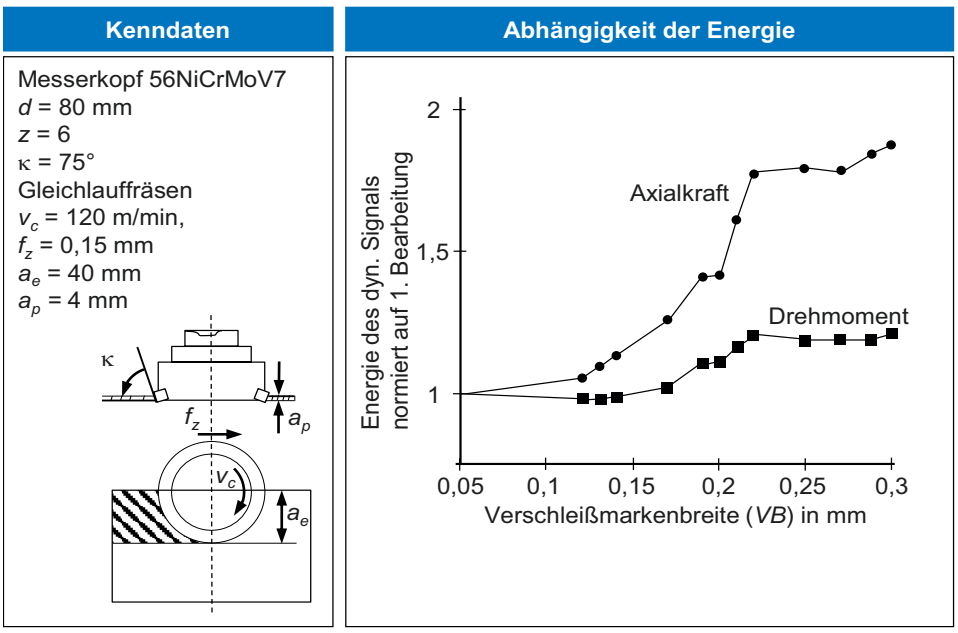


Bild 6.40 Abhängigkeit der Energie des dynamischen Axialkraftsignals und des Drehmomentes vom Schneidenverschleiß beim Messerkopfstirnfräsen

ursachten. Eine gewisse Unabhängigkeit von den Werkstückparametern kann erreicht werden, wenn man statt einzelner Kraftkomponenten, bzw. den dazu proportionalen Größen, deren Verhältnisse zueinander bewertet [AULM70].

Bei der Schlichtbearbeitung ebenso wie beim Fräsen mit kleinen Werkzeugen sind die Bearbeitungskräfte sehr klein. Eine erste Entwicklung für dieses Anwendungsgebiet ist in [HEWL92] beschrieben. Für dieses System wurde ein piezoelektrischer Kraftmessring entwickelt. Er befindet sich im Gehäuse der Hauptspindel. Die Messelemente sind im Kraft-hauptfluss positioniert. In der Regel sind die Kräfte bei der Schlichtbearbeitung jedoch nur im Labor mit aufwendigen Aufbauten, z. B. Kraftmessplattformen, noch eindeutig erfassbar. Hier bietet die Auswertung des Körperschallsignals oft die einzige Möglichkeit für eine Werkzeugüberwachung.

Werkzeugüberwachung mit Körperschallsensoren

Charakteristisch für den Bruch eines Hartmetall- oder eines HSS-Werkzeugs ist die Erzeugung eines breitbandigen Körperschallsignals, das sich durch die Maschinenstruktur fortpflanzt. Ein großer Energieanteil dieses Signalimpulses liegt dabei im Ultraschallbereich, bis hinauf zu Frequenzen von einigen hundert Kilohertz. Die Erscheinung wird häufig mit dem aus der englischsprachigen Literatur stammenden Begriff Acoustic Emission bezeichnet. Diese Schallemission hat verschiedene Ursachen; unter anderem ist hierfür die Trennung des Materialgefüges während des Bruchvorgangs verantwortlich [FAHR93]. Mit Hilfe von Körperschallsensoren können die beim Werkzeugbruch auftretenden Schallimpulse erfasst werden. Der Sensor muss dazu an einem Ort der Maschine montiert sein, an dem das Schallsignal auf dem Übertragungsweg nicht zu stark gedämpft wird. In der Regel wählt man einen Ort möglichst nahe der Prozessstelle.

Starker Schneidenverschleiß bei kleinen Fräswerkzeugen bewirkt, dass die Fräserschneiden das Material nicht mehr einwandfrei abscheren. Teilweise schaben sie nur über das Werkstück, was ein Verbiegen des Werkzeuges zur Folge hat. Dieses Schaben kann im Körperschall als Signalburst festgestellt werden. Das ◘ Bild 6.41 zeigt das Körperschallsignal bei Bearbeitung eines Werkstückes mit einem scharfen und mit einem stark verschlissenen HSS-Fräser, dessen Durchmesser 6 mm betrug. Das Signal wurde mit einem Körperschallsensor auf der rotierenden Spindel eines Bearbeitungszentrums aufgenommen.

Jede der drei verschlissenen Schneiden des Fräsers erzeugt die typischen Schallpulse. Diese Pulse nehmen zusammen mit dem auftretenden Verschleiß an Häufigkeit und Stärke überproportional zu. Es besteht zusätzlich eine Abhängigkeit vom Eingriffsquerschnitt des Werkzeugs sowie von der Größe des Werkzeuges selbst, weshalb das Verfahren allenfalls eine qualitative Beurteilung des Verschleißzustandes der Schneiden zulässt.

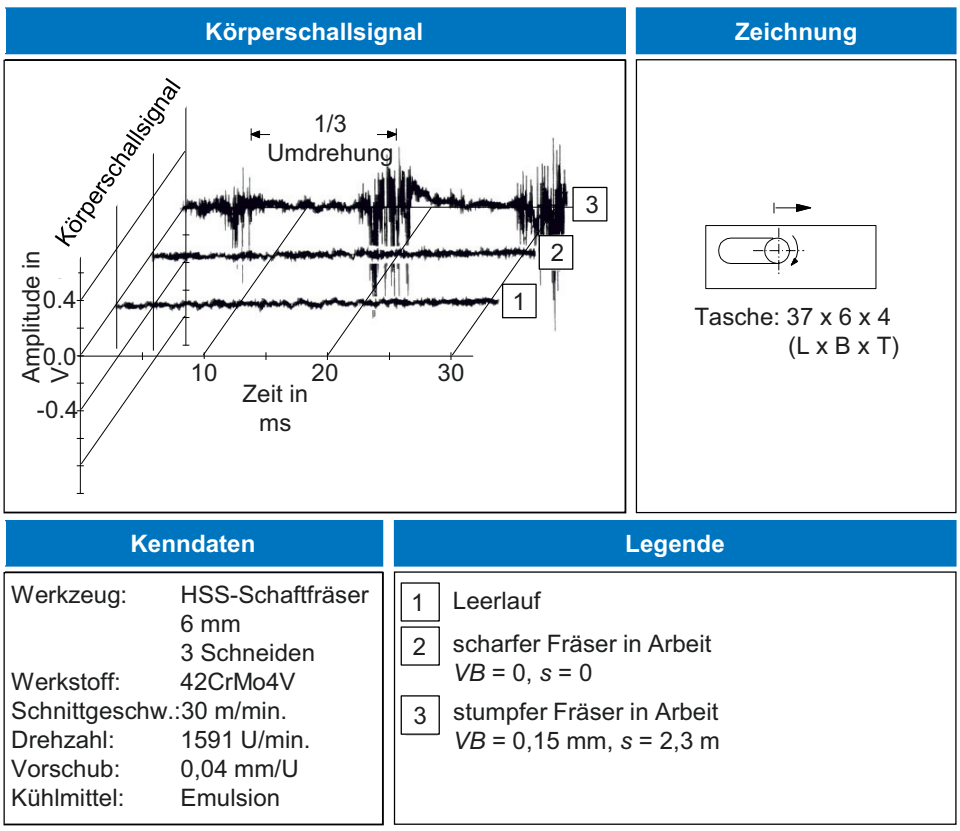


Bild 6.41 Körperschallpulse durch verschlissene Schneiden eines kleinen HSS-Fräsers

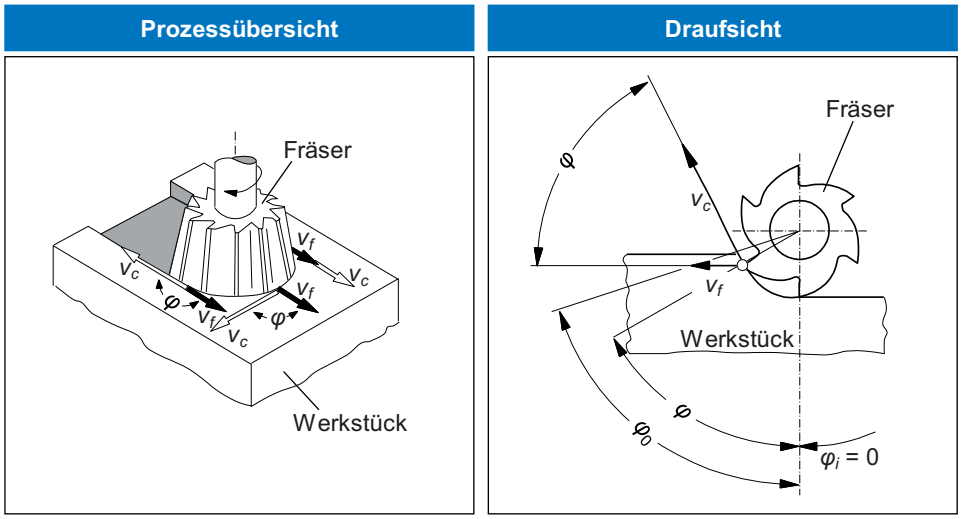


Bild 6.42 Vorschubrichtwinkel beim Fräsen mit Stirnfräser. Nach DIN 658

6.3.2.3 Prozessregelung für die Fräsbearbeitung

Allgemeines Ziel der Fräsprozessregelung ist es, die installierte Maschinenleistung zu nutzen bzw. eine maximale Zerspanleistung zu erreichen, die einerseits durch die maximal zulässige Werkzeugbelastung begrenzt ist und andererseits gerade noch ratterfrei erreicht werden kann. Hierbei ergeben sich dann nahezu minimale Fertigungskosten für die Schruppbearbeitung.

Aufgrund des Einsatzes mehrschneidiger Werkzeuge und der sich ändernden Eingriffsverhältnisse beim Fräsen ist der Verlauf des Spindeldrehmoments durch die große Anzahl der Parameter komplizierter als bei der Drehbearbeitung.

Maßgebend für die zu verrichtende Zerspanarbeit beim Fräsen sind in erster Linie die tangential an den einzelnen Fräserschneiden angreifenden Kräfte, die in ihrer Summe über den Fräserdurchmesser das Drehmoment der Arbeitsspindel erzeugen. Die Schnittkraft, das Schnittmoment und die Schnittleistung sind dabei abhängig von den Eingriffsverhältnissen des Fräsers.

Für den Momentanwert der Schnittkraft je Schneide gilt:

$$F_c(\varphi) = a_p \cdot f_z^{1-m_c} \cdot (\sin\kappa)^{-m_c} \cdot k_{c1,1} \cdot (\sin\varphi)^{1-m_c} \qquad (6.19)$$

für:
$\varphi_i \le \varphi \le \varphi_0$

darin bedeuten:
a_p Schnittiefe,
f_z Vorschub je Schneide, mit
Z Fräserzähnezahl,
$1-m_c$ Anstiegszahl der spezifischen Schnittkraft,
$k_{c1,1}$ Hauptwert der spezifischen Schnittkraft,
κ Einstellwinkel der Hauptschneide,
φ Vorschubrichtungswinkel,
φ_i Fräsereintrittswinkel,
φ_0 Fräseraustrittswinkel.

Der Vorschubrichtungswinkel φ ist der Winkel zwischen der Vorschubrichtung des Werkzeugs und der momentanen Schnittrichtung der im Eingriff befindlichen Schneide. Beim Fräsen ändert sich der Vorschubrichtungswinkel φ ständig. Bild 6.42 verdeutlicht die Definition des Vorschubrichtungswinkels für das Stirnfräsen.

Das auf die Frässpindel wirkende momentane Drehmoment $M(t)$ ergibt sich aus der arithmetischen Summe der Schnittkräfte $F_c(\varphi)$ an den einzelnen Schneiden j, die sich auf dem Schnittbogen φ_s unter den momentanen Vorschubrichtungswinkeln φ_j im Eingriff befinden:

$$M(t) = \frac{D}{2} \sum_{j=1}^{j=z_E} F_c\left(\varphi_j(t)\right) \qquad (6.20)$$

mit dem Fräserdurchmesser D, der im Eingriff befindlichen Schneidenanzahl z_E und dem Schneidenindex j.

Die Vorschubrichtungswinkel φ_i und die Anzahl der im Eingriff befindlichen Schneiden z_E sind zeitabhängige Größen, die sich mit der Drehung des Fräsers periodisch ändern.

Die Anzahl der im Eingriff befindlichen Schneiden z_E ist nur dann konstant, wenn der Schnittbogen φ_s ein ganzzahliges Vielfaches des Schneidenteilungswinkels φ_T ist. Unter der Voraussetzung ratterfreier Bearbeitung lässt sich der zeitliche Verlauf des Drehmoments unter Benutzung von Gleichung (6.19) beschreiben:

$$M(t) = \frac{D}{2} \cdot a_p \cdot f_z^{1-m_c} \cdot (\sin\kappa)^{-m_c} \cdot k_{c1,1} \cdot \sum_{j=1}^{j=z_E(t)} \left(\sin\varphi_j(t)\right)^{1-m_c} \qquad (6.21)$$

Die Zerspanleistung berechnet sich aus:

$$P(t) = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M(t) \qquad (6.22)$$

Bild 6.43 verdeutlicht den unterschiedlichen zeitlichen Verlauf der Schnittkräfte bzw. -momente für vier ausgewählte Bearbeitungsbeispiele [HEID89]. Je nach Fräsbogen und Schneidenanzahl erhält man ein verschiedenartig pulsierendes Drehmoment. Die Frequenz der Grundschwingung entspricht der Schneideneingriffsfrequenz f. Diese bestimmt

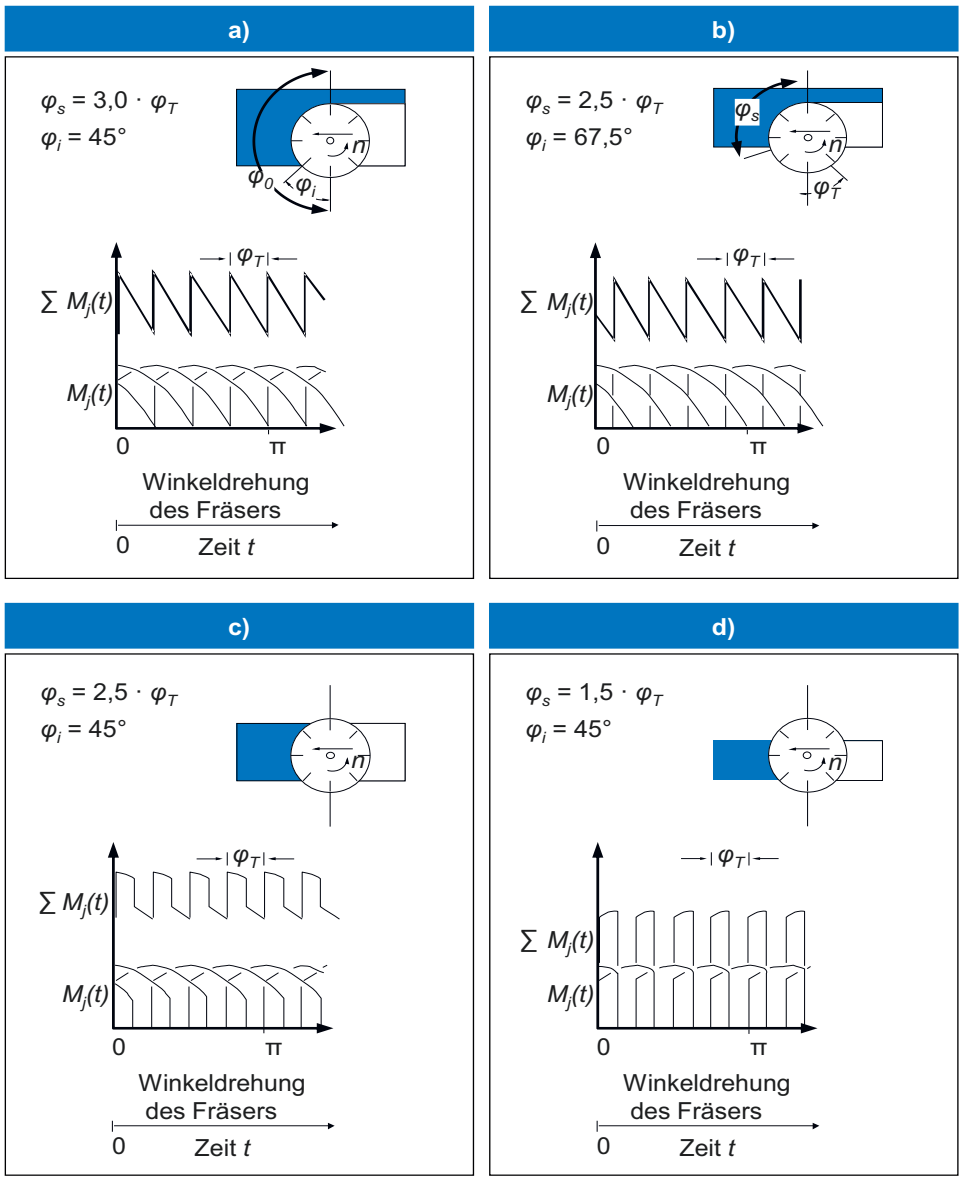


Bild 6.43 Zeitlicher Verlauf der Einzeldrehmomente je Schneide $M_j(t)$ sowie des Gesamtmomentes $M(t)$ beim Fräsen für unterschiedliche Eingriffsverhältnisse

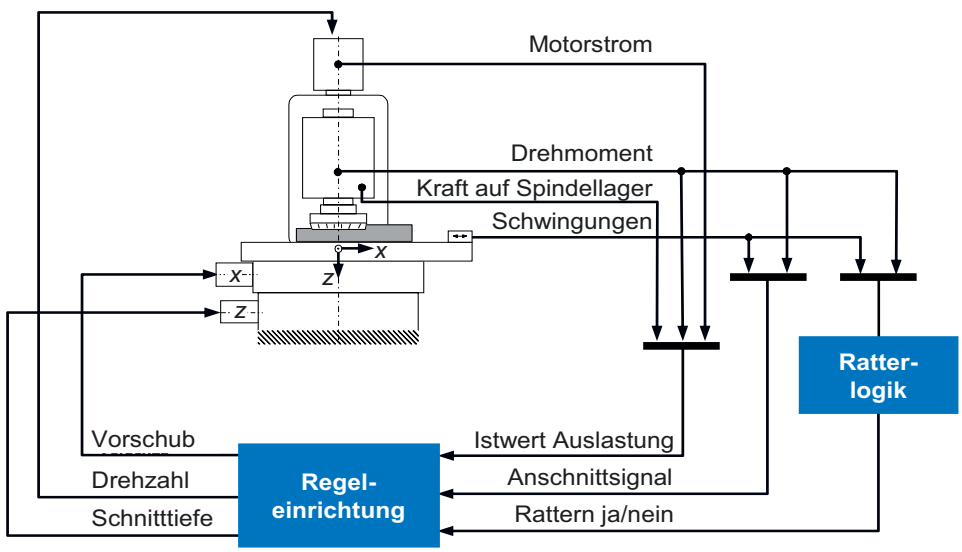


Bild 6.44 Aufbau der Prozessregelung für den Fräsprozess

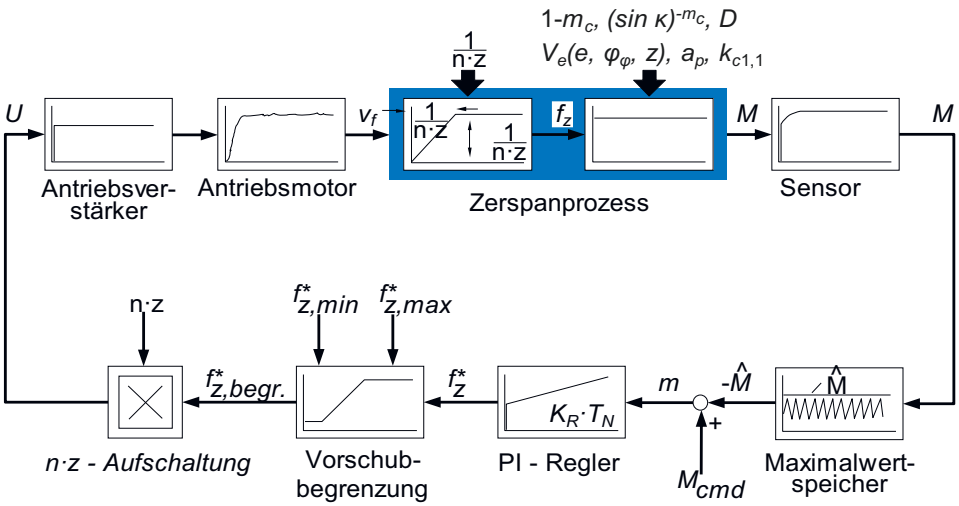


Bild 6.45 Regelkreis einer Drehmomentenregelung für die Fräsbearbeitung

sich aus der Schnittgeschwindigkeit v_c und dem am Umfang gemessenen Schneidenabstand b_z aus:

$$f = \frac{v_c}{b_z} = n \cdot z \quad \text{mit} \quad b_z = \varphi_T \cdot \frac{D}{2} \tag{6.23}$$

Von den das Drehmoment beim Fräsen beeinflussenden Größen, Gleichung (6.21), können sowohl die Schnitttiefe a_p als auch der Fräsbogen φ_s während der Bearbeitung variieren und somit als Störgrößen auf den Zerspanprozess einwirken. Es ist deshalb nicht möglich, analog zum Drehen nur über die Größe des gemessenen Drehmoments eine Aussage bezüglich der aktuellen Schnitttiefe zu erhalten.

Bild 6.44 zeigt den prinzipiellen Aufbau von Grenzregelungen, wie sie für das Fräsen zur Auslastung der verfügbaren Maschinenleistung eingesetzt werden können. Die Auslastung der Maschine bzw. des Werkzeugs wird, ähnlich wie beim Drehen, von einer Regeleinrichtung auf einem vorgegebenen konstanten Wert gehalten. Als Messgröße können der Motorstrom, das Spindeldrehmoment oder die Abdrängkraft auf das vordere Spindellager und als Stellgröße der Vorschub bzw. die Vorschubgeschwindigkeit, Spindeldrehzahl und Schnitttiefe benutzt werden. Letztere erfordert aber eine automatisierte Schnittaufteilung in der Maschine, was heutige kommerzielle Steuerungen jedoch noch nicht erlauben. Wie bereits im ▶ Kap. 6.3.1 für die Drehbearbeitung erläutert, erfasst man heute wegen des Ansprechverhaltens in ausgeführten Grenzregelungen als Messgröße nicht den Motorstrom, sondern Drehmoment, Lagerkraft oder Dehnungen.

Beim Fräsen wird die Zerspanleistung der Maschine häufig nicht durch die installierte Motorleistung, sondern durch selbsterregte Schwingungen, sogenanntes Rattern, begrenzt. Eine stabile Bearbeitung ist nur dann möglich, wenn die Ratterschwingungen von einer speziellen Rattererkennungslogik erfasst werden und der Prozessregler in der Lage ist, bei auftretenden Ratterschwingungen den Fräsprozess automatisch in einen stabilen Arbeitsbereich zu führen. Wie im ▶ Kap. 6.3.2.5 näher erläutert wird, sind Drehzahländerung und Schnitttiefenreduzierung geeignete Maßnahmen zur Beseitigung von Ratterschwingungen an Fräsmaschinen.

Der Regelkreis einer Drehmomentregelung für das Fräsen ist im Vergleich zum Drehen durch eine weitere Einflussgröße, den Schnittbogen φ_s, gekennzeichnet.

Betrachtet man zur Analyse des Übertragungsverhaltens der Regelstrecke nicht mehr das zeitlich pulsierende Drehmoment $M(t)$, Gleichung (6.21), sondern den Spitzenwert des Drehmoments $\hat{M}$ innerhalb des Zeitintervalls einer Werkzeugumdrehung

$$\tau = \frac{1}{n}$$

so erhält man:

$$\hat{M} = \frac{D}{2} \cdot a_p \cdot f_z^{1-m_c} \cdot (\sin\kappa)^{1-m_c} \cdot k_{c1,1} \cdot V_e \tag{6.24}$$

mit:

$$V_e = \left\{ \sum_{j=1}^{j=z_E(\varphi_s,t)} (\sin\varphi_j(t))^{1-m_c} \right\}_{\varphi_j=\varphi_0}^{\varphi_j=\varphi_0} \tag{6.25}$$

Der Maximalwert des Summenausdrucks V_e ist ein Teil des Verstärkungsfaktors der Regelstrecke, der durch den Schnittbogen φ_s, durch den Fräsereintrittswinkel φ_i sowie durch die Anzahl der Schneiden z bestimmt wird.

Im Bild 6.45 ist der gesamte Regelkreis einer Drehmomentregelung für das Fräsen dargestellt [HEID89]. Da beim Fräsen die Drehzahl für ein Werkzeug während der Bearbeitung im Allgemeinen unverändert bleibt, wird durch die Momentenregelung auch die Leistung auf einem konstanten Wert gehalten.

In dieser Regelung ist der Zerspanprozess Teil der Regelstrecke mit der Vorschubgeschwindigkeit v_f als Eingangs- und dem Drehmoment M als Ausgangsgröße. Als hauptsäch-

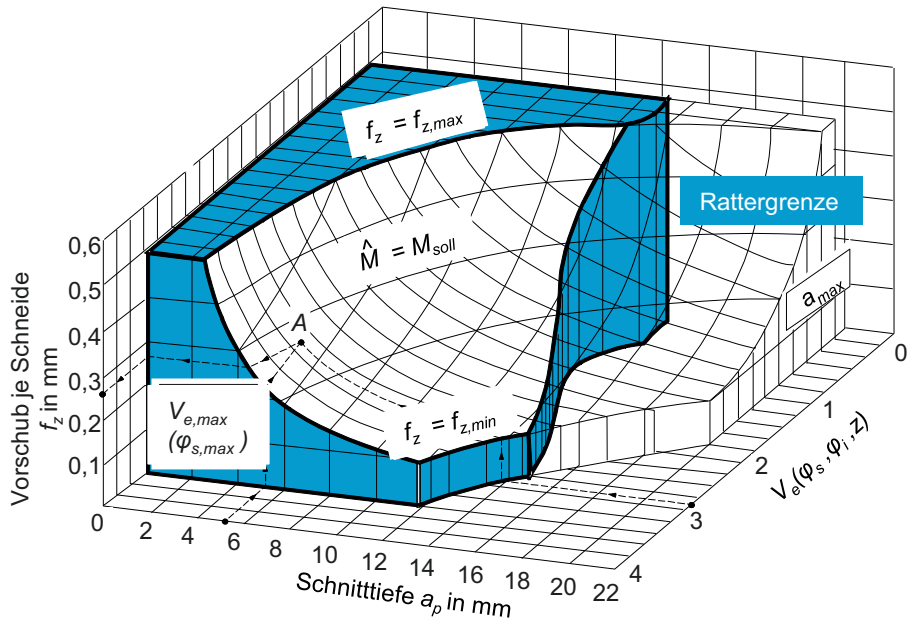


Bild 6.46 Regelbereich der Drehmomentenregelung

Legende

P_{max} = 15 kW	Maschinenspez. Parameter
v = 73 m/min	
M_{soll} = 880 Nm	
$f_{z,max}$ = 0,5 mm	
$f_{z,min}$ = 0,1 mm	Fräserspez. Parameter
a_{max} = 20 mm	
$k_{c1,1}$ = 2200 N/mm²	

liche Störgrößen wirken die Schnitttiefe a_p, die Materialfestigkeit $k_{c1,1}$ sowie der Verstärkungsfaktor V_e auf den Zerspanprozess ein. Diese Störeinflüsse haben ausschließlich auf die Streckenverstärkung der Regelstrecke Einfluss, während sich die Drehzahl n und die Zähnezahl z auf das Zeitverhalten der Regelstrecke auswirken.

Die Auslastung der Maschine wird von einem Drehmomentsensor erfasst. Da das Spindeldrehmoment beim Fräsen infolge des Zahneingriffsstoßes und der zeitlich variierenden Anzahl der im Eingriff befindlichen Zähne einen sägezahnähnlichen Verlauf annimmt, wurde dem Sensor ein Spitzenwertspeicher (Maximalwertspeicher) nachgeschaltet, sodass das während einer Fräserumdrehung aufgetretene maximale Drehmoment geregelt wird. Hierdurch lässt sich ein Schwingen des Regelkreises mit der Zahneingriffsfrequenz sowie auch eine Überlastung einzelner Fräserschneiden vermeiden. Als Regler wird ein PI-Regler benutzt, der sich selbsttätig an sich ändernde Fräserdrehzahlen und damit an das variable Zeitverhalten der Strecke anpasst sowie auf unterschiedliche Zähnezahlen bei verschiedenen Werkzeugen einstellbar ist. Die Ausgangsgröße des Reglers, der Vorschub je Zahn f_z, wird nach oben und unten begrenzt.

Bei kleinen Schnitttiefen a_p wird das entsprechende Drehmoment sehr gering. Der Regler versucht in diesem Fall durch Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit v_f das Sollmoment zu erreichen. Hierbei kann ein zu großer Vorschub je Zahn auftreten. Der Vorschub wird daher gezielt auf den vorgegebenen Wert $f_{z,max}$ begrenzt. Umgekehrt stellt sich durch eine zu große Schnitttiefe a_p der gegebene Wert $f_{z,min}$ ein. Sinnvollerweise müsste der Prozess abgebrochen und eine neue Schnittaufteilung durch den Maschinenbediener vorgenommen werden. Künftig ist es denkbar, dass die Maschinensteuerungen, wie im ▶ Kap. 6.3.1 für das Drehen beschrieben, in solchen Fällen selbstständig diese Schnittaufteilung ausführen.

Unter Berücksichtigung der Grenzen für die Stellgrößen $f_{z,min} \leq f_z \leq f_{z,max}$ und des Ratterbereichs erhält man den Regelbereich der Drehmomentregelung, wie er im Bild 6.46 für ein praktisches Beispiel gezeigt ist. Auf den Abszissen sind die Einflussgrößen Schnitttiefe a_p und Verstärkungsfaktor $V_e(\varphi_s, \varphi_i, z)$ aufgetragen.

Auf der Ordinate ist die Stellgröße der Regelung – der Vorschub je Schneide f_z – dargestellt, die sich in Abhängigkeit der Einflussgrößen einstellt. Die hyperbolisch gewölbte Fläche ist die des konstanten Drehmoments, hier des Solldrehmoments M_{soll}. Die Fläche $\hat{M} = M_{soll} = konst.$ beschreibt den Regelbereich der Drehmomentregelung. Dieser wird durch die schon erläuterten Grenzen $f_{z,min}$ und $f_{z,max}$, durch den

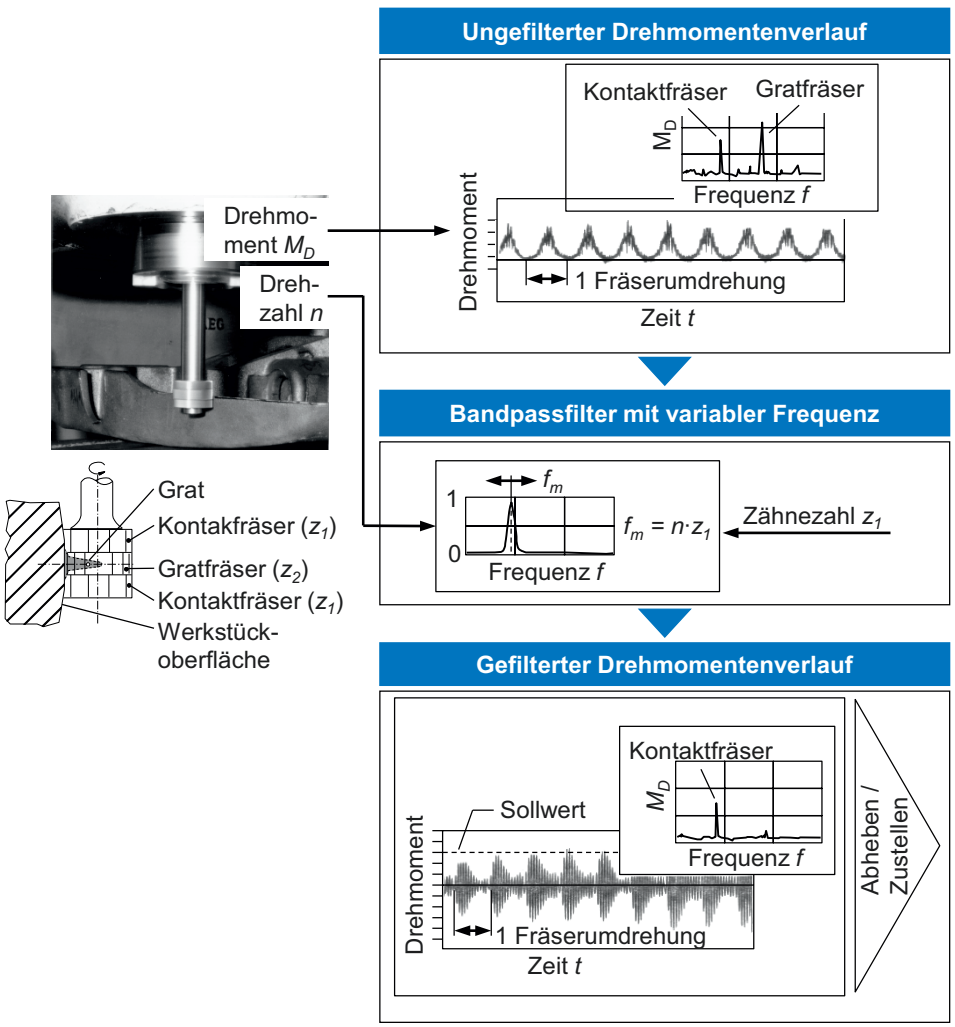
maximal möglichen Wert V_{emax} und durch die maximal mögliche Schnitttiefe a_{max} begrenzt. In den meisten praktischen Fällen verläuft die Rattergrenze, ähnlich wie im ◘ Bild 6.46 gezeigt [HEID89], mitten durch den Regelbereich und schränkt diesen beträchtlich ein. Die Rattergrenze wird von einer Vielzahl von Größen beeinflusst, sodass ihre Lage im Regelbereichsdiagramm großen Veränderungen unterworfen sein kann. Die technologischen, geometrischen und schwingungsbedingten Begrenzungen des Regelbereichs führen dazu, dass die Drehmomentregelung nicht alle Störgrößenschwankungen ausregeln kann. Beim Erreichen der übrigen Grenzen muss die im ▶ Kap. 6.3.2.5 beschriebene Ratterbeseitigungsstrategie eingreifen und die Zerspanparameter so verändern, dass die Drehmomentregelung wieder in sicherem Regelbereich arbeiten kann und der Sollwert aufrechterhalten bleibt.

6.3.2.4 Prozessregelung beim Gussputzen

Forschungsarbeiten haben sich im Rahmen der Prozessregelung auch mit Verfahren und Hilfsmitteln zum Entgraten von Gusswerkstücken beschäftigt [LENO93]. Gleichgültig ob hierzu Roboter oder Werkzeugmaschinen eingesetzt werden, ergeben sich immer Probleme bei der Programmierung der Rohteilkontur. Einerseits ist die Geometrie der Gussteile häufig nicht exakt bekannt, andererseits treten prozessbedingte Rohteiltoleranzen von bis zu 3 mm auf. Die Bearbeitung des Gussgrates mit NC-gesteuerten Maschinen kann also nur mit einer Online-Überwachung der Werkzeuglage zur Gussteiloberfläche mittels entsprechender Sensoren und einer wirksamen Bewegungsstrategie durchgeführt werden.

◘ Bild 6.47 zeigt ein Sensorsystem, das beim Umfangfräsen für die Gratbeseitigung eingesetzt werden kann. Das Fräswerkzeug besteht aus drei konventionellen Scheibenfräsern, die auf einem gemeinsamen Aufnahmedorn zusammengesetzt sind. Bei gleichem Durchmesser weisen die Fräserscheiben unterschiedliche Schneidenanzahlen auf.

Die Positionierung des Werkzeugs zum Grat geschieht derart, dass die Abarbeitung des Grates nur durch den mittleren Fräser erfolgt. Der Fräser wird so geführt, dass der obere oder untere Kontaktfräser die Oberfläche des Gussteils gerade berührt. Dieser Zustand wird dadurch erkannt, dass die Messereingriffsfrequenz dieser Fräser im Schnittkraft-,



◘ Bild 6.47 Funktionsprinzip des Sensorsystems zur Regelung der Putzqualität beim Umfangfräsen

Drehmoment- oder Körperschallsignal enthalten ist. Fehlt diese Frequenz im Signal, so wird das Werkzeug auf das Werkstück zubewegt. Ist dieses Signal zu groß, so wird das Werkzeug entsprechend zurückgenommen.

Analog kann auch beim Stirnfräsen vorgegangen werden, wenn an einem entsprechend vorbereiteten Stirnfräser die Axialkraft erfasst und wie oben beschrieben ausgewertet wird. Auf diese Weise braucht das NC-Programm nur ungefähr den Entgratweg zu beschreiben. Die richtige Lage des Fräsers wird durch die überlagerte Sensorführung erreicht. Hierzu muss die NC-Steuerung allerdings über die erforderlichen Schnittstellen verfügen.

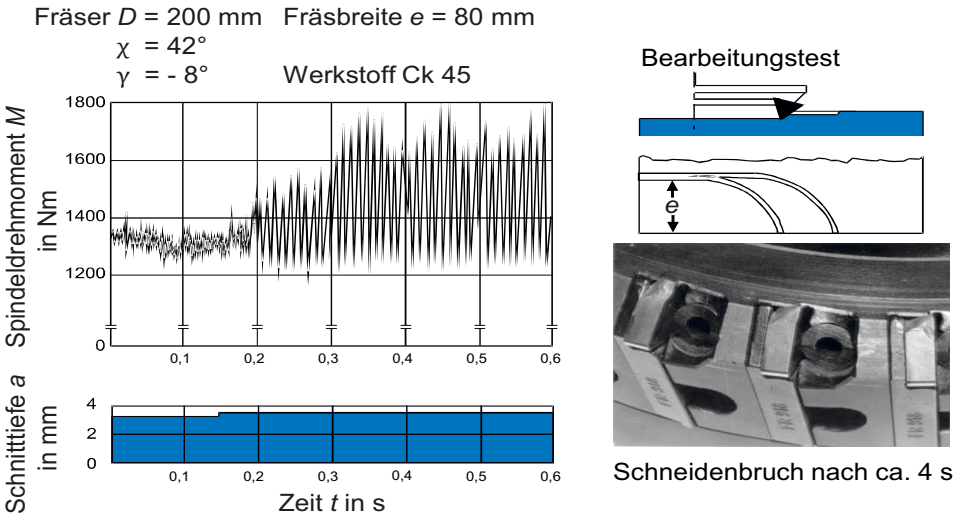


Bild 6.48 Auswirkungen von Ratterschwingungen an Fräsmaschinen

instabiler Zerspanung aufgetragen. Die Schwingungen traten nach einem Schnitttiefensprung von nur 0,5 mm auf, und nach 0,2 s war der dynamische Anteil des Drehmoments bereits um 600 Nm angestiegen. Solche hohen dynamischen Belastungen gefährden in starkem Maße Werkstück, Werkzeug und Maschine. Im vorliegenden Bearbeitungsfall waren

6.3.2.5 Automatische Ratterbeseitigung

Spanende Werkzeugmaschinen neigen unter bestimmten Bedingungen (vgl. ▶ Kap. 3, Band 2) zu instabilem Verhalten, d. h. selbsterregten Schwingungen. Beim Zerspanen wird eine Maschine grundsätzlich zum Schwingen angeregt. Die auftretende Frequenz wird durch das Nachgiebigkeitsverhalten des Maschinensystems bestimmt. Durch das Schwingen kommt es zu einer Verlagerung zwischen Werkstück und Werkzeug. Eine Schneide eines Fräsers erzeugt dadurch auf der Werkstückoberfläche eine Welligkeit. Greift die nachfolgende Schneide unter ungünstiger Phasenbeziehung in diese Welligkeit ein, so kommt es zur Spandickenmodulation und die Schwingung wird weiter aufgeschaukelt.

Charakteristisch für selbsterregte Schwingungen bei spanenden Werkzeugmaschinen ist, dass beim Überschreiten einer bestimmten Grenzschnitttiefe a_{cr} die Schwingungsamplituden schlagartig anwachsen. Im Bild 6.48 ist der Verlauf des Spindeldrehmoments beim Übergang von stabiler zu

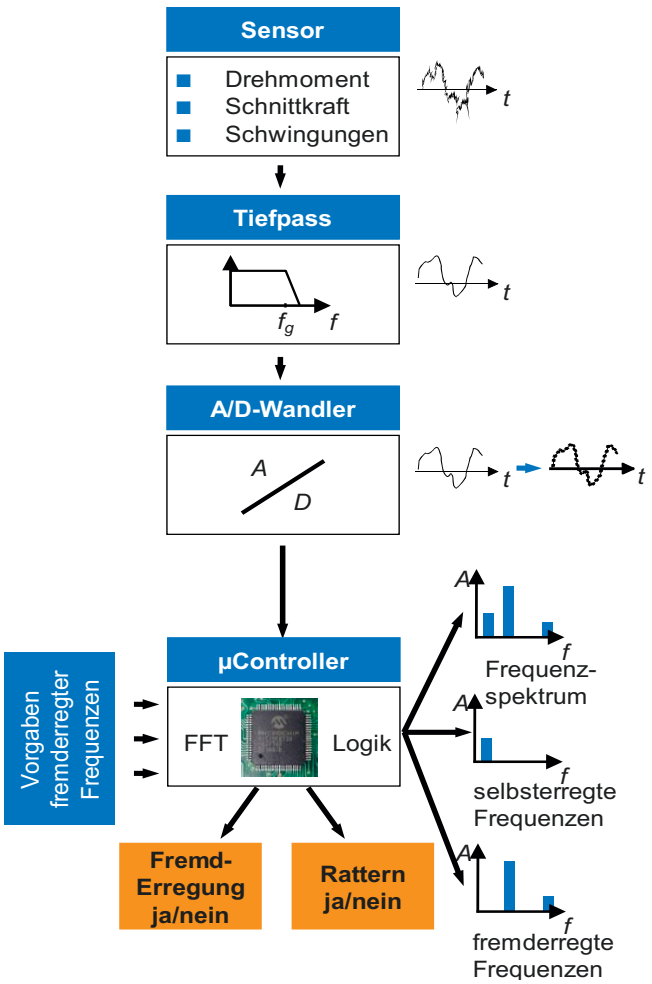


Bild 6.49 Aufbau eines Sensorsystems zur Rattererkennung ▶

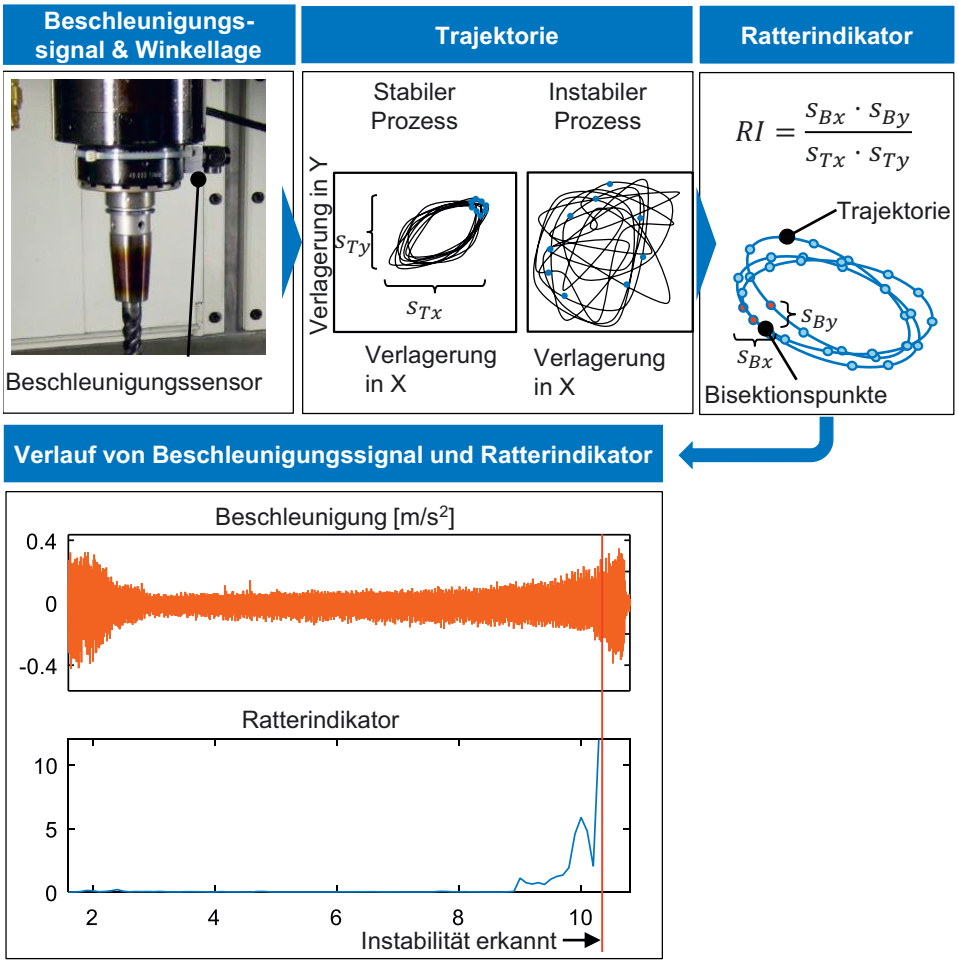


Bild 6.50 Bewertung der Prozessstabilität anhand der TCP-Verlagerung

nach ca. 4 s sämtliche Schneiden des Fräsers gebrochen. Um durch geeignete Maßnahmen den Fräsprozess automatisch in einen stabilen Arbeitsbereich zu führen, ist es notwendig, die selbsterregten Schwingungen des Ratterns prozessparallel zu erkennen, d. h. von fremderregten Schwingungen (z. B. durch Messereingriffsstöße) zu unterscheiden. Die Erkennung kann sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich erfolgen.

Bild 6.49 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Sensorsystems zur Erkennung von Ratterschwingungen im Frequenzbereich. Hierzu wird der Prozesszustand (stabil bzw. instabil) durch Auswertung der gemessenen Größen Drehmoment, Schnittkraft oder Maschinenschwingungen erfasst. Für die Beseitigung der Rauschsignale wird ein Tiefpassfilter verwendet und die digitalisierten Signale werden Fast-Fourier-transformiert, um das Frequenzspektrum zu erhalten [ÖZME00]. Im Frequenzspektrum eines stabilen Prozesses dominieren die Dreh- und Zahneingriffsfrequenz, sowie deren Harmonische, wohingegen bei einem instabilen Prozesses das Frequenzspektrum einen dominierenden Peak bei der Ratterfrequenz aufweist.

Die Identifikation des Prozesszustands wird durch Vergleich des prozessparallel aufgenommenen Frequenzspektrums mit dem erwarteten Frequenzspektrums bei einer stabilen Prozessführung ermittelt. Für eine robuste Identifikation der Prozessstabilität ist es daher notwendig, dass die aktuelle Drehzahl und kontextbezogene Technologiedaten zum aktuell eingesetzten Werkzeug bekannt sind, um aus diesen Informationen das erwartete Frequenzspektrum zu bestimmen. Eine prozessparallele Überwachung des Prozesszustands durch Analyse des Frequenzsbereichs wird z. B. von dem Werkzeugmaschinenhersteller Dörries Scharmann Technologie (DST) umgesetzt [BREC17a]. Durch integrierte Beschleunigungssensoren in der Hauptspindel kann das aktuelle Frequenzspektrum in einer Auswerteelektronik online bestimmt werden. Zusätzlich werden Drehzahl und kontextbezogene Technologiedaten aus der Maschinensteuerung an die Auswerteelektronik übertragen, um das zu erwartende Frequenzspektrum zu berechnen. Weicht das aufgenommene Frequenzspektrum vom berechneten Frequenzspektrum ab, so wird dem Maschinenbediner eine Warnung ausgegeben oder weitere Aktionen, wie z. B. ein Vorschubhalt, ausgelöst.

Das Vorgehen für eine Stabilitätsbewertung im Zeitbereich ist in Bild 6.50 anhand des am WZL entwickelten Verfahrens dargestellt. Die Stabilitätsbewertung des Prozes-

ses erfolgt mittels der gemessenen TCP-Verlagerung und der Winkelposition der Spindel nach dem Poincaré-Schnittprinzip [BREC17b]. Es werden die Verlagerungen in Vorschub- und Vorschubnormalenrichtung über ein definiertes Zeitintervall zweidimensional aufgetragen. Die entstehende Bahnkurve (Trajektorie) beschreibt die Bewegung des TCP für eine oder mehrere Spindelumdrehungen. Aus der Trajektorie werden Bisektionspunkte, die die TCP-Verlagerung zu einem definierten Spindeldrehwinkel beschreiben, bestimmt. Die Ermittlung der Prozessstabilität erfolgt über einen Ratterindikator, der das Verhältnis der Standardabweichung der Gesamttrajektorie zu der Standardabweichung der Bisektionspunktewolke beschreibt. Stabile Prozesse weisen eine klar abgegrenzte Kurvenschar und eine geringe Streuung der Bisektionspunkte innerhalb der sensitiven Ebene auf, sodass der Ratterindikator einen Wert nahe Null besitzt. Bei instabilen Prozessen hingegen ergibt sich eine chaotische Kurvenschar und eine hohe Streuung der Bisektionspunkte. Der Ratterindikator steigt beim Auftreten von Instabilitäten stark an.

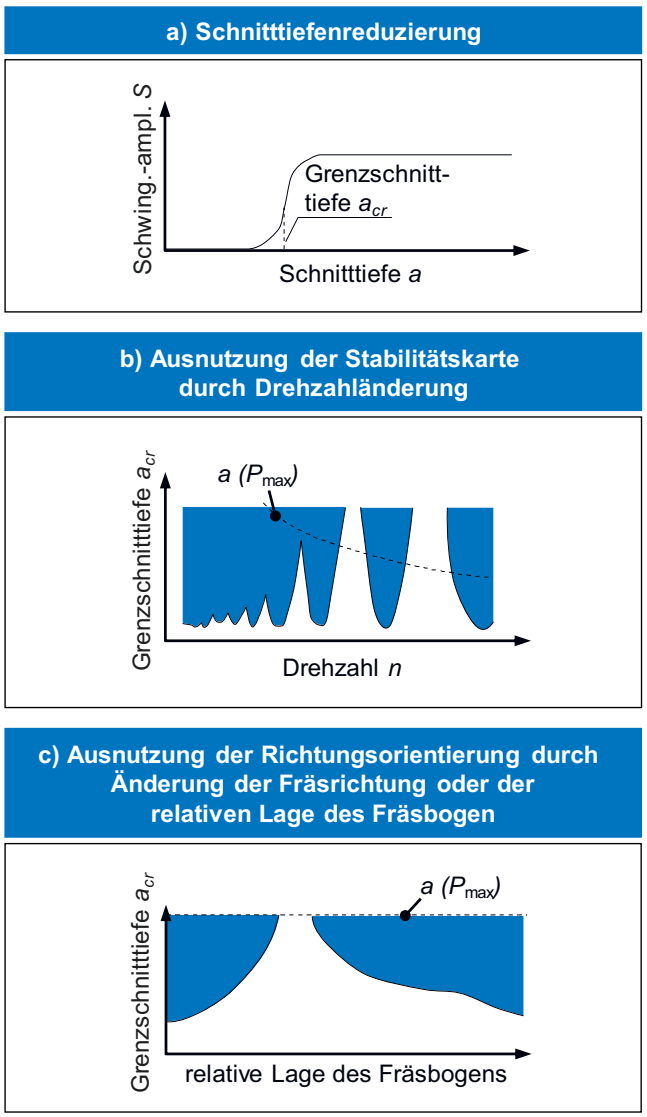


Bild 6.51 Mögliche Maßnahmen zur Beseitigung von Ratterschwingungen

Geeignete strategische Maßnahmen zur Beseitigung von Ratterschwingungen, die an Fräsmaschinen während der Bearbeitung (online) einzusetzen sind, leiten sich aus den bekannten, für Fräsmaschinen typischen Kennlinien ab, Bild 6.51. Die Schnitttiefenreduzierung ist die sicherste und wirkungsvollste Maßnahme zum Vermeiden von Ratterschwingungen, da sie in jedem Fall zu einer stabilen Bearbeitung führt. Diese Maßnahme hat jedoch den Nachteil, dass zusätzliche Schnitte notwendig werden. Die Steuerung muss in diesem Fall eine automatische Schnittaufteilung vornehmen. Kommerzielle Steuerungen sind dazu derzeit jedoch nicht in der Lage. Die weiteren im Bild 6.51 angegebenen Maßnahmen, die Drehzahländerung sowie die Ausnutzung der Richtungsorientierung, vermindern wegen ihrer stabilisierenden Wirkung die Zerspanleistung praktisch nicht, jedoch ist ihr Wirkungsbereich begrenzt.

Die Strategie der Drehzahländerung beruht auf der Ausnutzung der stabilen Bereiche in der Stabilitätskarte, in der der Verlauf der Grenzschnitttiefe a_{cr} über der Fräserdrehzahl n dargestellt ist [WECK77] (Bild 6.51 b). Dazu muss bekannt sein, in welchem Bereich der aktuellen Stabilitätskarte sich der Arbeitspunkt der Maschine bei der momentanen Drehzahl befindet. Sind die Drehzahlen aus der Stabilitätskarte, denen die untersten Punkte der instabilen Bereiche zugeordnet sind, bekannt, so kann man entscheiden, ob eine Drehzahlverminderung oder -erhöhung in einen stabilen Bereich zwischen zwei „Rattersäcken“ führt.

Besitzt das schwingungsfähige System näherungsweise Einmassenschwingerverhalten, lassen sich die kritischen Drehzahlen n_{cr} bestimmen, bei denen die Stabilitätsminima (d. h. die minimale Grenzschnitttiefe $a_{cr,\,\min}$) vorliegen:

$$n_{cr}(m) \approx \frac{f_{Ratter}}{z(m-0{,}25)} \tag{6.26}$$

mit:

$$m = 1,2,3\ldots \;;\; f_{Ratter} = Ratterfrequenz$$

Hierbei gibt m die Anzahl der Wellen zwischen zwei Messereingriffen an, die mit der Ratterfrequenz auf die Oberfläche geschnitten werden.

Zwischen diesen Stabilitätsminima liegen Bereiche höherer Stabilität, deren Maxima aufgrund des unsymmetrischen Verlaufs der instabilen Bereiche innerhalb der Stabilitätskarte nicht genau in der Mitte zwischen den Stabilitätsminima liegen. Die Stellen der Stabilitätsminima lassen sich durch folgende empirisch gefundene Näherungsformel beschreiben:

$$n_{st} = n_{cr}(m+1) + 0{,}6\left[n_{cr}(m) - n_{cr}(m+1)\right] \tag{6.27}$$

Den Aufbau der Ratterbeseitigungsstrategie, in der diese Beziehung für die Berechnungen benötigt wird, gibt das Fluss-

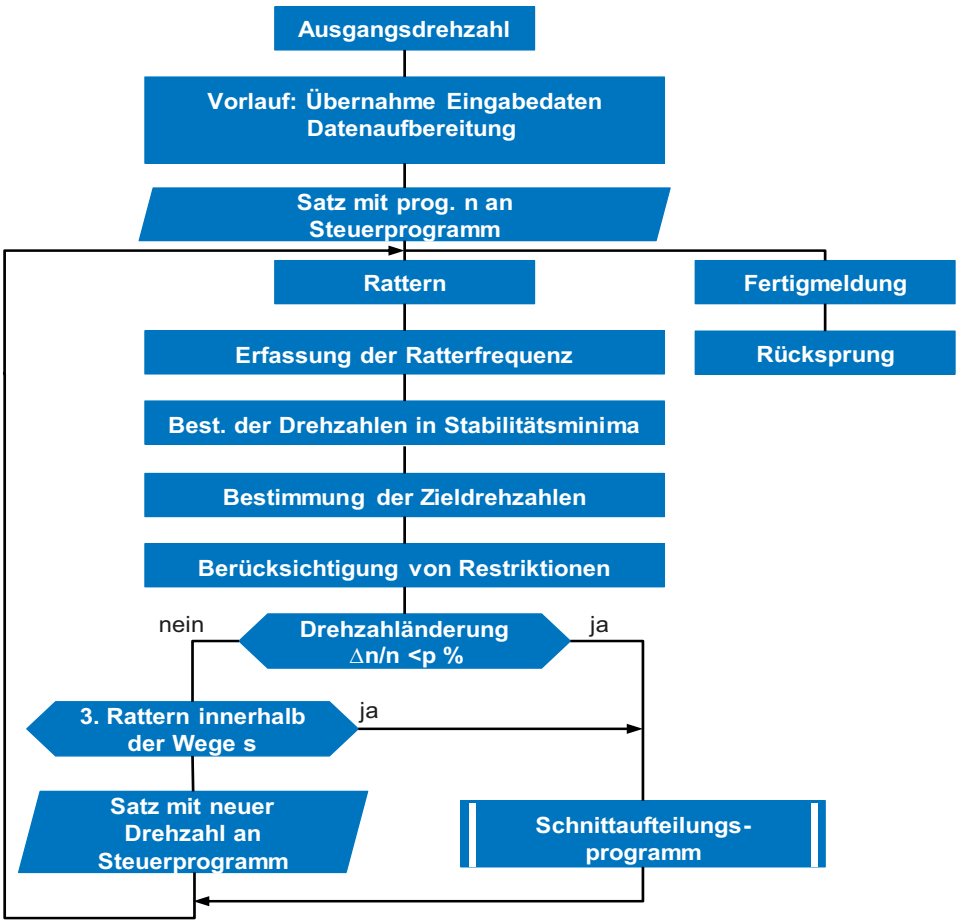


Bild 6.52 Prinzipielles Flussbild der Drehzahländerungsstrategie

bild, Bild 6.52, wieder. Ein Satz aus dem NC-Programm, für den die Drehzahl n programmiert ist, wird an das Steuerprogramm übergeben bevor die Bearbeitung beginnt. Tritt während der Bearbeitung Rattern auf, erfasst der Prozessrechner auf einen Alarm hin die Ratterfrequenz und bestimmt aufgrund der aktuellen Ratterfrequenz die Stabilitätsminima im Bereich der Drehzahlen sowie die benachbarten Zieldrehzahlen. Anschließend müssen Restriktionen bezüglich des zugelassenen Drehzahländerungsbereichs berücksichtigt werden [HEID89]. Der Drehzahländerungsbereich ist durch die zulässigen Schnittgeschwindigkeiten für den Fräsprozess festgelegt. Wenn ein Stabilitätsminimum durchfahren werden muss, um aus einem Ratterbereich in ein stabiles Gebiet der Stabilitätskarte zu gelangen, wird der Vorschub während der Drehzahländerung kurz unterbrochen. Hiermit lässt sich ein eventuelles Anschwellen der Ratterschwingungen vermeiden.

Bild 6.53 zeigt ein Beispiel für die Ratterbeseitigung durch Drehzahländerung. Im zugelassenen Drehzahländerungsbereich liegt kein Stabilitätsmaximum. Deshalb wird die Drehzahl bis an die Grenze des zulässigen Bereichs geregelt. Bei dieser Drehzahl ist der Fräsprozess wieder stabil. Im Bild 6.53 wurden übereinander das Spindeldrehmoment, das Amplitudenspektrum des Drehmomentsignals, der Ratteralarm und die Drehzahl des Hauptmotors aufgezeichnet. Im vorliegenden Beispiel wurde eine FFT im Bereich von 0 bis 250 Hz innerhalb von etwa 100 ms durchgeführt (vgl. Bild 6.49). Die Stabilisierung des Zerspanprozesses durch die Drehzahländerung ist deutlich zu erkennen. Die Lage der Drehzahlen ist vor und nach dem Eingriff in der Stabilitätskarte oben angedeutet.

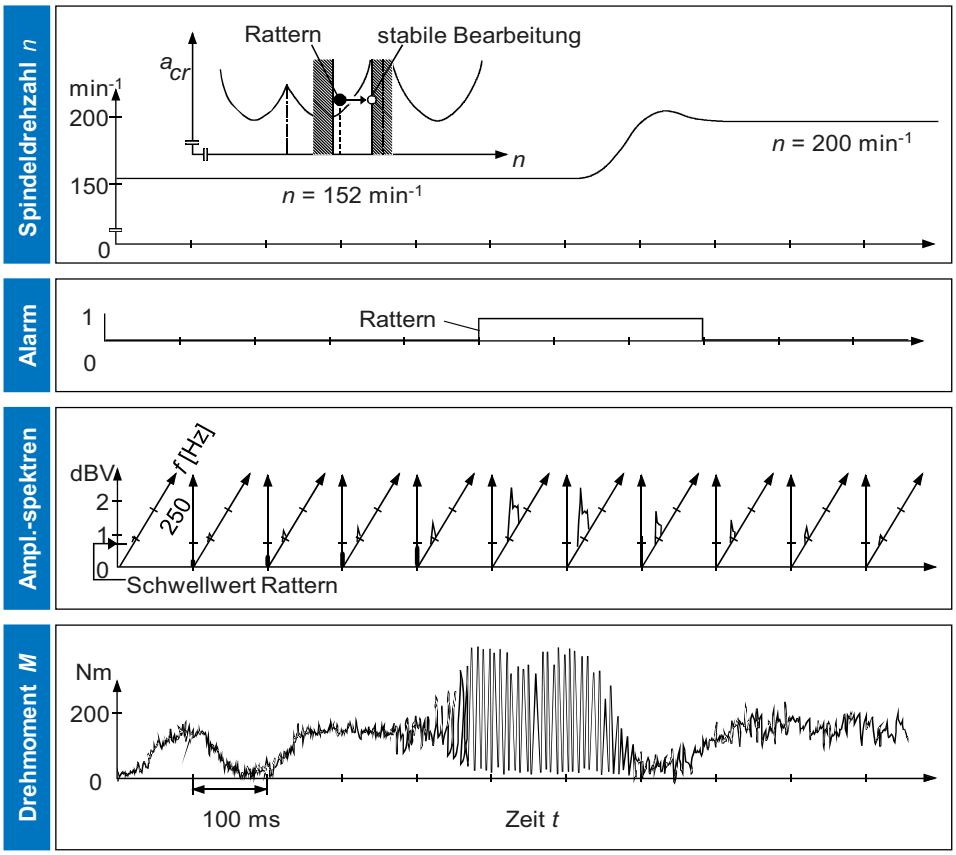
Eine andere Strategie zur Rattervermeidung basiert ebenfalls auf den elementaren Zusammenhängen bei selbsterregten Schwingungen. Hierbei wird beim Auftreten von Rattern die Spindeldrehzahl schrittweise geändert, bis der Fräsprozess wieder stabil arbeitet [WITT88].

Die zulässige axiale Schnitttiefe, unterhalb der der Messerkopffräsprozess gerade noch stabil arbeitet, wird beschrieben durch

$$a_{cr} = \frac{-1}{2 \cdot k_{cb} \cdot \mathrm{Re}\left\{ G_g(jf) \right\}_{neg}} \tag{6.28}$$

mit:

a_{cr}	Maximale axiale Schnitttiefe für Bearbeitung,
k_{cb}	Spezifischer dynamischer Schnittkraftkoeffizient des Werkstoffes,
$\mathrm{Re}\{G_b(if)\}_{neg}$	Negativer Realanteil der gerichteten Nachgiebigkeitsfunktion zwischen Werkstück und Werkzeug.



Fräserdaten	Bearbeitungsdaten
D = 200 mm z = 28 κ = 42° γ = -8°	a_p = 3 mm e = 60 mm f_x = 0,2 mm v = 90 – 125 m/min

Bild 6.53 Stabilisierung des Fräsprozesses durch automatische Drehzahländerung

Zwischen der Ratterfrequenz f_{Ratter} und der Zahneingriffsfrequenz $n \cdot z$ des Fräsers existiert die Beziehung:

$$f_{Ratter} = n \cdot z \left(m + \frac{\varepsilon}{2\pi} \right) \tag{6.29}$$

mit:

f_{Ratter} auftretende Ratterfrequenz,
n Spindeldrehzahl,
z Zähnezahl des Fräsers,
$m = 1, 2..$ Zahl der Welen zwischen zwei Messereingriffen.

Die Phasenverschiebung ε zwischen der Schwingung des schneidenden Zahns und der Welligkeit, die durch die vorherige Schneide verursacht wurde, ist für den Fall des Stabilitätsrandes beschrieben durch:

$$\varepsilon = 2\pi - \arctan\left(\frac{\mathrm{Re}\{G_g(jf)\}}{\mathrm{Im}\{G_g(jf)\}} \right) \tag{6.30}$$

Die grafische Darstellung der Zusammenhänge zeigt Bild 6.54, wobei der gerichtete Frequenzgang eines vereinfachten Maschinensystems in Form eines Einmassenschwingers zugrunde gelegt wurde. Das Bild 6.54a gibt die Stabilitätskarte für den Prozess wieder. Im Bild 6.54b ist die sich einstellende Ratterfrequenz dargestellt. Zusätzlich sind die Geraden der Zahneingriffsfrequenz $n \cdot z$ sowie deren $1/m$-fache ($m = 2,3$) $2 \cdot n \cdot z$ und $3 \cdot n \cdot z$ in Abhängigkeit zur Drehzahl n eingezeichnet. Mit abnehmender Drehzahl werden bei gleichbleibender Ratterfrequenz mehrere Wellen (m) zwischen den Messereinschnitten auf der Oberfläche abgebildet.

Zu beachten ist, dass in den Punkten maximaler Stabilität die Phasenverschiebung ε zwischen der Schwingung des schneidenden Zahns und der Welligkeit auf der Werkstückoberfläche, die durch den vorherigen Zahn erzeugt wurde, gerade $\varepsilon = m \cdot 2\pi$ beträgt. In diesem Fall tritt keine Spandickenmodulation auf, die zu einem Aufschaukeln der Schwingungen führt. Mit $\varepsilon = 0$ bzw. $\varepsilon = m \cdot 2\pi$ wird aus Gleichung (6.29):

$$n \cdot z = \frac{f_{Ratter}}{m} \tag{6.31}$$

Für ein Fräsprozessbeispiel sei die Schnitttiefe a sowie eine Fräserdrehzahl n_A zunächst vorgegeben, Punkt A im Bild 6.54 a. Die bei dieser Drehzahl auftretende Zahneingriffsfrequenz bzw. deren $1/m = 1/2$-fache ist im Bild 6.54 b durch die Punkte A' und A'' auf den Geraden $n \cdot z$ bzw. $2 \cdot n \cdot z$ gekennzeichnet. Dieser Arbeitspunkt liegt im instabilen Bereich. Es tritt Rattern mit der Frequenz f_1 auf (Bild 6.54 b). Diese Frequenz wird mit Hilfe eines entsprechenden Sensorsystems gemessen (vgl. Bild 6.49). Das Regelsystem, dem die Zähnezahl des Fräsers bekannt sein muss, berechnet nun eine neue Spindeldrehzahl, sodass die Zahneingriffsfrequenz $n \cdot z$ genau der gemessenen Ratterfrequenz entspricht. Im Bild 6.54 b wandert der Punkt A' auf der Geraden $n \cdot z$ in den Punkt B. Der Vorgang wiederholt sich ggf., wenn die neu angewählte Drehzahl noch nicht im stabilen Bereich liegt. Auf diese Weise wird der Arbeitspunkt schrittweise in den stabilen Bereich gefahren. Die Vorgehensweise bewirkt eine Verschiebung der Phasenbeziehung ε zwischen der schwingenden Werkzeugschneide und der Welligkeit auf der Werkstückoberfläche in Richtung auf den Betrag $m \cdot 2\pi$. Bei dieser Phasenverschiebung tritt praktisch keine Spandickenmodulation auf.

Ist z. B. aufgrund der Leistungsfähigkeit der Maschine oder aufgrund technologischer Randbedingungen eine obere Drehzahlgrenze vorgegeben, so kann auch durch eine Drehzahlreduktion eine Stabilisierung des Prozesses erfolgen. Die Spindeldrehzahl wird dann soweit reduziert, dass die nächste $1/m$-fache (m=2) Zahneingriffsfrequenz, $2 \cdot n \cdot z$, genau der gemessenen Ratterfrequenz entspricht. Im Bild 6.54 a wandert der Punkt A'' in den Punkt C. Wie in der Stabilitätskarte

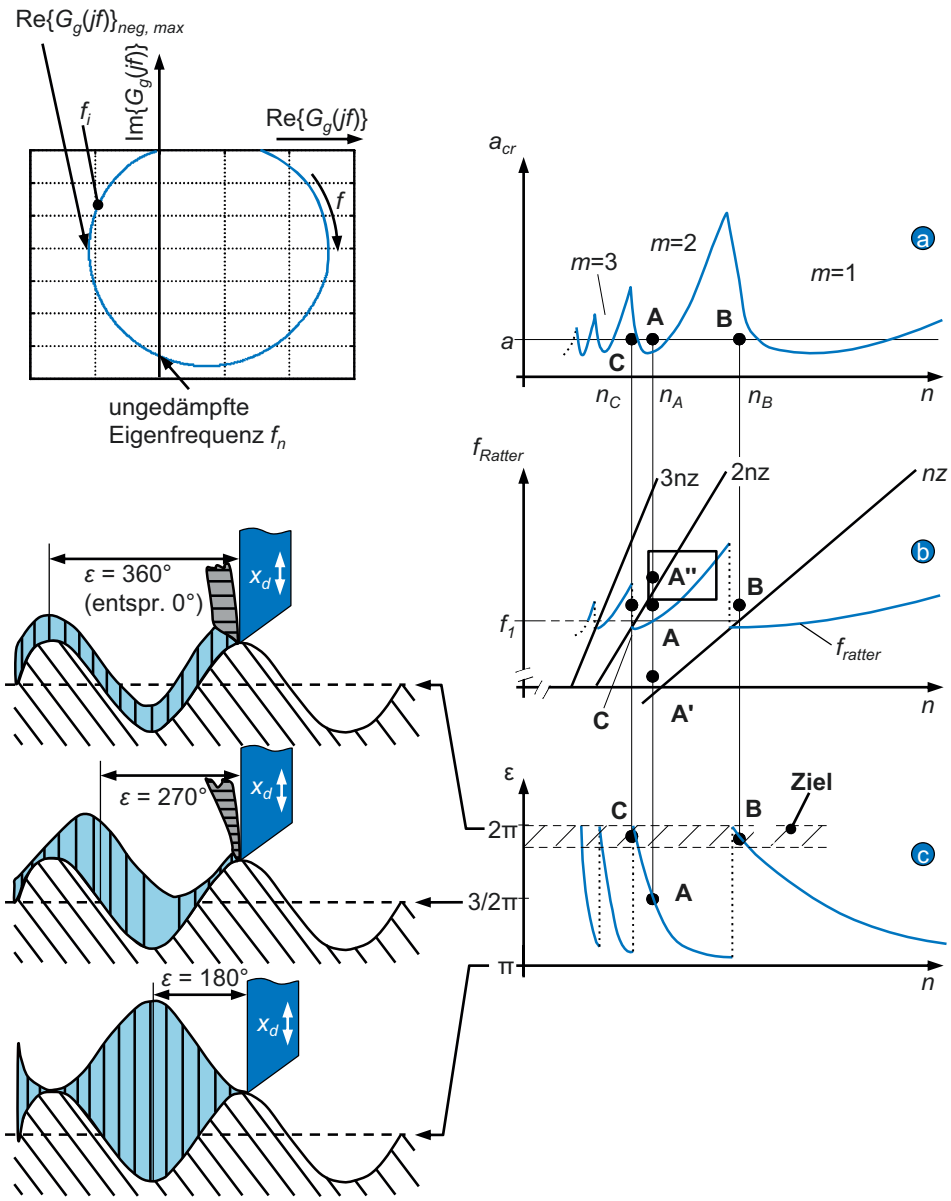


Bild 6.54 Verschiebung des Arbeitspunktes in Bereiche stabiler Bearbeitung. Nach Tlusty

zu sehen ist, liegt dieser Punkt ebenfalls im ratterfreien Arbeitsbereich, jedoch einen Rattersack tiefer ($m = 2$). Wie die Stabilitätskarte im Bild 6.54 a zeigt, ist das Auffinden einer geeigneten Drehzahl zwischen den Rattersäcken $m = 1$ und $m = 2$ sehr gut möglich. Die stabilen Bereiche werden mit niedrigeren Drehzahlen, d. h. mit zunehmenden m-Werten der Rattersäcke, merklich kleiner. Für m-Werte größer 6 lohnt sich die Suche nach einem stabilen Bereich kaum noch.

Die Erfahrungen beim Einsatz dieser Regelstrategie für verschiedene Bearbeitungsfälle haben gezeigt, dass maximal drei Iterationsschritte notwendig sind, um nach dem Auftreten von Rattern den Prozess zu stabilisieren [WITT88]. Gibt es jedoch für eine vorgegebene Schnitttiefe in der Stabilitätskarte keine Bereiche, in denen eine Stabilisierung möglich ist, so hilft nur noch eine Schnitttiefenreduzierung.

6.3.3 Bohren

6.3.3.1 Prozessüberwachung beim Bohren und Tiefbohren

Das Bohren mit Spiralbohrern ist ein sehr häufig angewandtes Bearbeitungsverfahren. Der Überwachung des Bohrprozesses kommt eine verhältnismäßig große Bedeutung zu. Das Potenzial einer Kostenreduktion durch eine Werkzeugüberwachung liegt hierbei weniger in der Einsparung von Werkzeugen, da Spiralbohrer relativ preiswerte Artikel sind. Vielmehr sind die Folgeschäden, die durch einen Bohrerbruch entstehen, weitaus höher zu bewerten. Meistens bleibt ein Stück des gebrochenen Bohrers im Material stecken, wodurch bereits weitgehend bearbeitete und damit teure Werkstücke unbrauchbar werden. Weiterhin werden Nachbearbeitungswerkzeuge (z. B. Gewindebohrer, Reibwerkzeuge) durch das Auffahren auf das Bruchstück ebenfalls zerstört.

Für die Bohrerbruchüberwachung werden als mechanische Sensoren Taster verwendet, mit denen ein Antasten und damit in Verbindung mit den Wegmesssystemen eine Bestimmung der Werkzeuglänge möglich ist. Als optische Sensoren kommen Lichtschrankensysteme zum Einsatz. Eine ein- oder zweidimensionale Bilderfassung ist mit Hilfe von Photodiodenarrays möglich, die auf einer Linie bzw. auf einer Fläche verteilt sind. Im Bild 6.55 und Bild 6.56 sind einige Anwendungsbeispiele für mechanische und optische Sensoren aufgeführt, die in Systemen zur Werkzeugüberwachung eingesetzt werden. Die hier aufgeführten Verfahren arbeiten intermittierend, d. h. während der Bearbeitungspausen des Werkzeugs.

Bild 6.55 a zeigt einen schaltenden Taster, auf den der Bohrer durch die Maschine gedrückt wird. Im Augenblick des Schaltens des ersten Mikroschalters wird die Lage des Werkzeugschlittens erfasst und somit die Werkzeuglänge bestimmt. Werkzeugbruch und falsche Werkzeuglängeneinstellung können auf diese Art festgestellt werden.

Anstelle der schaltenden Abtasteinrichtungen kann ebenfalls im Arbeitsraum der Maschine ein messendes Tastersystem zum Einsatz kommen, das ein allseitiges Abtasten (axial und radial) ermöglicht (Bild 6.55 b). Damit ist neben der Möglichkeit der Bohrerbrucherkennung (Werkzeuglänge) auch für Fräswerkzeuge ein Werkzeugverschleiß über die Messung des Werkzeugdurchmessers im 1/100-mm-Bereich feststellbar.

Den Aufbau einer optischen Kontrollvorrichtung zur Bohrerbrucherkennung zeigt Bild 6.56 a. Auf dem Verfahrweg zwischen Grundstellung und Bearbeitungsposition wird die Bohrerspitze abgetastet. Dieses System ist zur Werkzeugbruch- und Werkzeugfehltüberwachung geeignet.

Für die Überwachung von Mehrspindelköpfen werden Kamerasysteme eingesetzt, Bild 6.56 b. In einem Lernzyklus wird der Mehrspindelkopf durch die Kamera aufgenommen und das Bild im Überwachungsmodul gespeichert.

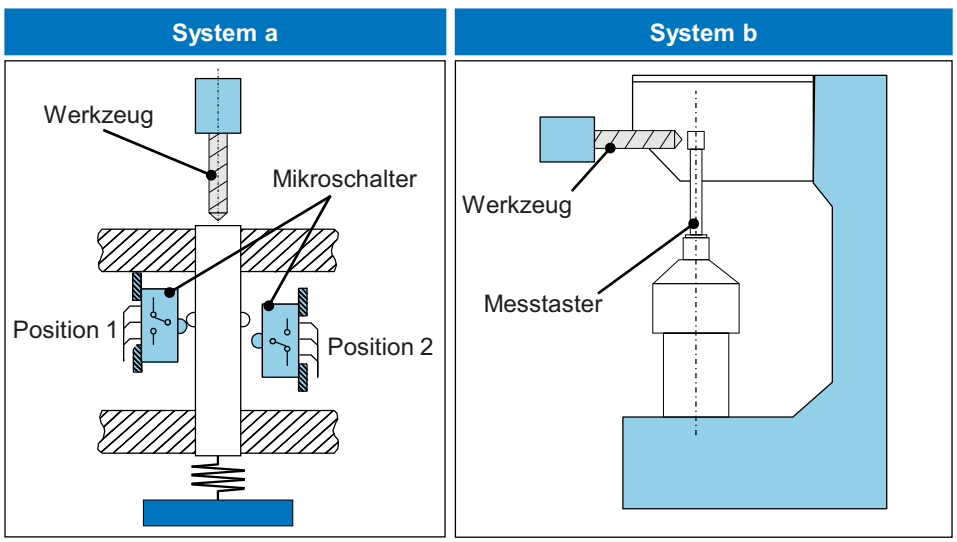


Bild 6.55 Systeme zur Bohrerbrucherkennung mit mechanischen Sensoren.

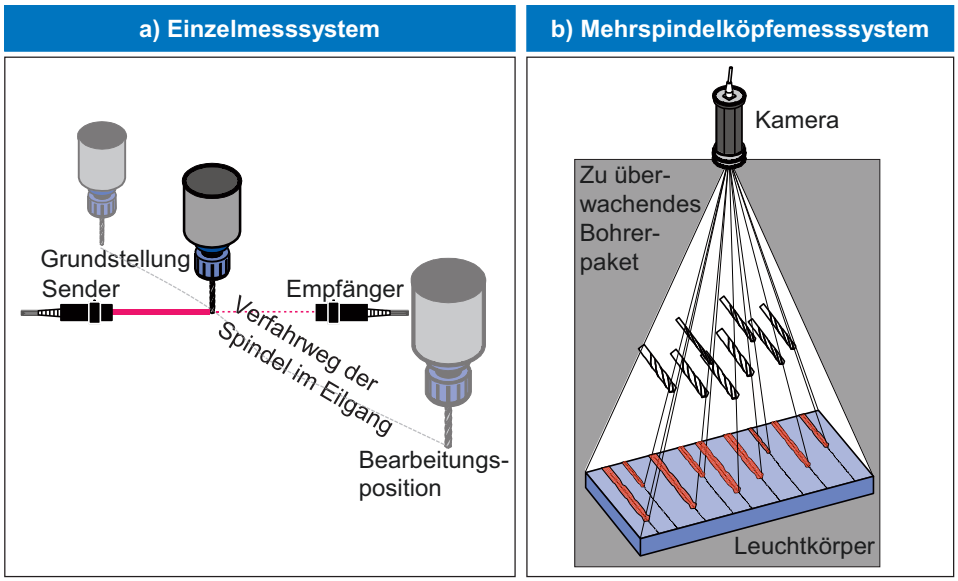


Bild 6.56 Systeme zur Bohrerbrucherkennung mit optischen Sensoren. Quelle: MARPOSS Monitoring Solutions

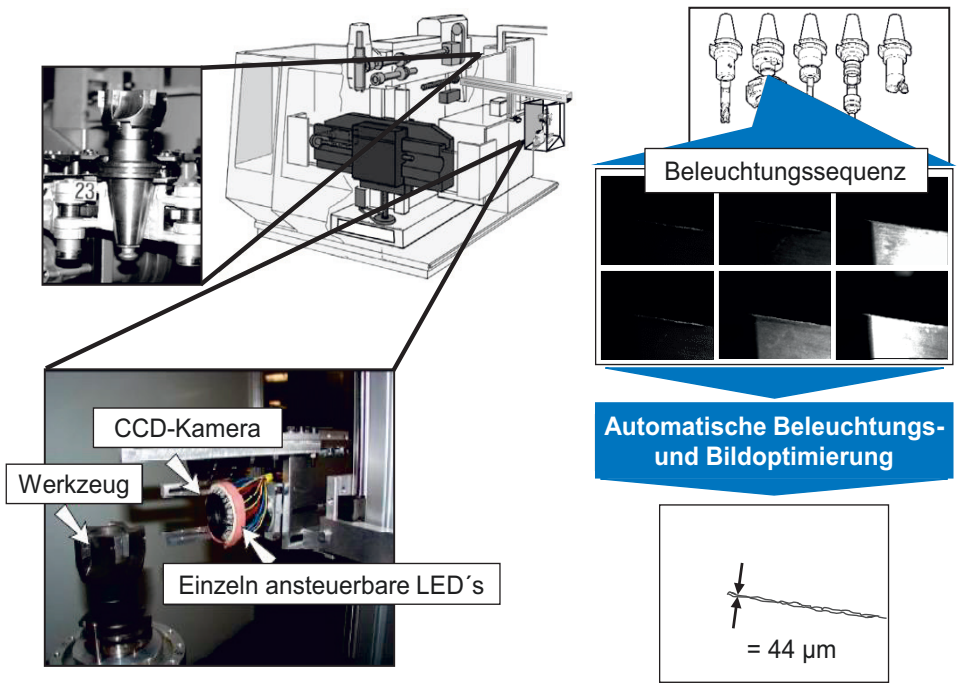


Bild 6.57 Einsatz einer CCD-Kamera mit angeschlossener Bildverarbeitung zur Verschleißmessung an Bohrern. Quelle: Pfeifer

Anschließend wird die Kontur des gelernten Soll-Bildes mit der Kontur des aktuell aufgenommenen Ist-Bildes verglichen. Auf diese Weise wird das Fehlen und der Bruch einzelner Bohrer überwacht.

CCD-Kameras eignen sich auch zur genauen Bestimmung von Verschleißmarkenbreiten an den Hauptschneiden eines Bohrers. Das Bild 6.57 zeigt eine Anordnung mit einer Kamera im Werkzeugmagazin eines Bearbeitungszentrums. Hauptzeitparallel werden die im Magazin befindlichen Bohrer unter der Kamera betrachtet. Ein Bildverarbeitungssystem erkennt anhand von Lichtreflexionen und Schattenbildung die Verschleißmarke an der Schneide und vermisst ihre Größe exakt [PFEI99].

Bei geringen Veränderungen der Beleuchtung, des Werkzeuges oder der Verschleißart stellen sich leicht andere Bildverhältnisse ein. Dies hat den Effekt, dass sich schlagartig Reflexe oder Schattenwürfe dem Bild überlagern. Somit geht Information im Bild verloren (Helligkeitsübersteuerung) oder zusätzliche „falsche“ Konturen treten im Bild auf. Daher wurde ein breit einsetzbares Bildoptimierungsverfahren entwickelt: nach einem festen Schema wird die Beleuchtung der Schneide bei der Bildaufnahme variiert. Durch Vergleich der Bilder erkennt das System, welche Konturen im Bild ihre Lage verändern, also in Abhängigkeit der Beleuchtung wan-

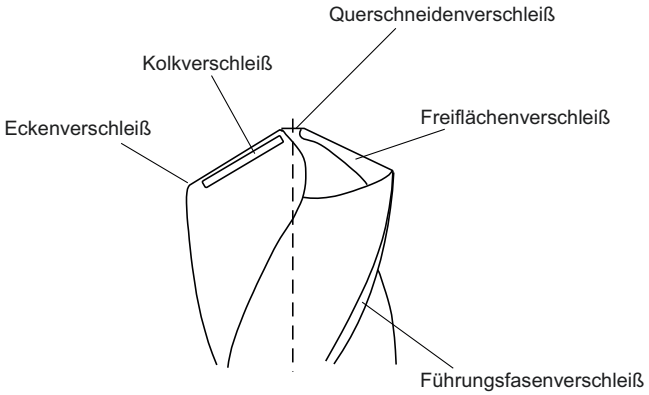


Bild 6.58 Verschleißformen an einem Spiralbohrer

dern. Dies sind „falsche" Konturen von Reflexen oder Schattenwurf und werden im Konturbild eliminiert. Es verbleibt also ein Bild mit der „wahren" Verschleißkontur, die nun sicher ausgewertet werden kann.

An einem Spiralbohrer treten die unterschiedlichsten Verschleißformen auf, Bild 6.58. Die Auswirkungen der einzelnen Verschleißarten auf statische und dynamische Kräfte und Drehmomente ebenso wie auf die Entstehung von Schallschwingungen sind eingehend untersucht worden [HIMB88].

Als für die Praxis tauglich hat sich dabei ein Überwachungsverfahren durchgesetzt, das auf der Erkennung von Schwingungen beruht, die typischerweise kurz vor dem Eintritt des Bohrerbruchs entstehen. Durch einen starken

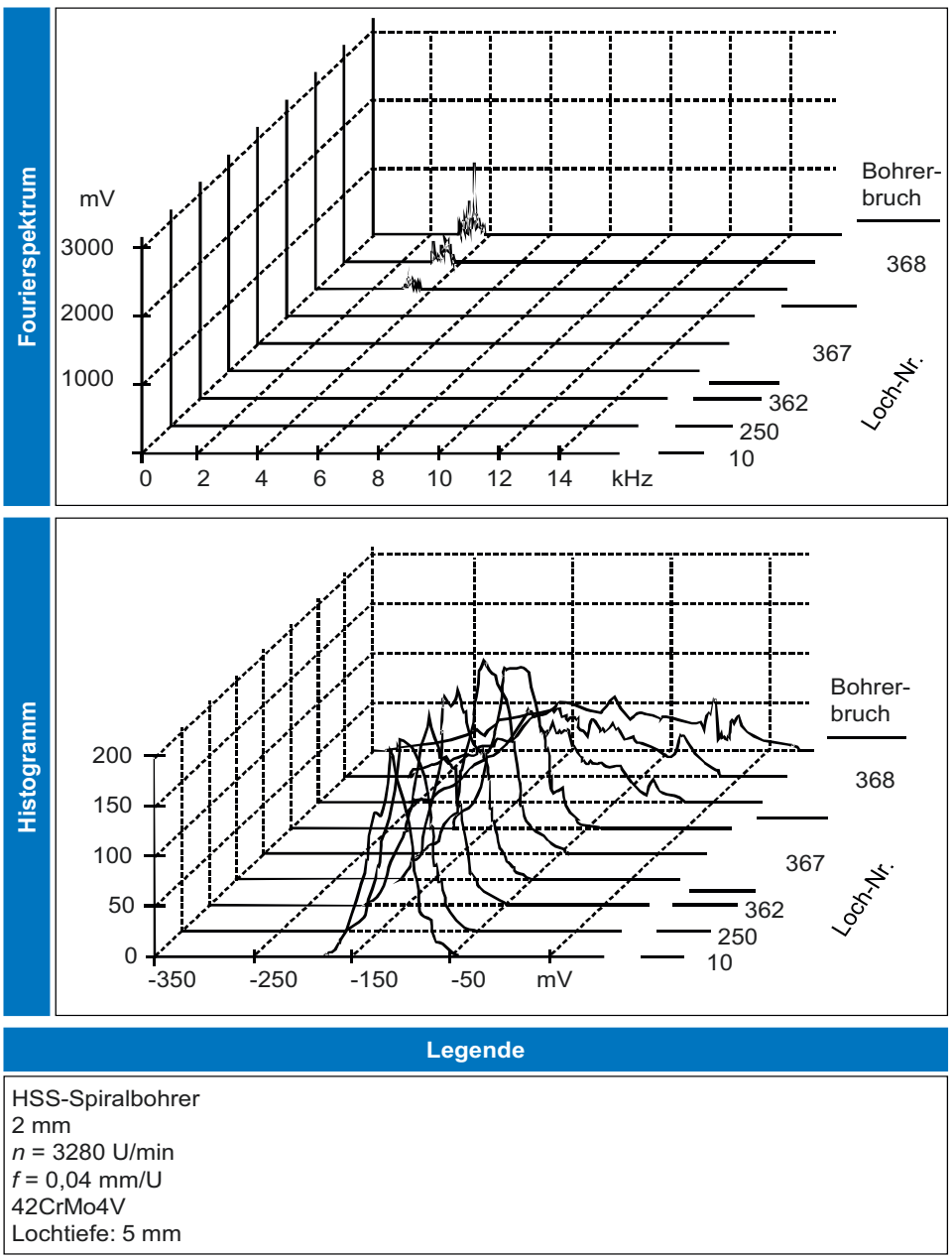


Bild 6.59 Schwingungen im Körperschall kurz vor dem Bruch eines Spiralbohrers

Legende

HSS-Spiralbohrer
2 mm
n = 3280 U/min
f = 0,04 mm/U
42CrMo4V
Lochtiefe: 5 mm

Ecken- und Führungsfasenverschleiß verklemmt sich ein Bohrer kurzeitig in dem Bohrloch, tordiert und reißt sich wieder los. Hierdurch werden Schwingungen angeregt, die sich in der Axialkraft und im Drehmoment feststellen lassen. Im Körperschall sind diese Schwingungen auch bei kleinen Bohrern noch sehr deutlich zu erkennen, Bild 6.59. Kurz nach dem Auftreten dieser Schwingungen bricht der Bohrer infolge der starken statischen und dynamischen Belastung.

Die auftretenden Schwingfrequenzen können sehr weit streuen. Sie sind abhängig von den Schwingungseigenschaften des Gesamtsystems, bestehend aus Maschine, Werkstück, Werkzeug und Einspannvorrichtungen. In der Regel reicht die breitbandige Messung des Summenpegels des Körperschalls zur Überwachung des Bohrprozesses aus. Das Auftreten der Bohrerschwingungen ebenso wie der heftige Schallimpuls, der bei einem Spontanbruch des Werkzeugs entsteht, wird durch das Überschreiten eines festen Grenzwertes festgestellt.

Ein weiteres sehr eindeutiges Kriterium ist die Streubreite im Verlauf des Histogramms (Amplitudendichteverteilung) des Körperschallzeitsignals. Bei ungestörter Bearbeitung geht vom Bohrprozess und von der Maschine ein Rauschen aus, dessen Amplitudendichteverteilung einer Gaußfunktion ähnelt, Bild 6.59 unten. Die Streubreite dieser Verteilung wird durch das Auftreten zusätzlicher Schwingungsamplituden im Zeitsignal größer.

Zur Überwachung des Bohrens werden in der Praxis auch verschiedene Sensorsysteme eingesetzt, die auf der Messung der Vorschubkraft beruhen. Mit zunehmendem Stumpfwerden des Bohrers steigt bei gleicher Vorschubgeschwindigkeit die Vorschubkraft an. Bild 6.60 zeigt einen Sensor, bei dem die Vorschubkraft am Axiallager der Kugelrollspindel mit Hilfe eines speziell ausgebildeten Verformungskörpers, der als Träger des Lagers mit DMS bestückt ist, gemessen wird [EVER93]. Rechts im Bild sind typische Signalverläufe des Sensors mit zwei Grenzwerten skizziert.

Voraussetzung zum Einsatz dieses Sensors ist die Möglichkeit des Einbaus einer zusätzlichen Kraftmesshülse, in die das Axiallager integriert wird. Wenn dies aus konstruktiven Gründen nicht möglich ist, können sogenannte Kraftmesslager eingesetzt werden, Bild 6.61.

Hierzu werden serienmäßige Lager am Außenring mit einer umlaufenden Nut versehen. Mit Hilfe von entsprechend angebrachten DMS kann so die vom Lager übertragene Kraft gemessen werden. Diese Lagerkräfte sind mit der Überrollfrequenz der Wälzkörper moduliert, sodass das Signal zunächst tiefpassgefiltert werden muss. Für dynamische Messungen, z. B. Erfassung von Ratterschwingungen, ist diese Lösung nicht gut geeignet. Prinzipiell lassen sich solche Lager für Radial- und Axialkraftmessung präparieren.

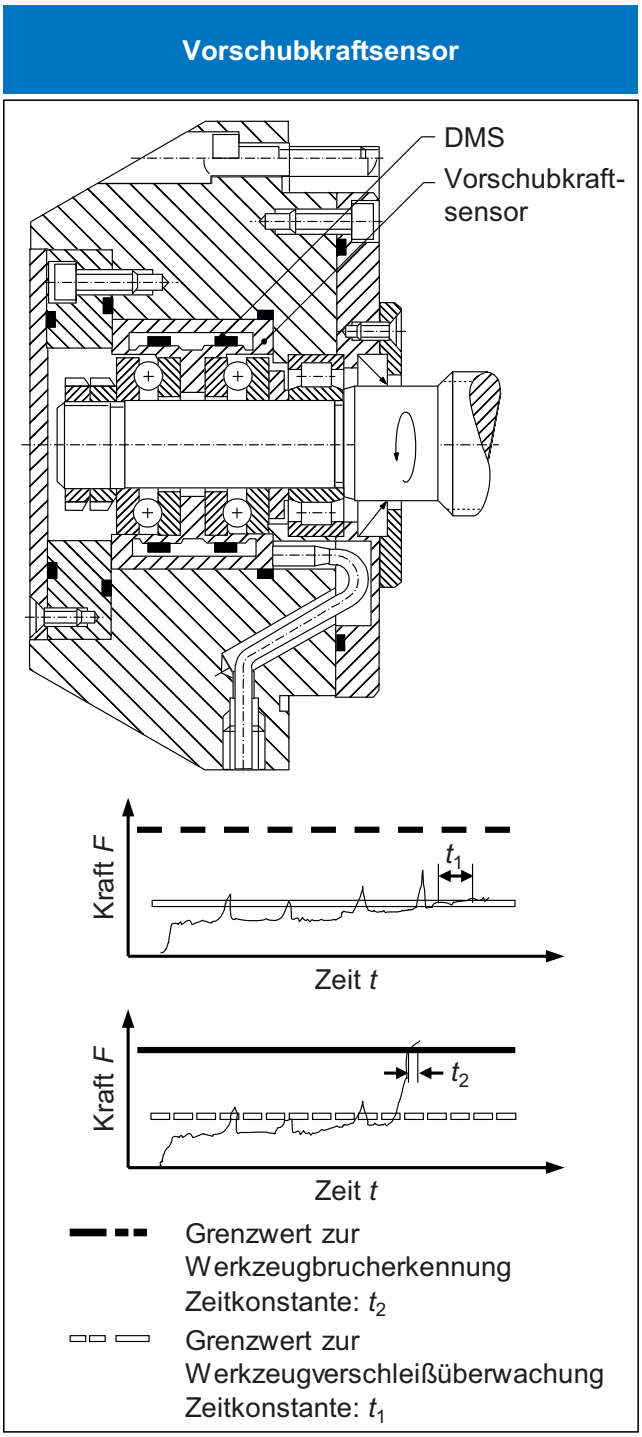


Bild 6.60 Vorschubkraftsensor zur Prozessregelung und –überwachung. Nach Sandvik Coromant

Die Überwachung des Bohrens mit Hilfe des Stroms im Haupt- oder Vorschubmotor wird ebenfalls häufig praktiziert. Hierbei treten jedoch zusätzliche Fehler durch Reibungsverluste im Antriebsstrang (Riementrieb, Getriebe) auf. Dynamische Vorgänge können nur im sehr niederfrequenten Bereich erfasst werden. Die Trägheit der mechanischen Bauteile bewirkt eine extreme Tiefpassfilterung. Für größere Bohrerdurchmesser ist die Motorstromüberwa-

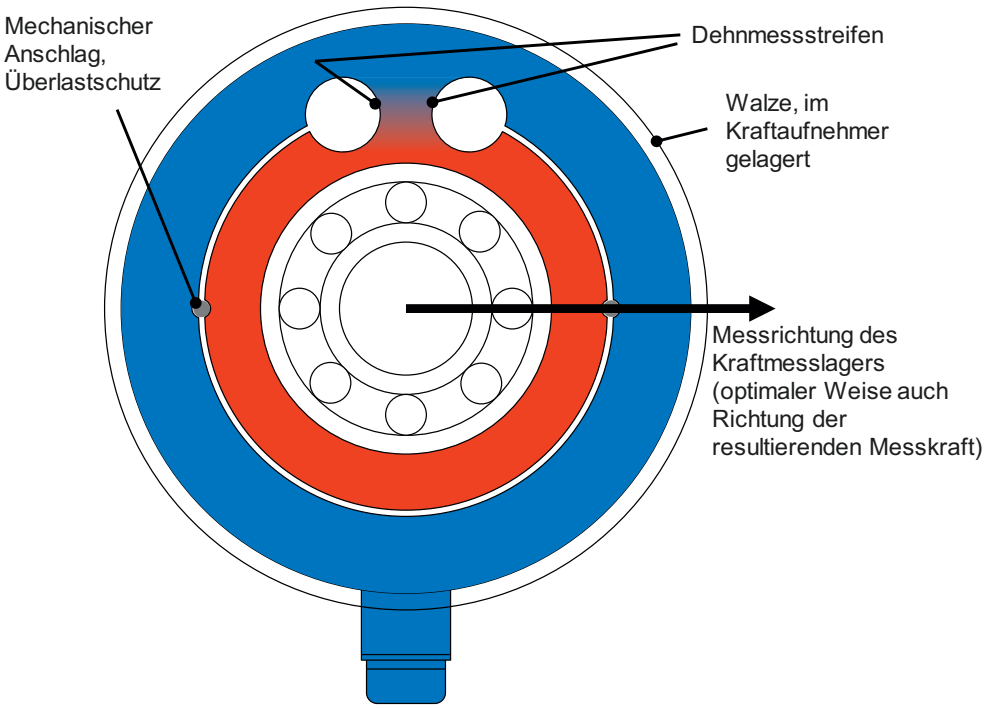


Bild 6.61 Aufbau und Funktionsweise eines Kraftmesslagers. Nach Promess

chung dennoch ein in der Praxis gut funktionierendes Verfahren.

Eine wesentliche Verbesserung ließ sich mit dem in ▶ Kap. 6.3.2.2 beschriebenen steuerungsinternen Überwachungssystem erreichen. Bei diesem System werden die auftretenden Reibungs- und Beschleunigungseffekte unter Verwendung von in der Steuerung zugänglichen Informationen über Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung kompensiert.

Die Herstellung langer Bohrungen nach dem Tiefbohrverfahren erfordert einen konstanten Kühlschmiermittelkreislauf zur Kühlung und Schmierung von Schneide und Stützleisten. Gleichzeitig ist er für einen kontinuierlichen Späneabfluss aus der Bohrung verantwortlich. Der Späneabtransport durch die lange Bohrstange erfordert kurzbrechende Späne, die durch konstruktive Ausgestaltung der Schneide (Schneidenaufteilung, Spanleitstufe) und durch geeignete Zerspanparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschub) erzielt werden.

Die Spänefluss- und Spanformerkennung sind eine notwendige Voraussetzung zur Automatisierung des Tiefbohrprozesses. Eine Möglichkeit der Spanformerkennung ist über die Bestimmung der Spanbruchfrequenzen möglich. Bild 6.62 zeigt die prinzipielle Anordnung eines hierfür einsetzbaren induktiven Ringsensors [ROSE94]. Die speziell für die Bohrspindel konstruierte Düse im Kühlmittelrücklauf ist notwendig, um im Bereich der Messstrecke eine genügend große Strömungsgeschwindigkeit zur Erzielung einer hohen Auflösung zu gewährleisten.

Das Ausgangssignal ist abhängig von Anzahl (= Pulsfrequenz) und Größe (= Pulsbreite) der Späne, sodass über eine angepasste Auswerteelektronik der aktuelle Prozesszustand beschrieben und bei Spanformabweichung entsprechend einer programmierten Strategie reagiert werden kann.

6.3.3.2 Prozessregelung für das Tiefbohren

Das Fertigungsverfahren Tiefbohren hat in speziellen Anwendungsbereichen eine große Bedeutung. Die mit diesem Verfahren heute erreichbare hohe Bohrungsqualität wird durch speziell ausgebildete Werkzeuge ermöglicht. Die erzielbaren Bohrtiefen-Durchmesser-Verhältnisse reichen bis zu ca. 400. Voraussetzung für eine einwandfreie Bohrung sind ein möglichst geringer Mittenverlauf und ein einwandfreier Späneabfluss aus der Bohrung.

Die Vorgabe technologischer Grenzen und vor allem die Überwachung des Prozessablaufs bleibt auch heute oft dem Fingerspitzengefühl des Bedieners überlassen, der bei Bedarf durch rasches Handeln mögliche Folgeschäden an den kostspieligen Werkzeugen und Werkstücken verhindert. Für die angestrebte Automatisierung ist eine Prozessregelung mit der Erfassung aller relevanten Prozesszustandsgrößen eine unabdingbare Voraussetzung.

Ein geschlossener Regelkreis für den Tiefbohrprozess ist im Bild 6.63 dargestellt [ROSE94]. Eingangsgrößen des

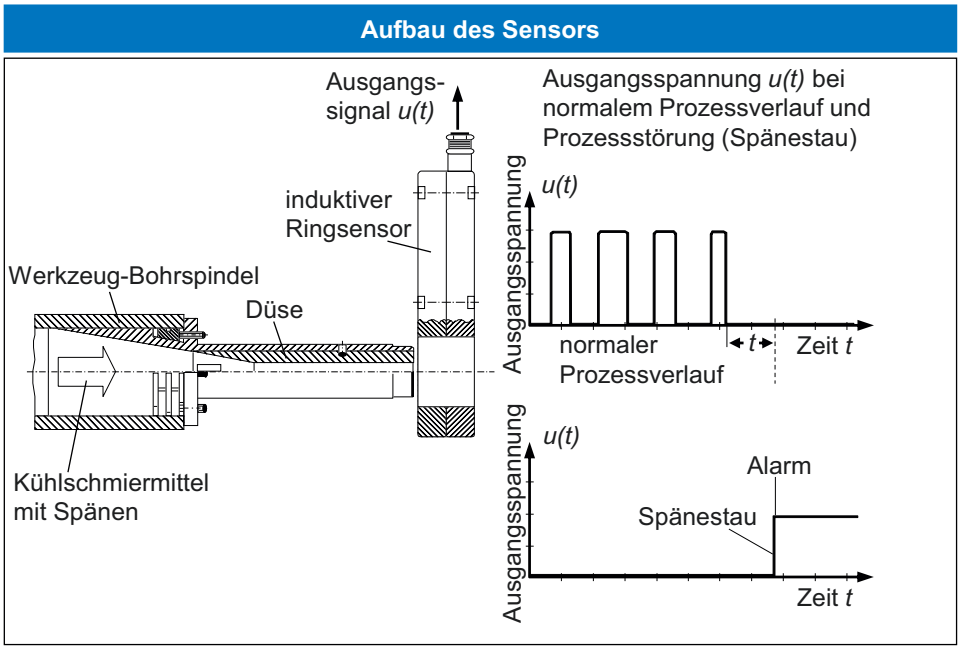


Bild 6.62 Induktiver Ringsensor zur Messung der Spänedurchflussfrequenzen beim Tiefbohren. Nach Baier

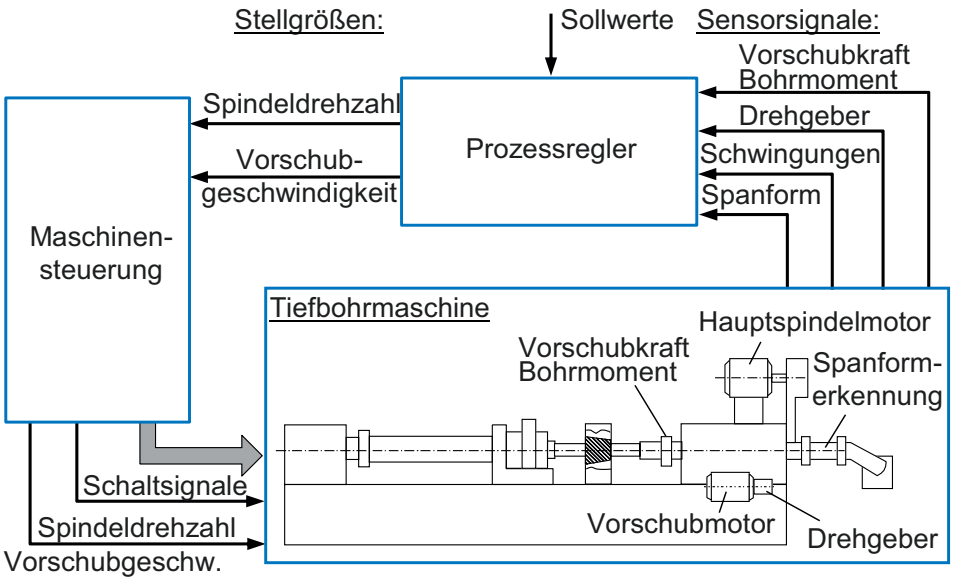


Bild 6.63 Hardwarekonfiguration für die Prozessregelung beim Tiefbohren

Prozessreglers sind Vorschubkraft, Bohrmoment, Maschinenschwingungen sowie Informationen über Spanform und Vorschubweg. Diese Signale werden über geeignete Sensoren während des Prozessverlaufs gewonnen. Grundsätzlich sind die beiden Kenngrößen Bohrmoment und Vorschubkraft als Regelgrößen zur Regelung und Überwachung des Tiefbohrprozesses geeignet. Veränderungen an der Werkzeugschneide sind deutlich im Vorschubkraftsignal sichtbar, während Veränderungen an den Stützleisten ausgeprägter im Bohrmomentsignal zu erkennen sind [ROSE94].

Aus Sensorsignalen und Sollwerten generiert der Regler die prozessabhängigen Stellgrößen Spindeldrehzahl und Vorschubgeschwindigkeit für die Maschinensteuerung. Hierzu müssen Sollwerte, z. B. werkzeugabhängige Vorschubkräfte bzw. Bohrmomente und Informationen für die Spanform, vorgegeben oder erlernt werden. Das hier gezeigte System kontrolliert zusätzlich die Stellung des Bohrkopfs aus der Drehgeberinformation, um damit die Anfahr-, Eintritts- und Austrittspositionen zu überwachen.

6.3.4 Schleifen

6.3.4.1 Prozessregelung

Das Schleifen steht in der Reihenfolge der verschiedenen Bearbeitungsschritte nach dem Härten eines Werkstückes meist

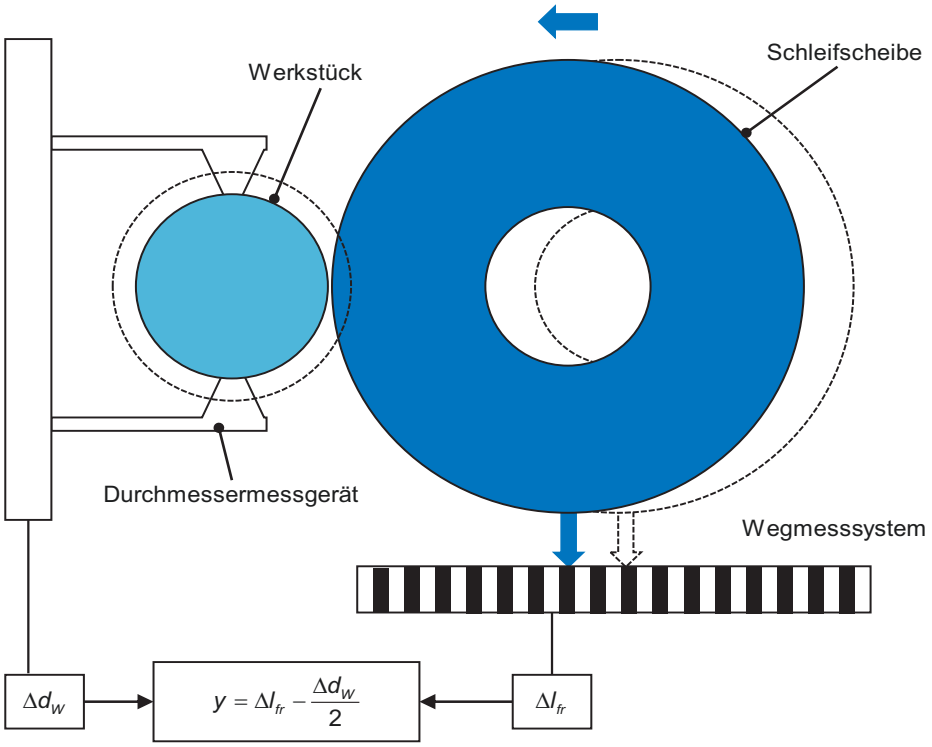


Bild 6.64 Berechnung der Maschinenaufbiegung y aus dem Vorschub Δl_{fr} und der Durchmesserabnahme Δd_w

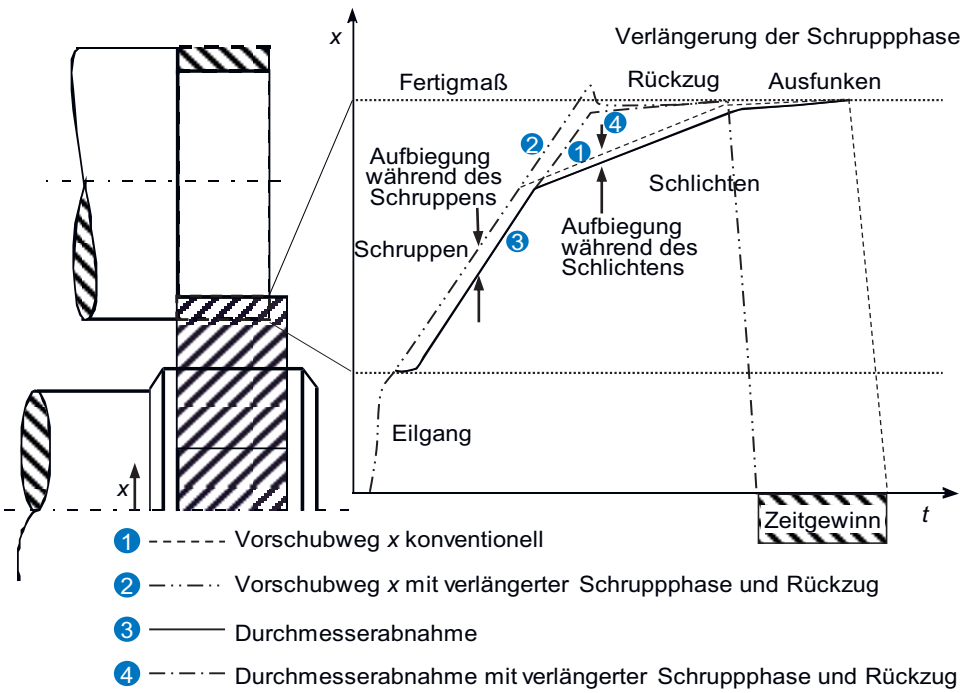


Bild 6.65 Außenrundschleifen mit Spindelstockrückzug

an letzter Stelle. Dadurch erhält dieser Prozess, der die geforderten Maße und Oberflächenbeschaffenheiten sicherstellen soll, eine besondere Bedeutung.

Auch hier ist die direkte und prozessbegleitende Messung der oben genannten Qualitätsmerkmale vor erhebliche Probleme gestellt. Als Standardlösung sind heute Messregelungen anzusehen, welche die Veränderung des Werkstückdurchmessers während der Bearbeitung mit NC-gesteuerten, mechanischen Messköpfen erfassen und die Umschaltzeitpunkte der Vorschubgeschwindigkeit für das Schruppen, Schlichten und Ausfunken der Maschinensteuerung vorgeben. Bei Erreichen des Nennmaßes wird der Bearbeitungsvorgang beendet.

Ebenso haben sich Systeme bewährt, die durch Ver-

meidung bzw. Reduzierung des Luftschleifens vor dem Anschnitt eine Verkürzung der Hauptzeit bewirken [JAKO83]. Die Umstellung der Schleifscheiben-Vorschubgeschwindigkeit von Eilgang auf Schruppgeschwindigkeit erfolgt normalerweise bei einem angenommenen maximalen Werkstückaufmaß. Bei diesem System erfolgt die Scheibenzustellung mit reduzierter Eilganggeschwindigkeit solange, bis die Schleifscheibe das Werkstück kontaktiert. Dieser Anschnitt wird mit Hilfe von Körperschallsensoren – zur Sicherheit meist in zweifacher Ausführung – erkannt.

Im üblichen dreistufigen Schleifprozess wird die durch Schnittkräfte bedingte Maschinenaufbiegung zum größten Teil in der Schlichtphase durch die Abnahme des Werkstückdurchmessers wieder abgebaut. Eine Verkürzung der Hauptzeit bewirken solche Systeme, die die Schruppphase gezielt verlängern, um das Maß der Maschinenaufbiegung ebenfalls durch die Schruppbearbeitung abzutragen [JAKO79], Bild 6.64.

Durch die zeitliche Verlängerung der Schruppphase wird das Werkstück mit größerer Zerspanleistung unter Reduzierung der Schlichtphase fast bis auf Endmaß bearbeitet. Die überhöhte Zustellung in der verlängerten Schruppphase würde beim anschließenden Feinschlichten jedoch ein entsprechendes Untermaß am Werkstück erzeugen. Deshalb wird der Spindelstock kurz vor Erreichen des Endmaßes zurückgezogen. Beim anschließenden Feinschlichten wird dann das genaue Fertigmaß erreicht, Bild 6.65.

Die Vorgabe der Bearbeitungsparameter für den Schleifprozess beruht auf technologischen Erfahrungswerten und den elastischen Maschineneigenschaften. In Form von Wertetabellen oder Datenbanken werden die Einstellwerte bereitgestellt. Häufig muss das Optimum der Maschineneinstellung vom Benutzer durch Qualitätsprüfungen der Werkstücke und durch gezielte Variation der Einstellparameter gefunden werden.

6.3.4.2 Abrichtüberwachung

Ziel des Abrichtprozesses ist die Erzeugung der geforderten Geometrie und Schneidfähigkeit der Schleifscheibe, um die Werkstückqualität bei der anschließenden Schleifbearbeitung zu gewährleisten.

Die Schleifscheiben nutzen sich auf der vollen Kantenbreite nicht gleichmäßig ab. Insbesondere die Außenkanten und bei Profilscheiben die hervorstehenden spitzen Profilanteile verschleißen stärker. Aus Sicherheitsgründen werden die Abrichthäufigkeit und die Zustellung des Abrichtwerkzeuges so groß gewählt, dass die Scheibe über ihrer gesamten Profilbreite garantiert geschärft ist und ihre Sollgeometrie zurückgewonnen hat.

Da das Verschleißmaß nicht genau bekannt ist, wird eher zu viel als zu wenig zugestellt, sodass die Schleifscheibe mehr als erforderlich an Durchmesser verliert. Dies bedeutet erhöhte Werkzeug- und Abrichtkosten. Um das Abrichtmaß auf das Notwendigste zu reduzieren, wird der Abrichtvorgang durch den Verlauf von Körperschallsignalen überwacht. Der Sensor wird auf dem Halter des Abrichtwerkzeuges montiert. Bild 6.66 stellt den prinzipiellen Aufbau eines Systems zur Überwachung des Abrichtens von Schleifscheiben mit stehenden Werkzeugen dar.

Der Körperschall-Summenpegel wird nach vorhergehender Gleichrichtung und Filterung digitalisiert und im Systemspeicher als Funktion des Vorschubweges abgelegt. Die Sollwertvorgabe für den Körperschallverlauf erfolgt über einen Lernzyklus, der meist während des Einrichtens durchgeführt wird und den Signalverlauf bei garantiert gleichem Abtrag über dem gesamten Profil wiedergibt. Von diesem Sollwertverlauf wird nun ein Toleranzband vorgebbarer Breite abgeleitet. Liegen die Signalwerte des Körperschalls außerhalb dieses Toleranzbandes, so erfolgt über die SPS-Schnittstelle des Systems eine Fehlermeldung, die zur automatischen Wiederholung des Abrichthubes mit erneuter Zustellung des Abrichtwerkzeuges benutzt werden kann.

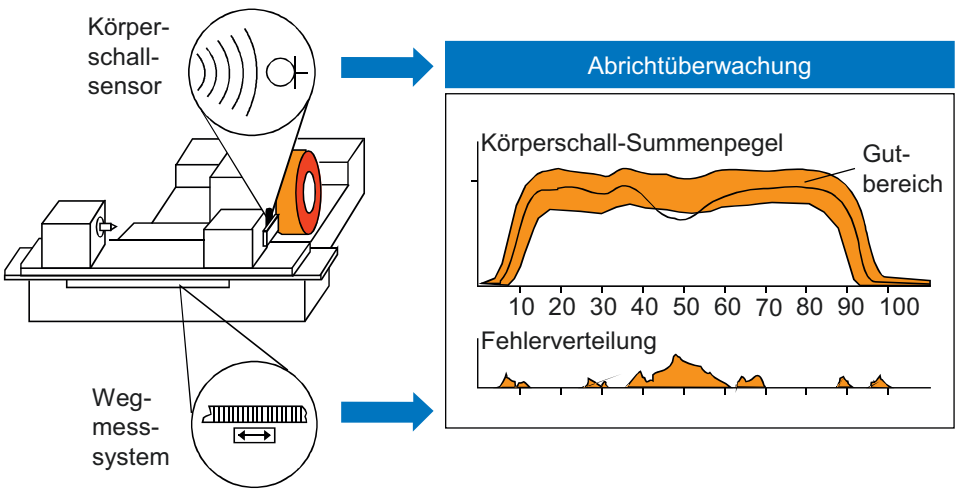


Bild 6.66 Prinzip des Systems zur Abrichtüberwachung

Unterhalb des aktuellen Körperschall-Signalverlaufs wird auf dem Bildschirm eine Häufigkeitsverteilung der Abrichtfehler über die jeweils 32 letzten Abrichthübe dargestellt. Der im Bild 6.66 gezeigte fehlerhafte Istwertverlauf lässt auf einen erhöhten Verschleiß in der Scheibenmitte schließen. Aufgrund der aufgetretenen Abweichung muss die Scheibe nochmals abgerichtet werden. Zur Optimierung des Prozesses kann als vorbeugende Maßnahme beispielsweise der Zustellbetrag erhöht werden und/oder die Anzahl der zwischen zwei Abrichtzyklen zu schleifenden Werkstücke verringert werden.

6.3.5 Funkenerosive Bearbeitung

Die sachgerechte Bedienung einer Funkenerosionsanlage erfordert einen erfahrenen Benutzer mit entsprechenden Kenntnissen der technologischen Zusammenhänge zwischen den vielfältigen Einstellmöglichkeiten der Anlage und dem erzielbaren Arbeitsergebnis [ULRI82]. Beurteilungskriterien für das Arbeitsergebnis können sein: Oberflächengüte, Maßgenauigkeit oder thermische Randzonenbeeinflussung des Werkstückes. Auch die Abtragrate (Werkstück) und die Verschleißrate (Werkzeug) hängen von der gewählten Einstellung der Maschinensteuerung ab und werden von verschiedenen Störgrößen, z. B. den augenblicklichen Spülbedingungen oder dem Verschmutzungsgrad des Arbeitsmediums (Dielektrikum), beeinflusst. Aufgabe eines Regelsystems ist es, unabhängig von den Fähigkeiten der Bedienungsperson die für das gewünschte Arbeitsergebnis günstigste Einstellung der Maschinensteuerung vorzunehmen sowie die Störeinflüsse zu kompensieren.

Bild 6.67 zeigt schematisch den Aufbau eines Reglers an einer Funkenerosionsanlage. Zunächst werden mit Hilfe von Sensoren aus dem Prozess geeignete Kenngrößen gewonnen, die Aufschluss über den augenblicklichen Prozesszustand geben, da sich Abtragrate oder Verschleiß aus technischen Gründen nicht direkt messen lassen. Die Optimierstrategie, die auf technologischen Kenntnissen basiert, legt dann je nach Zielgröße (z. B. kurze Bearbeitungszeit, geringer Werkzeugelektrodenverschleiß) die zum Erreichen des optimalen Arbeitspunktes notwendigen Stellgrößenänderungen fest.

Im Bild 6.68 a sind mögliche charakteristische Entladespannungsverläufe am Funkenspalt dargestellt. Der mit Funkenentladung bezeichnete Verlauf weist auf eine abtragintensive Entladung hin, während Verläufe der Leerlauf- und Kurzschlussform keinen Abtrag erbringen und die Fehlentladung die Neigung zur unerwünschten Lichtbogenbildung signalisiert. Das Verhältnis der Anzahl der Funkenentladungen zu der Gesamtanzahl der vom Generator gelieferten Impulse nennt man das Wirkverhältnis η.

Bild 6.68 b zeigt den schematischen Aufbau des Wirkverhältnissensors. Dieser Sensor wertet die beschriebenen Entladespannungsverläufe mit Hilfe einer Komparatorschaltung aus. Eine nachgeschaltete Logik bildet aus den Ausgangssignalen der Komparatoren K_1 bis K_4 zu einem bestimmten Zeitpunkt t_A, der durch ein Totzeitglied bestimmt wird, die Information „Funkenentladung – ja oder nein". Diese Information steht digital oder – zeitlich gemittelt – als analoges Signal-Wirkverhältnis η am Ausgang des Sensors zur Verfügung. Weitere Sensoren sind im Einsatz, die z. B. die Zündverzögerungszeit, die Leitfähigkeit des Spaltes und den Ventilstrom des hydraulischen Vorschubsystems messen.

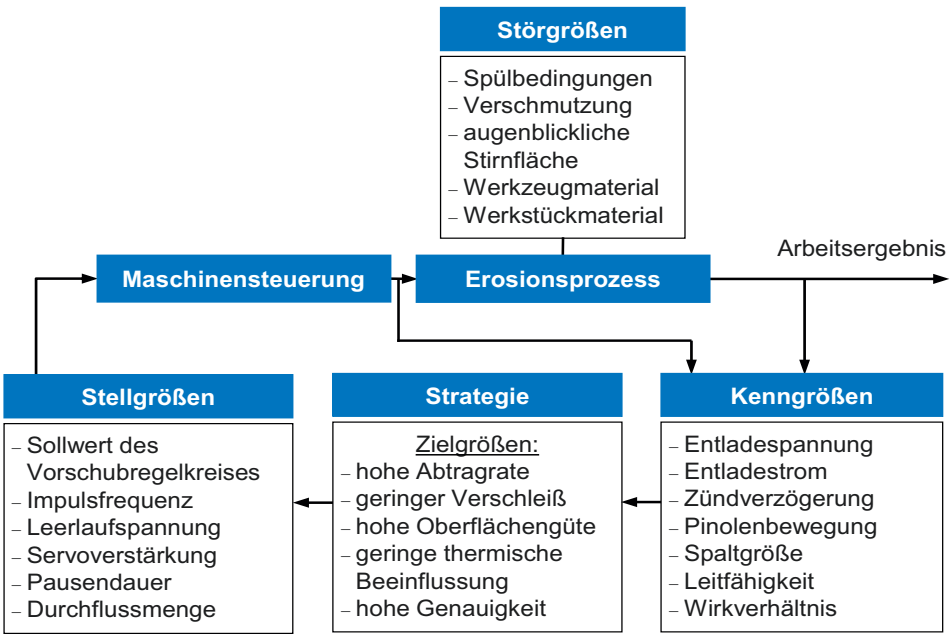


Bild 6.67 Schematischer Aufbau eines Prozessregelsystems für die funkenerosive Bearbeitung mit beschreibenden Kenngrößen

Bild 6.68 Charakteristische Entladespannungsverläufe und schematischer Aufbau des Wirkverhältnissensors

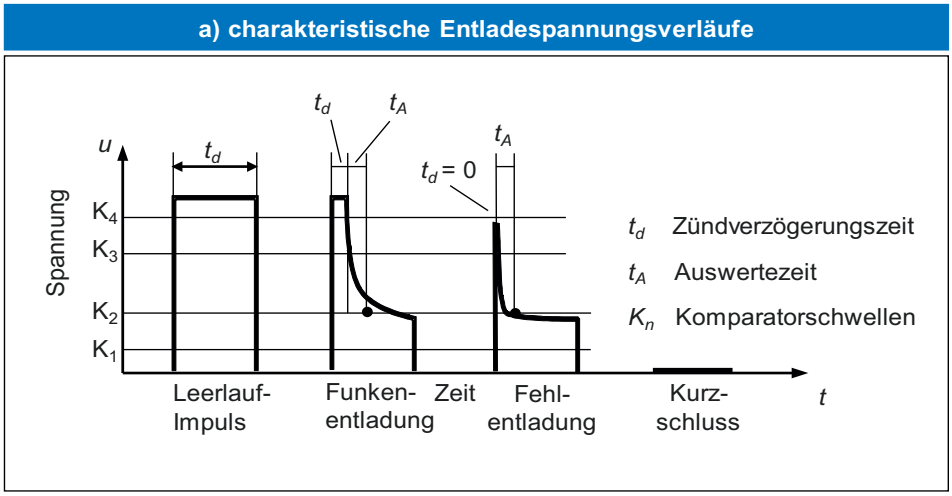
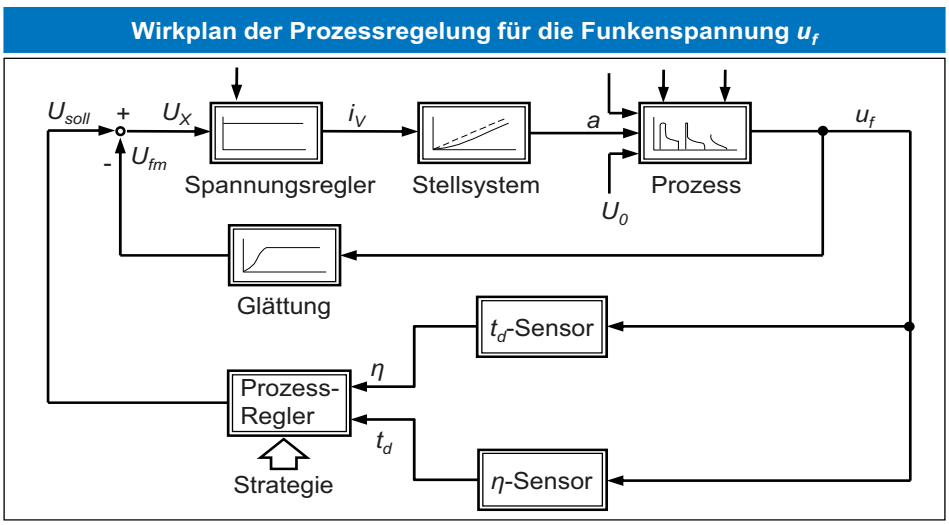


Bild 6.69 Wirkplan der Prozessregelung für die Funkenspannung u_f



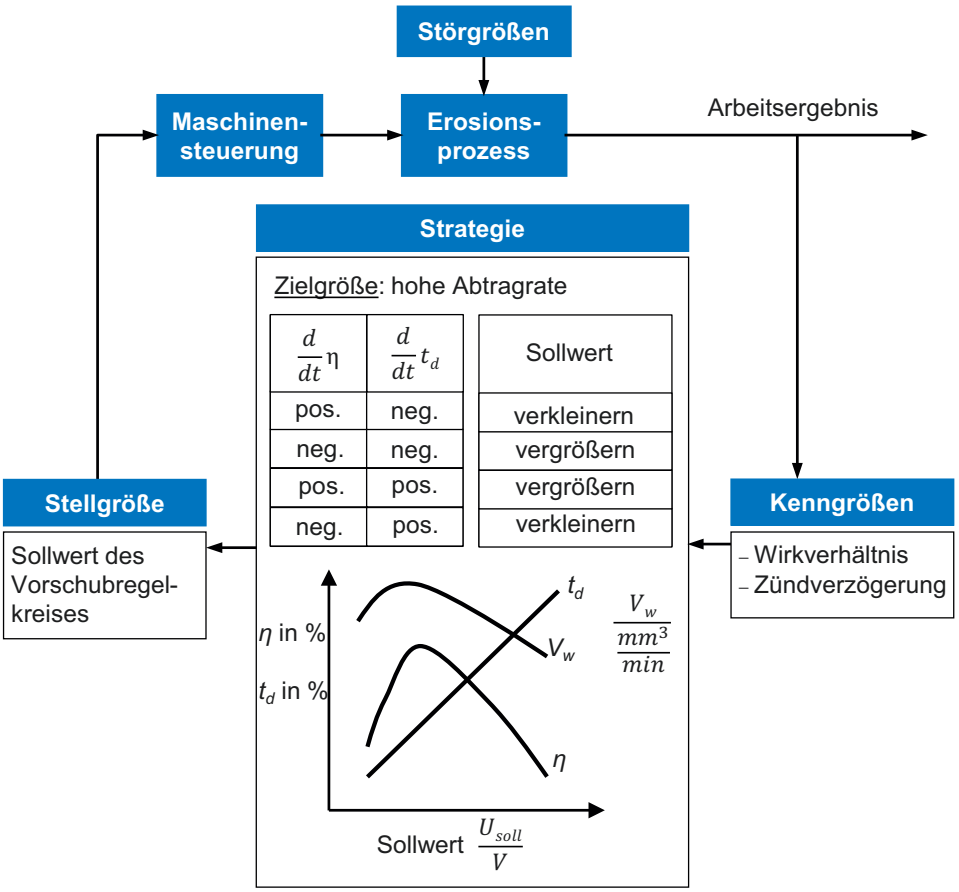


Bild 6.70 Beispiel für ein Teilsystem zur Prozessregelung

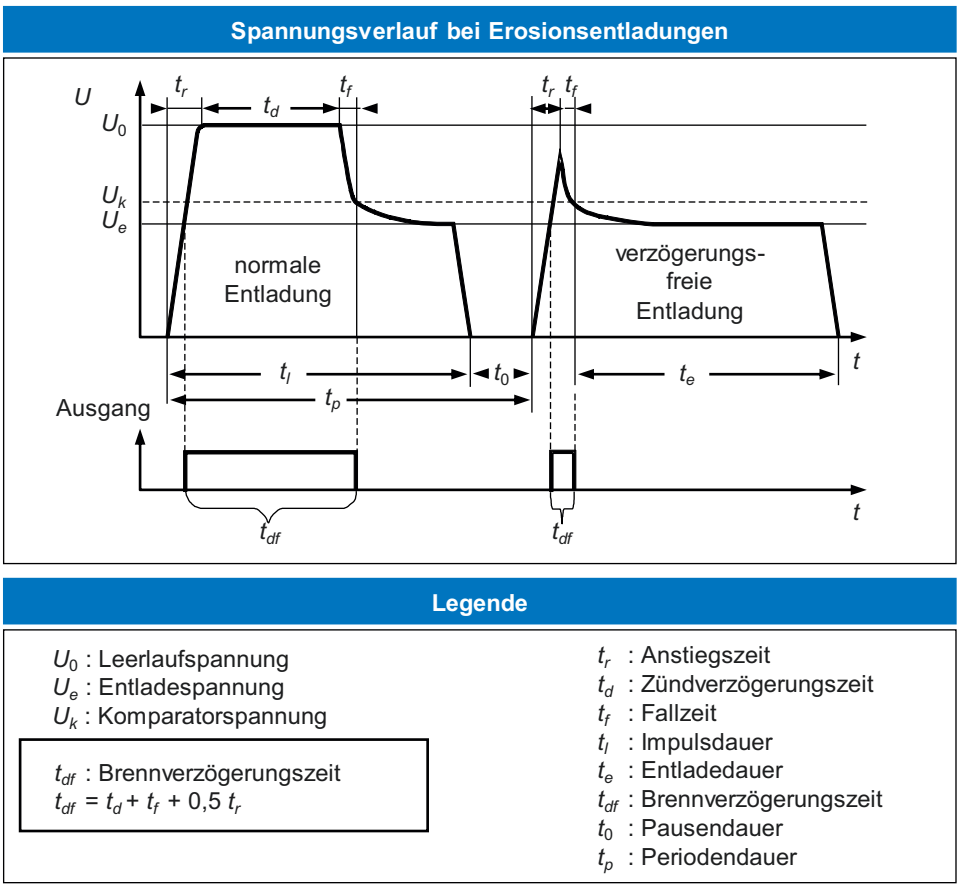


Bild 6.71 Erweiterte Darstellung der Kennwerte einer Erosionsentladung

Bild 6.69 zeigt den Wirkplan der Regelung der Funkenspannung u_f, wobei die obere Hälfte des Schaltplans – die Regelstrecke – einen konventionellen Vorschubantrieb und den Funkenerosionsprozess enthält [SALZ97].

Der Sollwert des Vorschubregelkreises U_{soll} wird im Handbetrieb über ein Potentiometer am Generator der Bearbeitungsaufgabe entsprechend eingestellt. Aufgrund der Differenz zwischen Sollwert und der mittleren Entladespannung U_{fm}, die sich über ein Glättungsglied in der Rückführung aus der tatsächlichen Entladespannung u_f ergibt, wird die Pinole über Spannungsregler und Stellsystem verfahren. Es stellt sich eine Spaltweite a ein, die unter Einfluss der Durchflussmenge Q_S des Dielektrikums eine mittlere Spannung erzeugt, die der Vorgabe U_{soll} entspricht. Auf den Prozess wirken die im Bild 6.67 genannten Störgrößen ein.

Es hat sich gezeigt, dass allein die richtige Auswahl des Sollwertes je nach Bearbeitungsaufgabe schwierig ist. Eine kontinuierliche Anpassung dieser Stellgröße an die augenblicklichen Bearbeitungsbedingungen trägt zu einer optimalen Ausnutzung der Bearbeitungsanlage bei. Diese Anpassung übernimmt der Regler, der mit Hilfe der Messung des Wirkverhältnisses η und der Zündverzögerung t_d über den Prozesszustand informiert wird und entsprechend einer vorgegebenen Strategie die Sollgröße U_{soll} ändert.

Die Strategie dieses einfachen Reglers sowie die zugrundeliegenden technologischen Zusammenhänge sind im Bild 6.70 dargestellt. Zielgröße sei eine hohe Abtragrate bei relativ geringem Werkzeugverschleiß. Es ist aus der Technologie bekannt, dass eine Proportionalität zwischen der Ab-

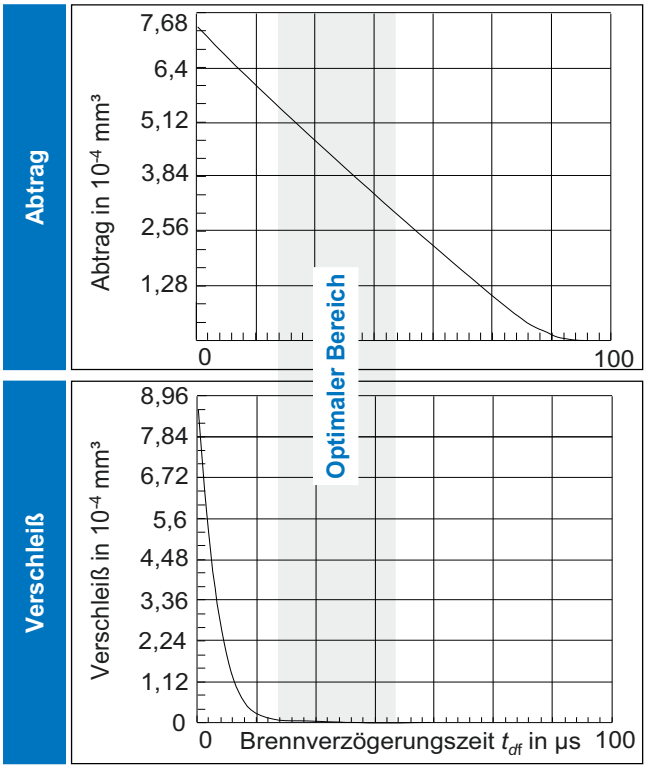
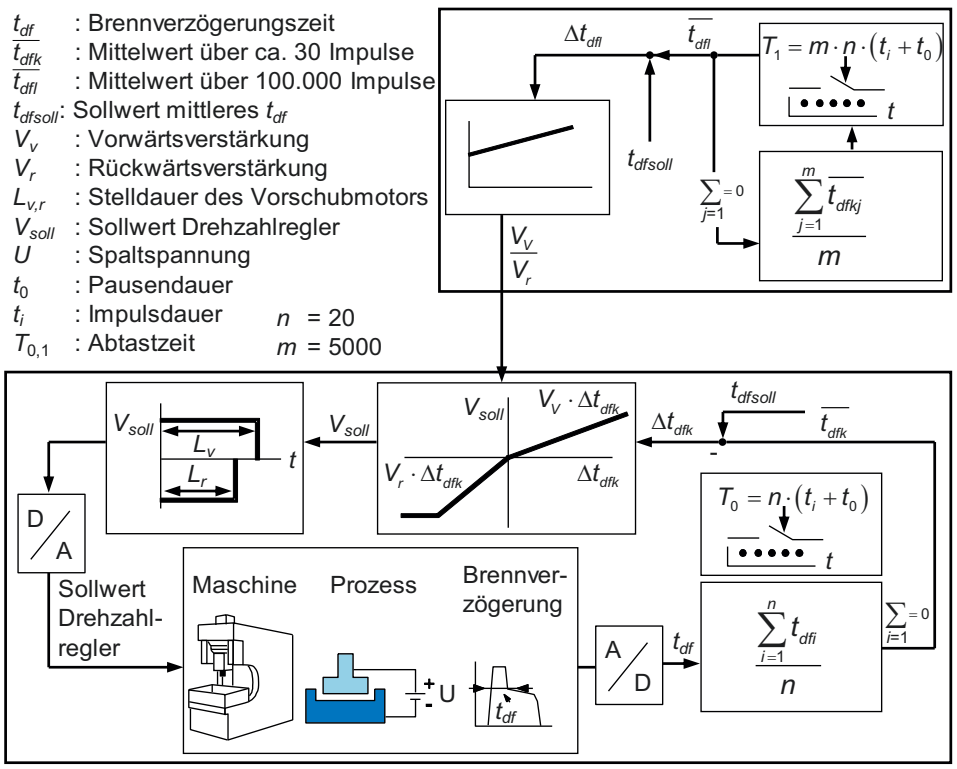


Bild 6.72 Zusammenhang zwischen Brennverzögerungszeit t_{df} und Abtrag bzw. Werkzeugverschleiß

Bild 6.73 Struktur der Spaltweitenregelung

t_{df} : Brennverzögerungszeit
$\overline{t_{dfk}}$: Mittelwert über ca. 30 Impulse
$\overline{t_{dfl}}$: Mittelwert über 100.000 Impulse
t_{dfsoll}: Sollwert mittleres t_{df}
V_v : Vorwärtsverstärkung
V_r : Rückwärtsverstärkung
$L_{v,r}$: Stelldauer des Vorschubmotors
V_{soll} : Sollwert Drehzahlregler
U : Spaltspannung
t_0 : Pausendauer
t_i : Impulsdauer
$T_{0,1}$: Abtastzeit
n = 20
m = 5000



tragrate V_W und dem Wirkverhältnis η besteht, wie aus dem unteren Teil von Bild 6.70 zu erkennen ist. Entsprechend der in der Bildmitte dargestellten Entscheidungstabelle wird in einem Suchverfahren je nach zeitlicher Änderung der Kenngrößen η und t_d der Sollwert variiert. Mit Hilfe dieses Verfahrens lässt sich das größtmögliche Wirkverhältnis bei maximaler Abtragrate erzielen.

Seit geraumer Zeit sind Bestrebungen festzustellen, adaptive Regelungseinrichtungen sowohl für die Normal- als auch für die Feinstbearbeitung zu entwickeln. Für die Charakterisierung des Erosionsprozesses hat es sich als vorteilhaft erwiesen, neben der Zündverzögerungszeit als weitere Kenngröße die Brennverzögerungszeit zu definieren [STRO98], Bild 6.71.

Hierdurch wird es möglich, eine detaillierte Beschreibung der Fehlentladungen durchzuführen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass die vor der Entladung auftretende Spannung im Bereich zwischen der Leerlaufspannung und der Entladespannung liegt (rechter Impuls Bild 6.70). Diese Fehlentladungsimpulse lassen sich durch die messtechnische Erfassung der ($t_{df} > 0$) erkennen. Somit stellt die Brennverzögerungszeit t_{df} eine charakteristische Kenngröße des Erosionsprozesses dar, deren Veränderung mit dem Abtrag und Verschleiß korreliert, Bild 6.72.

Für die üblichen Materialkombinationen von Werkzeugelektrode und Werkstück können sowohl die Abtragrate als auch der Verschleiß in Abhängigkeit von t_{df} ermittelt werden. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, über eine rechnergestützte Auswertung detaillierte Prozessinformationen des aktuellen Zustandes als Hilfsmittel für den Benutzer online darzustellen. Im Gegensatz zur üblichen Anzeige des Wirkfaktors ist hier eine Darstellung möglich, die die Auswirkung der gezündeten Entladungen auf den Abtrag bzw. den Verschleiß anzeigt.

Auf der Basis der Prozesskenngröße t_{df} kann des Weiteren eine strukturierte Spaltweitenregelung aufgebaut werden, die eine kontinuierliche Anpassung der Spaltweite an den aktuellen Prozesszustand durchführt, Bild 6.73. Grundlage der Regelungsstrategie bilden jeweils Mittelwerte der Brennverzögerungszeiten, die von 30 aufeinanderfolgenden Entladungen berechnet werden. Hierdurch werden, wie im unteren Teil von Bild 6.73 dargestellt, kurzfristige Prozessschwankungen ermittelt. Über die Abweichung des kurzfristigen Mittelwertes der t_{dfk} von dem vorgegebenen Sollwert t_{dfsoll} wird die Eingangsgröße für den adaptierten Proportionalregler t_{dfk} gebildet. Für eine Beurteilung des gesamten Prozesses sind jedoch auch langfristige Trends zu berücksichtigen, die in Form eines übergeordneten Systems (Bild 6.73 oben) eine Adaption der Verstärkungsfaktoren V_r und V_v des Spaltweitenreglers bewirken. Über die Abweichung des langfristigen Mittelwertes t_{dfl} von dem Vorgabewert t_{dfsoll} wird das Verstärkungsverhältnis aus Vorwärts- zu Rückwärtsverstärkung des Pinolenantriebes und damit die Dynamik des Vorschubantriebes beeinflusst. Der Regler generiert ein Signal variabler Amplitude und Stelldauer L_v bzw. L_r, das an den Drehzahlregler des Vorschubmotors ausgegeben wird. In der Praxis hat es sich als günstig erwiesen, hierbei eine hohe Verstärkung einer langen Stelldauer vorzuziehen.

Einerseits lassen sich durch diese Maßnahme sehr kleine Regeltakte erzielen. Andererseits ist aufgrund der zeitlichen Auflösung keine Unterscheidung zwischen L_v und L_r mehr notwendig, sodass lediglich die Verstärkungen adaptiert werden müssen. Berücksichtigt man ferner, dass zwischen der Abweichung t_{dfl} im langfristigen Mittel und dem Quotienten aus V_v und V_r eine lineare Beziehung besteht (vgl. STRO9), kann aus den Anfangsbedingungen sowie einem weiteren Arbeitspunkt ein optimales Verstärkungsverhältnis $V_v = V_r$ durch Inter- bzw. Extrapolation berechnet werden. Die spezifische Anfangseinstellung der im Regelkreis enthaltenen Kenngrößen L_i sowie V_v, V_r und t_{dfk} beruht dabei auf Erfahrungswerten und Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen.

Auf Basis der hier vorgestellten statistischen Auswertung kann erreicht werden, dass der Erosionsprozess stabil abläuft und sich ein optimaler Zustand bezüglich Materialabtrag und Elektrodenverschleiß einstellt. Daraus resultiert eine erhebliche Verkürzung der Bearbeitungszeit bei gleichzeitiger Verringerung des Werkzeugverschleißes.

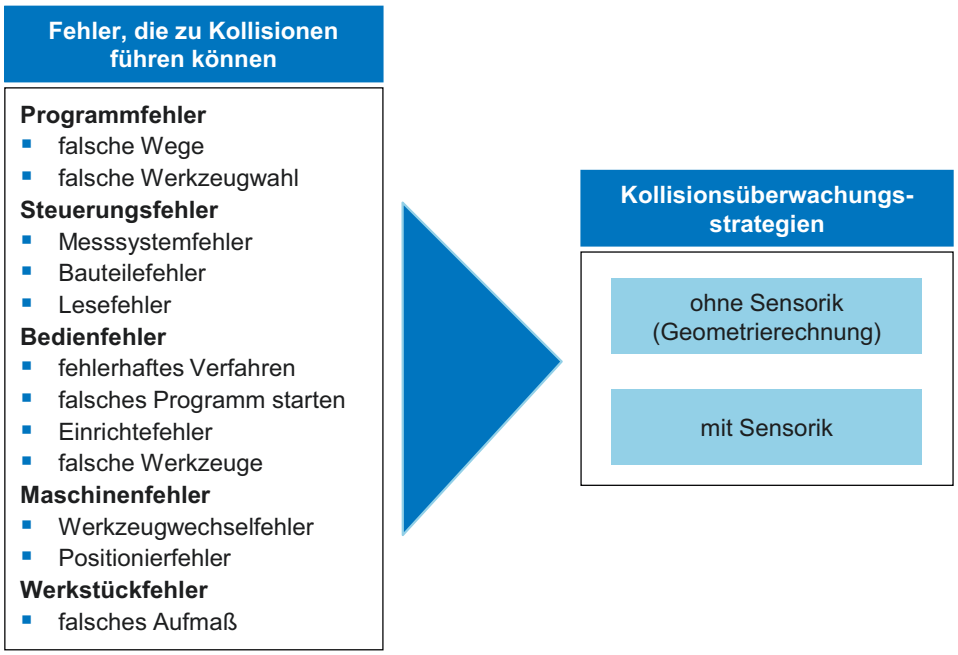
6.3.6 Kollisionsüberwachung

Kollisionen an Werkzeugmaschinen führen in der Regel zu erheblichen Schäden, die einerseits hohe Reparaturkosten, andererseits lange Ausfallzeiten der Maschinen nach sich ziehen. 70 % der Maschinenausfälle mit langen Stillstandszeiten und hohen Reparaturkosten sind durch Kollisionen bedingt [LORE99].

Werden Kollisionsschutzsysteme eingesetzt, so sollten diese möglichst die Kollision verhindern oder zumindest Folgeschäden minimieren. Sie sollten sich anbahnende Kollisionen in allen Betriebszuständen, d. h. Hand- und Automatikbetrieb, erfassen können. Statistisch gesehen ist die Fehlbedienung der Maschine die häufigste Ursache für eine Kollision. Dazu zählen sowohl das Einspannen falscher Werkzeuge oder Werkstücke, Unachtsamkeit beim manuellen Verfahren der Achsen, als auch Fehler bei der Handeingabe von NC-Sätzen oder bei der Vorgabe von Korrekturwerten. Weitere Kollisionsursachen liegen in Steuerungs- oder Programmfehlern, die trotz Überwachungs- und Testfunktionen nicht immer erkannt werden können, Bild 6.74.

Ein Kollisionsschutzsystem sollte nach Möglichkeit alle Fehlerquellen erfassen, die zu Kollisionen führen können. Hierzu sind prinzipiell zwei verschiedene Verfahren einsetzbar. Im Folgenden werden sensorische und sensorlose Systeme diskutiert und die Vor- und Nachteile aufgezeigt.

Bild 6.74 Kollisionsursachen und zugehörige Überwachungsstrategien



Sensorische Verfahren

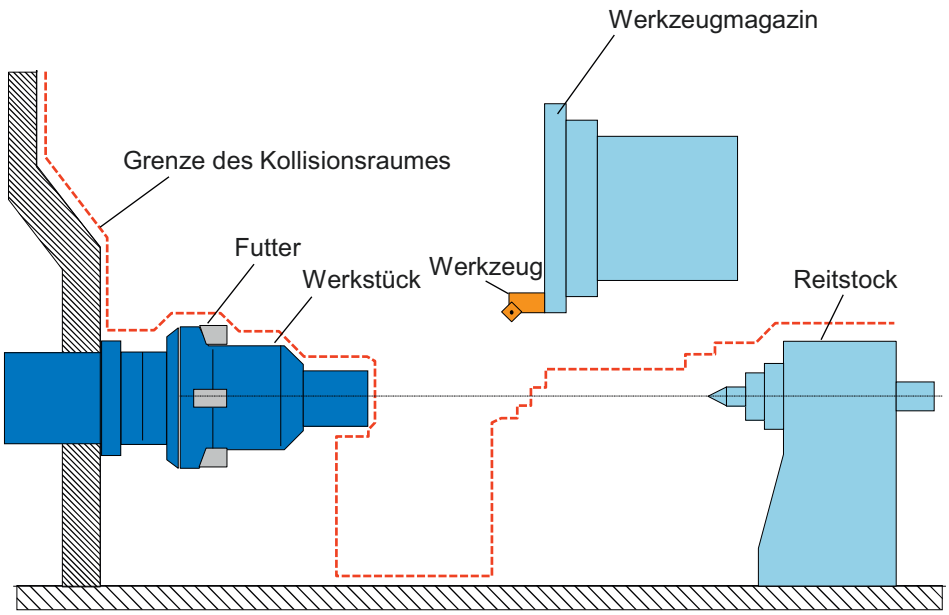
Sensorische Verfahren zur Kollisionsvermeidung arbeiten mit verschiedenartigen Sensoren.

Denkbar sind z. B. optische Sensoren in Form von Kameras, deren Signale nach entsprechender Auswertung einen Großteil möglicher Kollisionsfälle verhindern können. Nachteile sind die hohe Empfindlichkeit von optischen Systemen im Arbeitsraum von Werkzeugmaschinen und die aufwendige Informationsverarbeitung. Käufliche Kollisionserkennungssysteme basieren meist auf Kraftsensoren in Verbindung mit gezielten Schwachstellen (Überlastkupplung, vgl. ► Kap. 2.4.3) oder einer Einrichtung zur Sperrung der Reglerfreigabe. Neben der Tatsache, dass sie die Kollision nicht vermeiden, sondern nur erkennen, bzw. den Schaden klein halten, erfassen sie oft auch nicht alle Punkte des bewegten Maschinenteils, die an Kollisionen beteiligt sein können.

Für Sensoren auf akustischer Basis gilt Ähnliches. Sie erfassen lediglich eine Richtung und werden leicht durch Späne, Kühlschmiermittel usw. gestört. Für den Betrieb im Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine sind sie daher ungeeignet.

Unter Verwendung steuerungsinterner Informationen können alle Achsen und damit alle Richtungen überwacht

Bild 6.75 Beschreibung des Kollisionsraumes



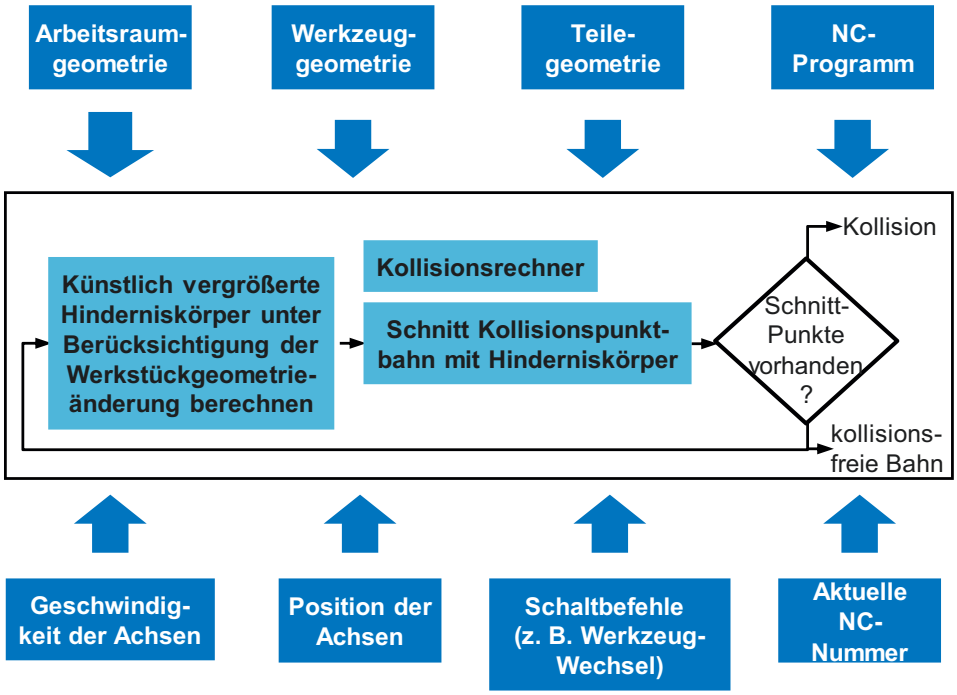


Bild 6.76 Informationsfluss in einem Kollisionsschutzsystem

werden (vgl. ▶ Kap. 6.1.4.5). Durch Kompensation der Beschleunigungseffekte kann die Kollisionsschwelle im Eilgang niedrig eingestellt werden. Zusammen mit einer schnellen Reaktion im Lageregelertakt kann so, zumindest bei tangentialen Kollisionen, in der Regel eine Schadensreduzierung erreicht werden.

Sensorlose Verfahren

Sensorlose Verfahren zur Kollisionsvermeidung bestehen in der Regel aus einer reinen Softwarelösung. Der geometrische Kollisionsraum einschließlich Werkzeugen, Werkstück, Spannelementen und Umbauten für alle bewegten Achsen wird mit einfachen Geometrieelementen (Primitivs) beschrieben [INDR 92a; FÖRD97].

Aus der Position und Geschwindigkeit der beweglichen Maschinenteile (Werkzeuge, Werkzeugträger) und den bekannten Geometrien kann jederzeit rechnerisch eine Kollisionsgefahr erkannt werden. Die Problematik bei dieser Geometrierechnung liegt in der hohen Datenmenge zur Beschreibung der Arbeitsraum-, Werkzeug-, und Werkstückgeometrie sowie in dem hohen Rechenaufwand, der zur Berechnung möglicher Kollisionsgefahren nötig ist.

Eine erhebliche Reduzierung des Online-Rechenaufwandes lässt sich dadurch erreichen, dass die Anzahl der zu betrachtenden Punkte, die an der Kollision beteiligt sein können, durch eine Vorausberechnung auf einen Punkt reduziert wird. Dieser eine zu betrachtende Punkt (Kollisionspunkt) sollte der Punkt sein, dessen Bewegungsbahn im Bearbeitungsprogramm der Maschine beschrieben ist, also z. B. die Werkzeugspitze.

Die Teile des Arbeitsraumes, die an einer Kollision beteiligt sein können, werden dazu derartig künstlich vergrößert, dass das Bewegen des Kollisionspunktes außerhalb dieser künstlich vergrößerten Oberfläche zu keiner Kollision mit irgendeinem Punkt des bewegten Maschinenteils führt. Bild 6.75 zeigt die Vorgehensweise für den zweidimensionalen Fall. Die auf die Werkzeugspitze bezogenen, künstlich vergrößerten Hinderniskörper bzw. -flächen sind gestrichelt dargestellt. Die Kollisionsrechnung muss nur noch die Bewegungsbahn der Werkzeugspitze bezüglich der vergrößerten Hindernisflächen berücksichtigen.

Schneidet die Bahn des Kollisionspunktes in dem zu untersuchenden Bewegungsabschnitt die künstlich vergrößerten Hinderniskörper, so wird eine Kollisionsmeldung generiert und die Bewegung darf nicht ausgeführt werden, Bild 6.76. Ansonsten ist die Bahn kollisionsfrei und kann ausgeführt werden. Der Kollisionsrechner untersucht dann den nächsten Bewegungsabschnitt.

Unter Berücksichtigung der geschwindigkeitsabhängigen Stoppwege der Vorschubachsen wird der Kollisionsraum zusätzlich vergrößert, bzw. die Geschwindigkeitswerte bei Annäherung an den Kollisionsraum automatisch zurückgenommen. Auf diese Weise wird garantiert, dass die Vorschubbewegung vor dem Erreichen des Kollisionsraumes gestoppt werden kann.

Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass alle Geometriedaten richtig eingegeben worden sind und auch die veränderlichen Geometriewerte (Werkstück, Werkzeuge usw.) mit der Realität übereinstimmen. Das Einwechseln eines falschen, z. B. zu großen, Werkstückes oder Werkzeuges

oder die Eingabe eines falschen Werkstückprogramms bzw. eine Fehlbedienung führen bei diesem System unweigerlich zur Kollision.

6.4 Statistische Prozessregelung

Eine weitere Möglichkeit, systematische Fehlerursachen am gefertigten Werkstück zu kompensieren, ist die sogenannte Statistische Prozessregelung (SPC: Statistical Process Control). Bei der SPC werden in periodischen Abständen Werkstücke aus der Produktion entnommen und deren kritische Maße (beispielsweise besonders eng tolerierte Durchmesser von Lagersitzen) mit angepassten Messvorrichtungen oder mit normalen Messmitteln, wie Mikrometerschraube oder Messschieber, geprüft. Der Vorteil der angepassten Messvorrichtungen ist in der Serienproduktion gegeben, da meist eine Vielzahl von Merkmalen mit einem einzigen Messvorgang erfasst und das Ergebnis der Prüfung automatisch auf elektronischen Datenträgern dokumentiert werden kann.

Sinn der Prozessregelung ist es, den systematischen Fehleranteil, also einen Trend, hervorgerufen durch Werkzeugverschleiß oder durch die thermische Drift der Maschine, auszugleichen. Dazu ist es nötig, zwischen systematischen und zufälligen Fehleranteilen unterscheiden zu können (vgl. ► Kap. 9, Band 2). Der zufällige Fehleranteil wird bei einer sogenannten Maschinenfähigkeitsuntersuchung ermittelt. Es werden meist 50 Teile hintereinander gefertigt und vermessen. Während der Fähigkeitsuntersuchung sollen die systematischen Einflüsse möglichst klein sein. Das heißt, dass die Umgebungstemperatur konstant und die Werkzeugschneide bereits einige Male im Einsatz gewesen sein soll, um den progressiven Anfangsverschleiß zu vermeiden.

Aus der Streuung der gefertigten Werkstückmaße werden für die kritischen Merkmale die Standardabweichung s_x und die auf die vorgegebene Zeichnungstoleranz T bezogene Maschinenfähigkeit C_m berechnet:

$$C_m = \frac{T}{6 s_x} \tag{6.32}$$

mit:

$s_x = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ Standardabweichung,

x_i Messwert,

n Stichprobengröße,

$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_i x_i$ Mittelwert

Damit der Prozess regelbar ist, muss die zufällige, nicht beeinflussbare Streuung im Verhältnis zur Toleranzfeldbreite klein sein. Die geforderten Fähigkeitsindizes liegen deshalb zwischen 1,3 und 1,67.

Bei der statistischen Prozessregelung werden während des eigentlichen Bearbeitungsprozesses in periodischen Abständen Stichproben zu meist fünf Teilen aus der Produktion entnommen und vermessen. Für jede Stichprobe werden die Standardabweichung und der Mittelwert berechnet. Die Er-

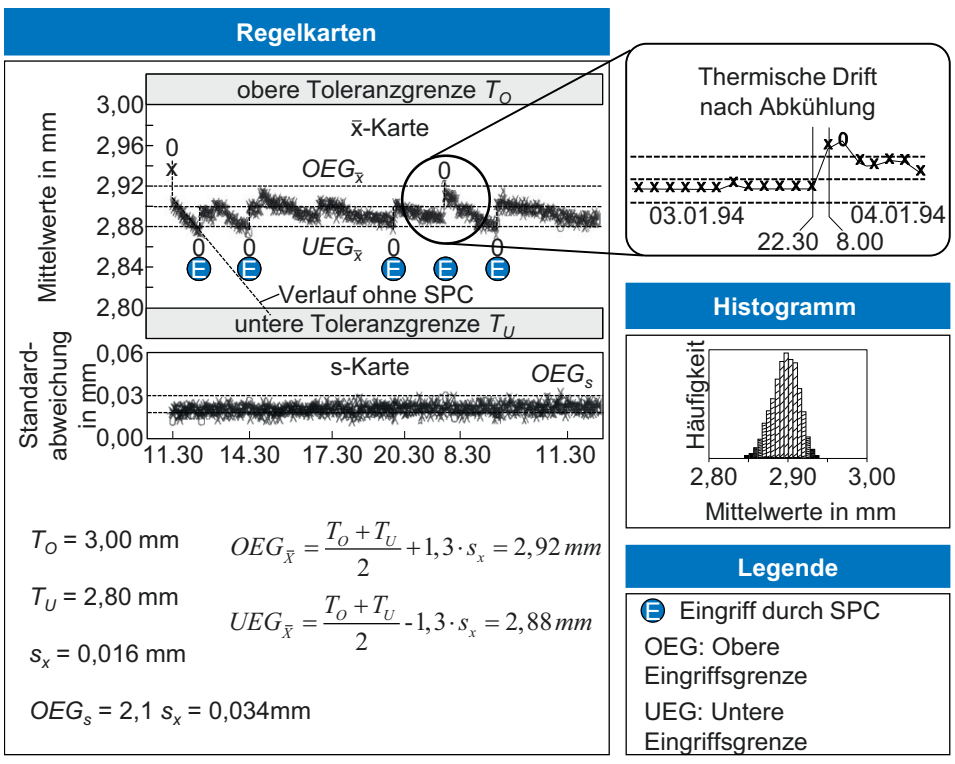


Bild 6.77 Regelkarten zur Statistischen Prozesskontrolle (SPC)

gebnisse der Messung werden in Prozessregelkarten eingetragen, ◘ Bild 6.77. Als erstes werden in die Regelkarte die obere und untere Toleranzgrenze des kontrollierten Merkmals, hier der Durchmesser eines Synchronrings für ein Pkw-Getriebe, eingetragen.

Anschließend sind für die Mittelwertkarte ($\bar{x}$-Karte) und die Standardabweichungskarte (s-Karte) Eingriffsgrenzen zu bestimmen. Die Eingriffsgrenzen berechnen sich derart, dass ein Über- oder Unterschreiten dieser Grenzen eindeutig auf einen Trend hinweist. Aus der Maschinenfähigkeitsuntersuchung ist die Standardabweichung s_x der Einzelwerte bekannt. Statistisch gesehen kann von einer systematischen Abweichung gesprochen werden, wenn ein Messwert außerhalb des ±3s-Bereichs liegt, in dem sich bei rein zufälliger Verteilung 99,73 % aller Messwerte befinden. Durch die Mittelwertbildung wird der Verlauf der Messwerte geglättet. Ein Trend ist besser erkennbar, weil die Mittelwerte einer Stichprobe weniger stark streuen als die Einzelwerte. Wenn die Einzelwerte einer Stichprobe mit der Standardabweichung s_x verteilt sind, ergibt sich die Standardabweichung s_x der Mittelwerte aus n Werten zwischen den Stichproben zu

$$s_{\bar{x},n} = \frac{1}{\sqrt{n}} s_x \tag{6.33}$$

Der natürliche Streubereich, in dem 99,73 % aller Mittelwerte aus Stichproben mit fünf Teilen liegen, beträgt demnach $\pm 3/\sqrt{5} \cdot s_x$.

Die Eingriffsgrenzen der Mittelwertkarten berechnen sich dann zu:

$$\begin{aligned} OEG_{\bar{x}} &= \frac{T_o + T_u}{2} + \frac{3}{\sqrt{5}} s_x \approx \frac{T_o + T_u}{2} + 1{,}3 s_x \\ UEG_{\bar{x}} &= \frac{T_o + T_u}{2} - \frac{3}{\sqrt{5}} s_x \approx \frac{T_o + T_u}{2} - 1{,}3 s_x \end{aligned} \tag{6.34}$$

Ebenso kann der natürliche Streubereich der Standardabweichung einer Fünfer-Stichprobe mit

$$OEG_s = 2{,}1 \cdot s_x \tag{6.35}$$

angegeben werden.

Da die Maschinenanwender Fähigkeitsindizes zwischen 1,3 und 1,67 fordern [KYNA99; KIEL92; ARNO93; INDR 92b; MURR 99b, ist gewährleistet, dass die Einzelwerte der Stichproben die Toleranzgrenze selbst dann nicht überschreiten, wenn sich ein Mittelwert seiner Eingriffsgrenze nähert.

Während des eigentlichen Bearbeitungsprozesses werden die ermittelten Standardabweichungen und Mittelwerte in die vorbereiteten Regelkarten eingetragen. An modernen SPC-Stationen für die Serienfertigung geschehen Messung, Auswertung und Übernahme der Daten in die Regelkarten automatisch. Im ◘ Bild 6.77 ist der Ausschnitt einer solchen Regelkarte wiedergegeben. Aufgrund des Verschleißes der konischen Reibahle werden im Laufe der Zeit immer kleinere Durchmesser gefertigt. Erreicht ein Mittelwert die untere Eingriffsgrenze, so wird die Ahle axial zugestellt und reibt wieder größere Durchmesser. Der zweite Effekt, der aus dieser Regelkarte deutlich wird, ist die thermische Drift der Maschine. Man erkennt, dass die erste Stichprobe bei Beginn der neuen Schicht oberhalb der oberen Eingriffsgrenze gefertigt wurde. Daraufhin muss der Prozess ebenfalls nachgestellt werden. Im Histogramm ist die Häufigkeitsverteilung von 4785 Einzelwerten aufgetragen, die in dieser Zeit gefertigt wurden.

Es zeigt sich, dass die Durchmesser durchschnittlich etwas unterhalb der Toleranzmitte gefertigt wurden, aber alle Synchronringe innerhalb der Toleranz lagen. Ohne statistische Prozessregelung wäre der Prozess bereits nach drei Stunden aus der Toleranz gelaufen.

6.5 Maschinenzustandsüberwachung

Aktuelle Produktionssysteme weisen eine erhebliche Komplexität im Spannungsfeld zwischen Verfügbarkeit, Effizienz, Kosten und Wirtschaftlichkeit auf. Insbesondere die Verfügbarkeit geht mit einer hohen Wertschöpfung einher, weshalb besonders strenge Anforderungen an diese gelten. Teilweise werden für die Overall Equipment Effectiveness 98 % [OPHE98] und mehr gefordert. Um ungeplante wartungs- oder reparaturbedingte Stillstandszeiten zu vermeiden, stellt die Zustandsüberwachung eine wertvolle Basis dar.

In den folgenden Kapiteln werden verschiedene Methoden und Algorithmen zur Zustandsüberwachung vorgestellt und um praktische Applikationsbeispiele ergänzt.

6.5.1 Verfahren der Instandhaltung und Wartung

Zur Amortisation der Anschaffungskosten einer Produktionsmaschine ist eine hohe Auslastung der Fertigungskapazität erforderlich [HAGE99]. Diese Auslastung erfordert eine hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Maschinen. Übergeordnetes Ziel der Instandhaltung ist es daher, diese Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Fertigungsanlagen zu einem höchst möglichen Maße sicherzustellen, indem sie der Abnutzung der Maschinen und ihrer Komponenten entgegen wirkt [MURR 99a]. Dabei findet in der Nutzungsphase der Maschine ein Abbau des Abnutzungsvorrates statt, über den sich Wartungs- und Instandsetzungszeitpunkte festlegen (◘ Bild 6.78).

Die Maßnahmen der Instandhaltung untergliedern sich nach [DIN19] in:

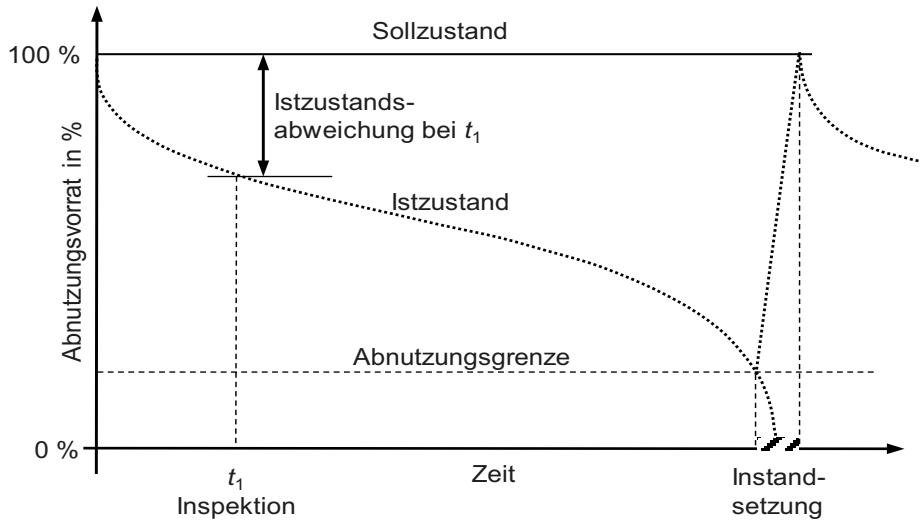


Bild 6.78 Verlauf des Abnutzungsvorrat t_s. Nach [DIN12]

- **Wartung:** Maßnahmen zur Bewahrung des Sollzustandes von technischen Systemen,
- **Inspektion:** Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes,
- **Instandsetzung:** Maßnahmen zur Herstellung eines erforderlichen (Soll-)Zustandes einer Maschine.

Insbesondere die Inspektion, unter dem im Wesentlichen die Maschinenzustandsüberwachung zu verstehen ist, wird vertiefend in ▶ Kap. 6.6.2 behandelt.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt der Instandhaltung ist die Instandhaltungsstrategie. Hierbei wird festgelegt, wann und wodurch initiiert verschiedene Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden. Typische Strategien sind [MURR 99a]:

- ausfallbedingte Instandhaltung,
- zeitabhängige Instandhaltung,
- zustandsorientierte Instandhaltung.

6.5.1.1 Reaktive Instandhaltung

Die Instandhaltungsmaßnahmen werden nach Bedarf – d. h. bei Maschinen- bzw. Komponentenausfall – durchgeführt. Es existiert kein Instandhaltungsplan; die Maschine wird bis zum Ausfall als funktionstüchtig angesehen (Bild 6.79).

Nachteile:

- Es entstehen hohe Lagerkosten, da der Ausfall nicht planbar ist und Ersatzteile vorgehalten werden müssen.
- Sind die benötigten Ersatzteile nicht verfügbar, resultiert eine erhöhte Stillstandszeit.
- Die durch den Komponentenausfall verursachte sekundäre Schädigung der Maschine ist nicht absehbar.

Vorteile:

- Kein eventuell unnötiger Zeitaufwand zur Maschineninstandhaltung.
- Vermeidung von Zusatzkosten für Zustandsüberwachungs-Systeme oder Planung.

6.5.1.2 Zeitabhängige (präventive) Instandhaltung

Diese Instandhaltungsstrategie wird momentan von produzierenden Unternehmen am häufigsten eingesetzt. Der Maschinenhersteller oder Betreiber definiert dazu auf Erfahrungswissen beruhende Intervalle, in denen Verschleißkomponenten ausgetauscht werden. Der tatsächliche Komponentenzustand wird dabei nicht mit einbezogen. Die aus Sicherheitsgründen oft sehr konservativ geschätzten Intervalle berücksichtigen somit lediglich die übliche Abnutzung der Komponenten im Betrieb und verhindern damit die vorhersehbaren und planbaren Produktionsausfälle (Bild 6.80).

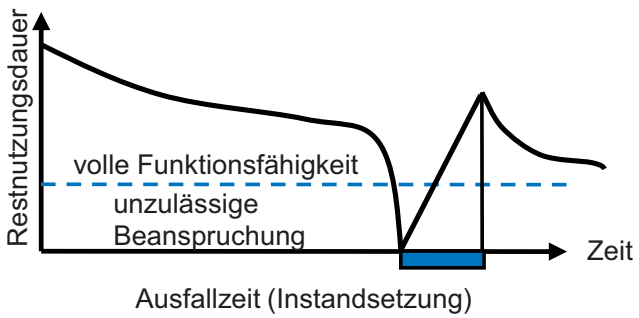


Bild 6.79 Reaktive Strategie zur Instandhaltung

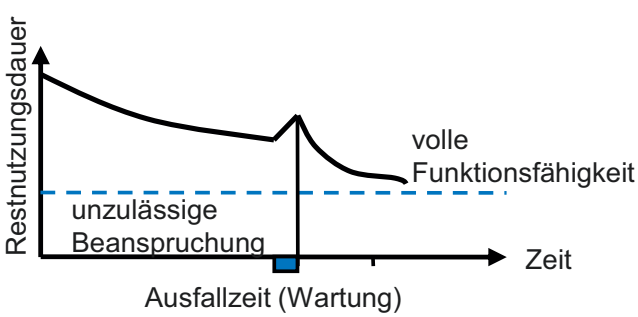


Bild 6.80 Präventive Strategie zur Instandhaltung

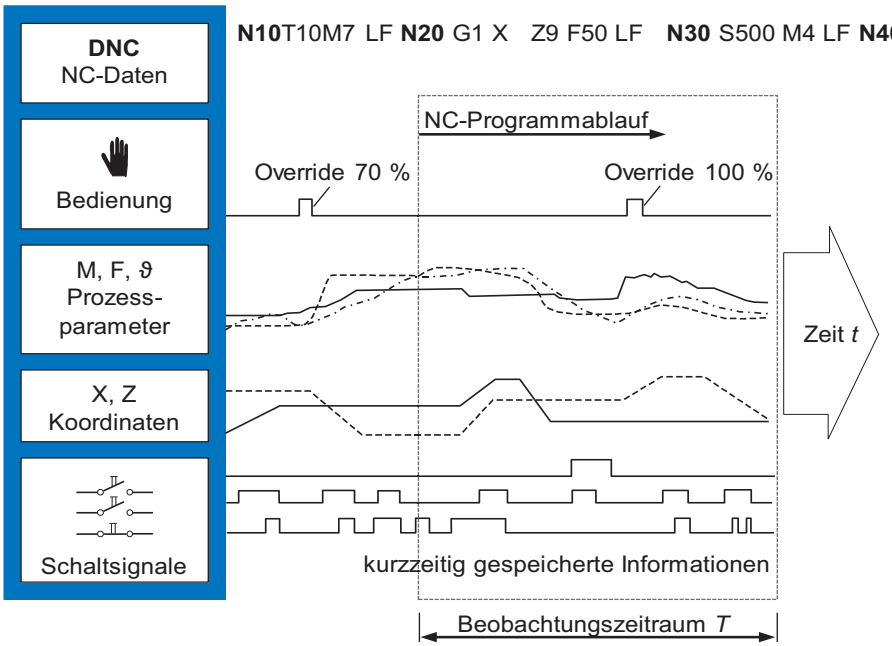


Bild 6.81 Prinzip eines Datenloggers für Werkzeugmaschinen

Nachteile:

- Ausfälle, die von Komponenten mit mangelhafter Qualität oder durch überdurchschnittliche Beanspruchung verursacht werden, können nicht verhindert werden.
- Es werden Komponenten ausgetauscht, welche noch nicht verschlissen sind.

Vorteile:

- Weniger ungeplante Ausfälle als bei ausfallbasierter Instandhaltung.
- Bessere Planbarkeit des Bedarfs von Ersatzkomponenten.
- Der Zeitpunkt für die Instandhaltung kann frühzeitig geplant werden, sodass der wirtschaftliche Schaden durch Maschinenstillstand minimiert werden kann.

Beispiel

Hinsichtlich Wartung und Inspektion werden im Allgemeinen firmeninterne sowie anlagen- bzw. maschinenspezifische Richtlinien ausgegeben.

Bei z. B. Werkzeugmaschinen wird regelmäßig eine Überprüfung des Schmierzustandes bzw. der Reibverhältnisse aller Führungsbahnen durchgeführt. Durch das Verfahren der Achsen ohne Last mit gleichzeitigem Messen des Motorstroms bzw. der Vorschubkräfte kann frühzeitig eine Verschlechterung des Führungsbahnzustandes erkannt und Abhilfe geschaffen werden. Hierzu ist eine entsprechende Trendauswertung über der Einsatzdauer der Maschine erforderlich. Auch die Funktionstüchtigkeit von Schaltern lässt

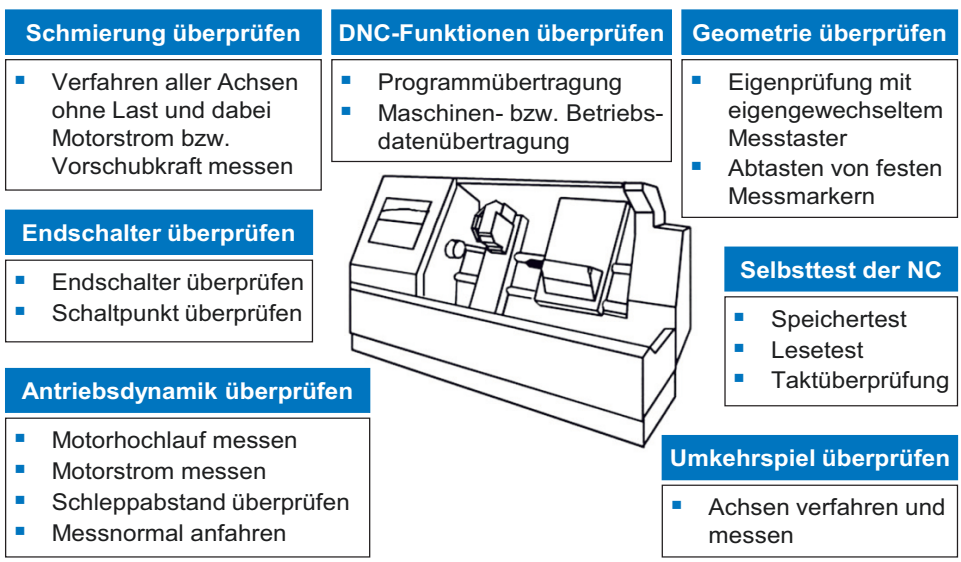


Bild 6.82 Aufgaben bei allgemeinen Funktionstests

sich einfach testen. Durch Auslösen verschiedener Schaltfunktionen oder Anfahren der Endschalter in allen Achsen kann aus dem Schaltzeitpunkt und der Stärke des Schalterprellens auf deren Zustand geschlossen werden.

Zum relativ schnellen Überprüfen der Maschinengenauigkeit werden vor Schichtbeginn oder in kurzen Abständen einfache Tests durchgeführt. Hierzu wird statt des Werkzeugs ein Messtaster eingewechselt und verschiedene Referenzpositionen am Maschinentisch angefahren. Umfangreichere Untersuchungen der geometrischen Genauigkeit sollten jedoch unbedingt in größeren Zeitabständen, etwa in viertel- oder halbjährlichen Intervallen, durchgeführt werden. Zur Messung der linearen Positionierabweichung, der Geradheits- und Winkelabweichung der Maschine stehen hierzu, wie in [YE92] beschrieben, verschiedene Verfahren zur Verfügung. Als Hilfsmittel kann beispielsweise ein Messlineal in Verbindung mit Messtastern oder ein Laserinterferometer verwendet werden.

Ein beispielhaftes Hilfsmittel zur manuellen Überwachung des Maschinenzustandes ist der Datenlogger für Werkzeugmaschinen. Sein Prinzip ist in Bild 6.81 gezeigt. Aufgabe des Datenloggers ist es, wichtige Informationen und Daten während des Betriebs der Maschine für eine bestimmte Zeitspanne zu speichern. Dies sind beispielsweise:

- aktuelle NC-Daten,
- Bedienungseingriffe,
- Prozessparameter (z. B. Drehmomente, Kräfte und Temperaturen),
- Maschinenparameter (z. B. Wege, Drehzahlen und Vorschübe) und
- Schaltsignale.

Dies ist im Bild 6.81 durch ein mit der Zeitachse mitlaufendes Fenster angedeutet, dessen Breite den Beobachtungszeitraum veranschaulicht. Alle Informationen innerhalb dieses Fensters sind gespeichert und können jederzeit abgerufen werden. Im Normalfall bewegt sich das Fenster mit der Zeit t vorwärts, d. h. in gleichem Maße, wie neue Informationen aufgenommen werden, gehen alte Informationen verloren. Tritt eine Störung an der Maschine auf, wird das Fenster angehalten. Somit werden die Informationen und Daten der Beobachtungszeit T vor der Störung bis zum Auftreten der Störung festgehalten. Eine genaue Analyse dieser Informationen kann oftmals zur Ermittlung der Störungsursache führen.

Viele Steuerungen beinhalten darüber hinaus integrierte Routinen zur automatisierten Inspektion. So werden von der NC-Steuerung integrierte Funktionen angeboten, um charakteristische Kenngrößen der Maschine und die Antriebsdynamik – z. B. Bestimmung des Übertragungsverhaltens der Achsen [ISER83] – zu überprüfen. Letzteres geschieht durch Auswerten verschiedener Messwerte, die beim Motorhochlauf der Vorschub- und Hauptantriebe ohne Last aufgezeichnet werden. Zu den charakteristischen Größen zählen hier der Schleppabstand, der Drehzahlverlauf über der Zeit sowie der Motorstrom.

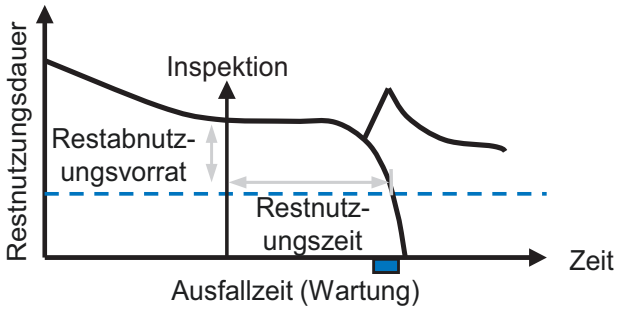


Bild 6.83 Zustandsorientierte (hier durch Inspektion) Strategie zur Instandhaltung

Darüber hinaus können wesentliche interne Funktionen wie der Timer, als auch Funktionen der Werkzeugmaschine wie Hydraulik und Pneumatikdrücke, überprüft und ein Fehlverhalten entsprechend gemeldet.

Während bei einigen Produktionsmaschinen (z. B. Werkzeugmaschinen) vor bestimmten Bearbeitungsschritten oder zum Schichtwechsel grundlegende Inspektionen durchgeführt werden können bzw. automatisiert durchgeführt werden (Bild 6.79), besteht bei hochtaktenden Produktionsanlagen (z. B. Montage- oder Verpackungsmaschinen) eine weitere Herausforderung darin, dass jede intervallbasierte Inspektion je nach Komponente einen kurzen Maschinenstillstand verursacht.

6.5.1.3 Zustandsorientierte Instandhaltung

Um die Anzahl ungeplanter Maschinenausfälle im Sinne des Gesamtziels weiter zu reduzieren, stellt die zustandsorientierte Instandhaltung einen weiteren signifikanten Ansatz dar. Durch eine kontinuierliche Überwachung und Auswertung der Komponentenzustände kann die Restlebensdauer prognostiziert werden bzw. drohende Ausfälle frühzeitig verhindert werden (Bild 6.83).

Nachteile:

- Hohe Investitionskosten durch zusätzliche Sensorik und eventuell Auswertungselektronik.
- Die Erstellung eines Systems zur automatisierten Zustandsüberwachung erfordert einen hohen Grad an Expertenwissen.

Vorteile:

- Maximale Planbarkeit für die Instandhaltung (besonders Maschinenstillstand).
- Zielgerichtete Identifikation von Komponenten ohne weiteren Abnutzungsvorrat.
- Ersatzteile müssen nicht vorgehalten bzw. gelagert werden und können bedarfsorientiert angefordert werden.

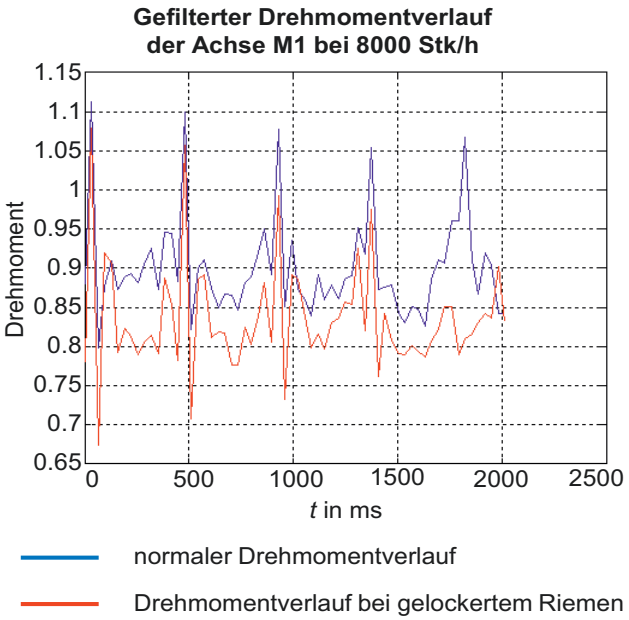


Bild 6.84 Drehmomentverlauf bei unterschiedlichen Riemenspannungen (normal, gelockerter Riemen)

Beispiel

Die zustandsbasierte Instandhaltung eignet sich für zahlreiche verschleißbehaftete Komponenten, welche sensorisch überwacht werden. Bild 6.84 zeigt zwei Drehmomentverläufe im Zeitbereich. Definiert man zum Sollverlauf eine mitlaufende Schwelle, lässt sich einfach bestimmen, ob die Komponenten (in diesem Fall ein Riemen) noch die gewünschte Funktionalität aufweisen, oder nicht.

Die einzelnen Ansätze zur Instandhaltung wurden Ende der 1980er Jahre des letzten Jahrhunderts zu einem strategischen Konzept, dem Total Productive Maintenance (TPM) ausgeweitet [BACK87]. Dabei stellt diese Strategie eine vorausschauende, vorbeugende Instandhaltung dar, die zur Steigerung der Anlageneffektivität das gesamte Unternehmen in die Instandhaltungsmaßnahmen mit einbezieht und nicht nur die Wirkphase der Anlage, sondern deren gesamten Lebenszyklus umfasst. Als einen wesentlichen Störfaktor der Effektivität wird hierbei der „Verlust durch Anlagenausfälle" gesehen, auf den insbesondere in ► Kap. 6.6.2 eingegangen wird. Es ist jedoch auch festzustellen, dass Nutzen und Umsetzungsmöglichkeiten dieser Strategie durchaus kontrovers diskutiert werden [RAKE93].

6.5.2 Maschinenzustandsüberwachung

Die Bedeutung der Maschinenüberwachung, oder allgemeiner der Inspektion, ergibt sich aus der Möglichkeit den aktuellen Zustand der Maschine zu erfassen. Hierdurch können einerseits ungeplante Ausfälle vermieden und damit die Ausfallzeit der Maschine bzw. deren Ausfallhäufigkeit verringert werden. Andererseits wird durch einen frühzeitigen Komponententausch die bei Ausfall eventuell stattfindende Sekundärschädigung von Maschinenteilen bzw. der Gesamtmaschine verhindert.

6.5.2.1 Kennwerte

Die wesentlichen Kennzahlen zur Beschreibung der sich aus Ausfall und Produktivbetrieb ergebenden Verfügbarkeit werden in den folgenden Unterkapiteln definiert.

Overall Equipment Effectiveness

Als Maß für die Qualität der Instandhaltung wird häufig die Gesamtanlageneffektivität (O.E.E., Overall Equipment Effectiveness) herangezogen [BACK87; BACK88; GROß81]. Dieser Kennwert beschreibt die Effektivität, mit der vorhandene Anlagen genutzt werden. Sie berechnet sich nach [GROß81] als:

$$O.E.E. = \text{Verfügbarkeit} \cdot \text{Effektivität} \cdot \text{Qualitätsfaktor [\%]} \quad (6.36)$$

Der wesentliche Bestandteil, welcher durch Instandhaltungsstrategien beeinflusst werden kann, ist an dieser Stelle die Verfügbarkeit.

Zuverlässigkeit $R(t)$

Die genaue Definition der Zuverlässigkeit unterscheidet sich je nach Literaturquelle [DOET85; MATH17; MEYR92]. Im Wesentlichen bezieht sie sich darauf, dass eine Maschine „… denjenigen durch den Verwendungszweck bedingten Anforderungen zu genügen [hat], die an das Verhalten ihrer Eigenschaften während einer gegebenen Zeitdauer gestellt sind" [MEYR92]. Sie ergibt sich empirisch als:

$$R(t) = \frac{\text{Anzahl der verfügbaren Einheiten}}{\text{Anzahl der betrachteten Einheiten}} \quad (6.37)$$

Ausfallrate λ

Die Ausfallrate ergibt sich als statistisches Maß aus dem Verhältnis der Anzahl der ausgefallenen Einheiten zur Anzahl der nicht ausgefallenen Einheiten bezogen auf den Betrachtungszeitraum Δt:

$$\lambda(t) = \frac{n(t) - n(t+\Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} \quad (6.38)$$

Mittlere störungsfreie Zeit (Mean Time Between Failure, MTBF)

Die MTBF bezeichnet den Erwartungswert der Betriebsdauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen (Bild 6.85). Im Falle konstanter Ausfallraten λ ergibt sich die mittlere störungsfreie Zeit als:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (6.39)$$

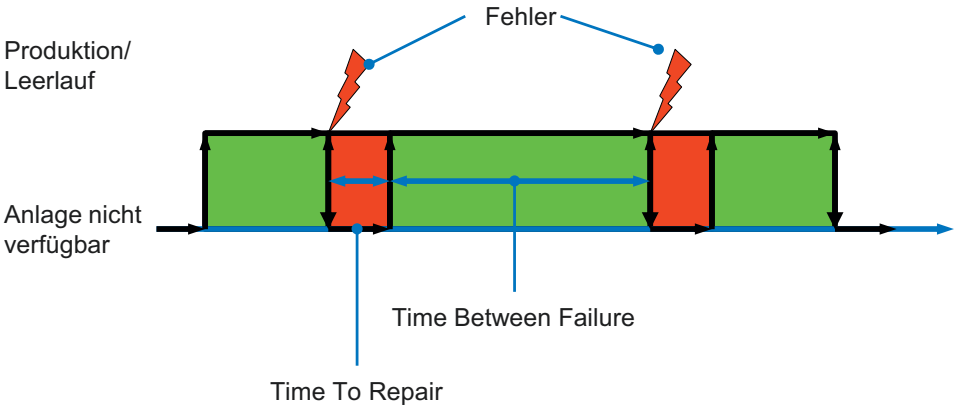


Bild 6.85 Time To Repair und Time Between Failure in Bezug zur gesamten Produktionszeit

Mittlere zu erwartende Reparaturdauer (MTTR)

Die mittlere zu erwartende Reparaturdauer MTTR (Mean Time To Repair) ist die Zeit, die im Mittel für eine Reparatur erforderlich ist (Bild 6.85). Somit ist diese Zeit eine technisch bedingte Ausfallzeit, in der die Werkzeugmaschine nicht produktiv arbeiten kann. Fällt die Maschine unerwartet aus, so verlängert sich insbesondere diese Zeit um den Anteil, der für Diagnose und Ersatzteilbeschaffung aufgewendet werden muss. Auf dieser Tatsache begründet sich ein wesentlicher Nutzen der Maschinenüberwachung.

Davon ausgehend kann die Verfügbarkeit mit MTBF und MTTR wie folgt definiert werden:

$$V = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{6.40}$$

Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit ist ein operationsbezogener Wert. Er gibt an, wie lange die Anlage produktiv genutzt werden kann. Damit ist die Kosteneffizienz eines Produktionssystems direkt von der Verfügbarkeit abhängig. Die Verfügbarkeit einer Anlage lässt sich alternativ zu Gleichung (6.40) auch wie folgt definieren:

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Gesamtzeit - Gesamtausfallzeit}}{\text{Gesamtzeit}} = \frac{I + B}{P} \quad \text{mit } P = I + B + R + W \tag{6.41}$$

mit:

P Planbetrieb,
I Leerlauf,
B Messwert,
R Reparatur,
W Wartung

Bei der Wartung wird nicht explizit zwischen geplant und ungeplant unterschieden.

6.5.2.2 Sensorische Zustandserfassung

Bei der Überwachung des Zustandes mechanischer Komponenten handelt es sich im Allgemeinen um eine Überwachung, die sich langperiodisch über die gesamte Lebenszeit der Maschine erstreckt (vgl. Bild 6.3). Dies liegt darin begründet, dass Verschleißeffekte und Schäden in mechanischen Komponenten sich häufig über längere Zeiträume erstrecken. Dabei erfolgt die Überwachung dieser Komponenten üblicherweise durch den Einsatz von sensorbasierten Systemen.

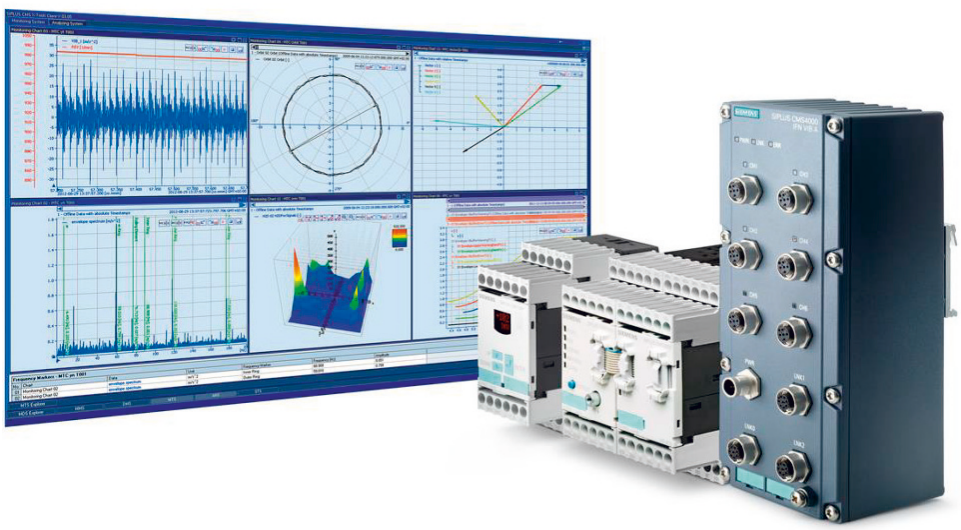


Bild 6.86 SIPLUS CMS der Firma Siemens. Quelle: SIEMENS

Mit dieser Datenbasis als Grundlage können anschließend Verfahren wie z. B. Schwingungsanalysen, Thermographie, vibroakustische Auswertungen oder Ölanalysen [STRO98] durchgeführt werden. Dabei wird grundsätzlich zwischen steuerungsinterner und -externer Zustandsüberwachung (Sensorik und Auswertung) unterschieden.

Steuerungsexterne Zustandsüberwachung

In produktionstechnischen Anlagen wird häufig eine steuerungsexterne Zustandsüberwachung angewendet. Dies kann durch verschiedene Faktoren motiviert sein. Häufig sollen nur spezifische Komponenten bezüglich ihrer Abnutzung überwacht werden oder die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Steuerung ist für eine Zustandsüberwachung nicht hinreichend. Auch das spätere Nachrüsten von Lösungen zur Zustandsüberwachung kann ein Entscheidungsgrund für externe Systeme sein.

Auf dem Markt verfügbare Lösungen bieten zur Realisierung nicht nur die notwendige externe Sensorik, sondern auch entsprechende Hardware an, welche Auswertungsalgorithmen, Visualisierung und die Schnittstelle zu Leitsystemen und dem Internet direkt beinhalten. Beispiele für solche Systeme sind „FAG DTECT X1 s“ der Firma Schaeffler[1], „Ω-Guard“ der Firma Bachmann[2], „@ptitude Asset Management System“ von SKF[3] oder „SIPLUS CMS“ der Firma Siemens[4]. Letztere bietet dabei ein skalierbares System an, welches in der kleinsten Form eine Lager- und Schwingungsüberwachung ohne notwendige Parametrierung ermöglicht (CMS1000) und in der leistungsfähigsten Form die Angabe von anwendungsspezifischen Kennwerten sowie die projektbasierte Implementierung eigener Überwachungsalgorithmen erlaubt (Bild 6.86). Durch die Skalierung der Produkte lässt sich auch für unerfahrene Anwender die Hürde zum Einsatz komplexer und teurer CM-Systeme herabsetzen.

In der Tab. 6.1 werden einige Vor- und Nachteile bei Verwendung steuerungsexterner Systeme gegenübergestellt.

Für eine kontinuierliche Maschinenzustandsüberwachung von geschlossenen Systemen – wie z. B. Werkzeug-

1 z. B. Schaeffler: http://www.schaeffler.de/
2 z. B. Bachmann: http://www.bachmann.info
3 z. B. SKF: http://www.skf.com
4 z. B. Siemens (Automation): http://www.automation.siemens.com

Vorteile steuerungsexterner Überw.	Nachteile steuerungsexterner Überw.
Sehr hohe Abtastraten (unabhängig von Steuerungs-Takt) möglich	Kostenintensiv, da teure Messhardware (z. B. CompactRio®, dSpace, Norma)
Keine Delays durch z. B. Bushardware bei der Signalaufzeichnung	Zusätzliche Visualisierungshardware notwendig
Durch passende Sensorik beliebige Prozessgrößen überwachbar	Sensoren bilden zusätzliche Fehlerquelle
Hohe Flexibilität: nachrüstbar, unterschiedliche Verwendungsorte	Kalibrierungsaufwand

Tab. 6.1 Vor- und Nachteile der steuerungsexternen Zustandsüberwachung

Vorteile steuerungsinterner Überw.	Nachteile steuerungsinterner Überw.
Kostengünstig, da keine zusätzliche Mess- bzw. Verarbeitungslösung benötigt wird	Abtastrate an Zykluszeit der Steuerung gebunden
Keine neuen Fehlerquellen durch zusätzliche Sensorik	Verzögerungen durch Bussysteme
Auswertungsergebnisse können direkt am Maschineninterface visualisiert werden	Für bestimmte Prozesswerte existieren nur Schätzwerte (z. B. Drehmoment, Beschleunigung, …) bzw. ist die Güte des berechneten Wertes vom Motormodell abhängig
	Leistungsbeschränkung der Berechnungshardware
	Es muss ein Zugriff auf das Steuerungsprojekt existieren

Tab. 6.2. Vor- und Nachteile der steuerungsinternen Zustandsüberwachung

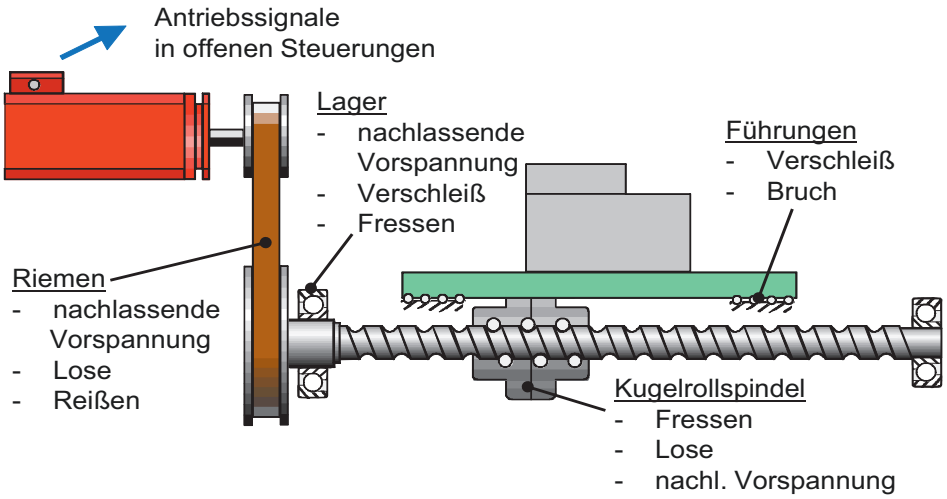


Bild 6.87 Beispielhafte Komponenten zur steuerungsintegrierten Maschinenüberwachung

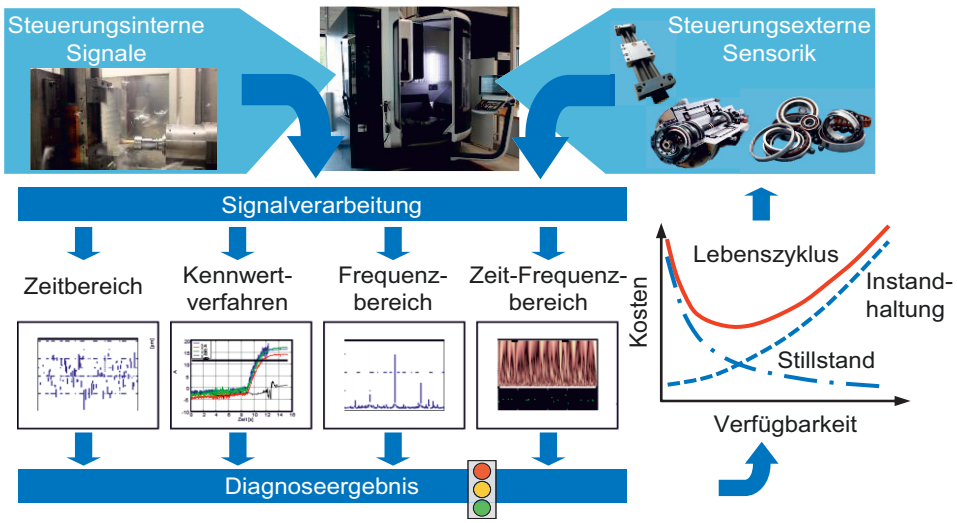


Bild 6.88 Kombination von steuerungsinternen und -externen Signalen zur Zustandsüberwachung

maschinen – eignen sich Systeme mit ausschließlich steuerungsexterner Überwachung aus drei Gründen nur wenig:

1. Unter den schwierigen Umgebungsbedingungen im Arbeitsraum von Werkzeugmaschinen (Kühlschmierstoffdämpfe, Schwingungen etc.) sinkt die Zuverlässigkeit solcher Sensorsysteme über den notwendig langen Überwachungszeitraum.
2. In Werkzeugmaschinen wird unter ständig schwankenden Lasten gefahren, sodass die zu überwachenden Signale stark variieren und streuen können.
3. Darüber hinaus ist bei temporär applizierten Sensoren die Ankopplung an die Maschine schwierig hinsichtlich der Kontaktqualität und der Reproduzierbarkeit des Ortes der Sensoranbringung.

Steuerungsinterne Zustandsüberwachung

Alternativ zur externen Erfassung und insbesondere Auswertung von Sensordaten, wird bei der Zustandsüberwachung von Produktionsmaschinen häufig auf steuerungsintern vorliegende Werte – z. B. Antriebsdaten wie Ströme, Drehmomente und Drehzahlen – zurückgegriffen. Oft ist dadurch keine weitere Sensorik notwendig und es kann zusätzlich auf vorberechnete Systemvariablen zugegriffen werden.

Analog zu Tab. 6.1 stellt Tab. 6.2 einige Vor- und Nachteile bei Verwendung steuerungsinterner Systeme gegenüber.

Beispielhafte Komponenten, die durch einen solchen steuerungsintegrierten Ansatz überwacht werden können, sind in Bild 6.87 dargestellt.

Das optimale System ist immer komponenten-, maschinen- bzw. applikationsspezifisch aufzubauen. Häufig wird heutzutage eine Kombination von externer Sensorik (z. B. Schwingungswächter in Verpackungsmaschinen) und internen Daten (z. B. Antriebswerte) verwendet um die Vorteile beider Systeme zu nutzen (Bild 6.88).

Über das reine Angebot von Auswertungslösungen hinaus existieren Dienstleister, welche Anwender von der Auswahl des richtigen Systems bis hin zur Integration in die Automatisierungspyramide [SCHI90] – d. h. von der Aktor- und Sensorebene bis ins ERP bzw. darüber hinaus – beraten

und unterstützen. Ein Beispiel für einen solchen Anbieter ist ifm consulting mit dem Konzept „Real Time Maintenance®“[5].

Ein weiteres Produkt, welches sich insbesondere durch die Bereitstellung einer großen Anzahl an Auswertungsalgorithmen kennzeichnet, ist die „TwinCAT Condition Monitoring Library“ der Firma Beckhoff[6]. Aus einem „Baukasten von mathematischen Algorithmen“ kann der Anwender anwendungsspezifische skalierbare Lösungen kombinieren und einsetzen. Der Anwendungsbereich ist auf Plattformen, welche mit TwinCAT projektierbar sind, beschränkt.

6.5.3 Messwertanalyse

Die Maßnahmen, die bei einer Inspektion erforderlich sind, richten sich nach der Komplexität des zu begutachtenden Objektes. Grundsätzlich lassen sich die Maßnahmen nach [DIN19] unterteilen in

- Messen,
- Beobachten und
- Prüfen.

Die sensorische Datenerfassung – das Messen – das in ▶ Kap. 6.5.2 ausführlich behandelt wurde, dient der quantitativen Erfassung von Objekten und Daten. Die Beobachtung hingegen zielt auf eine qualitative Erfassung von Daten mittels zielgerichteter, aufmerksamer Wahrnehmung ab. Im Folgenden widmet sich das Kapitel verstärkt dem „Prüfen“.

„Prüfen“ bedeutet über das „Messen“ hinaus im Rahmen der Diagnose festzustellen, dass bzw. ob bestimmte Qualitätskriterien erfüllt sind. Somit umfasst „Prüfen“ immer eine Entscheidung über den Zustand. Dazu ist nicht unbedingt die Erfassung quantifizierbarer Größen erforderlich. Beispielsweise fallen unter „Prüfen“ auch die üblichen Sichtkontrollen, das Ablesen vorhandener Anzeigen etc.; ebenso, wenn dem Maschinennutzer Unregelmäßigkeiten im Maschinenbetrieb auffallen wie beispielsweise ungewöhnliche Geräusche oder Überhitzung von Komponenten. Auf Basis der Prüfung besteht dann bei einer erkannten Störung die Herausforderung darin, diese genau zu lokalisieren und deren Ursache zu ermitteln. Eine wesentliche Aufgabe besteht somit darin, die erfassten und aufbereiteten Signalmuster (Symptome) derart zu klassifizieren, dass die aufgetretene Störung den verschiedenen Komponenten zugeordnet werden kann. Einige hierzu einsetzbare funktionale Grundlagen und Algorithmen der verschiedenen einsetzbaren Werkzeuge wurden bereits in ▶ Kap. 6 vorgestellt.

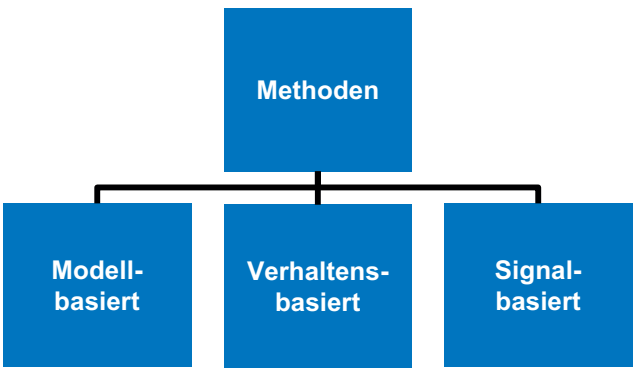
In diesem Kapitel werden verschiedene Transformationen, Algorithmen und Methoden vorgestellt, um eine automatisierte Analyse und Bewertung auf Basis erfasster Sensor- und Steuerungsdaten durchführen zu können.

6.5.3.1 Konventionelle Diagnosefunktionen

Die Durchführung der Diagnose erfolgt im Allgemeinen in verschiedenen Stufen, bei denen je nach Komplexitätsgrad der Diagnoseaufgabe unterschiedliche Funktionen, Algorithmen und Methoden angewendet werden. Hierbei kann der Benutzer der Maschine das erste Glied in der Diagnosekette sein. Die Analysemöglichkeiten eines Bedieners beschränken sich jedoch häufig auf die optische Diagnose und die Güte ist stark vom vorliegenden Expertenwissen abhängig. Dadurch begründet werden in diesem Unterkapitel im Schwerpunkt automatisierte Diagnosesysteme betrachtet.

Grundsätzlich unterscheidet man bei den Methoden zwischen signalbasierten, modellbasierten und verhaltensbasierten Analysemethoden (■ Bild 6.89) [RUDO14]. *Signalbasierte* Methoden betrachten direkt die aufgezeichneten Sensor- und Steuerungssignale und unterteilen sich dann weiter in zeitbasierte (z. B. Hüllkurven), frequenzbasierte (z. B. Fourier-Transformation) und als Mischform in zeit-frequenzbasierte Funktionen. *Modellbasierte* Methoden transformieren nicht mehr direkt die Signale, sondern extrahieren aus diesen weiterführende Informationen bzw. berechnen durch zeitgleiche Betrachtung mehrerer Signale indirekte Signale, welche nicht direkt gemessen werden können. Dies können für Parameterschätzungen statistische Verfahren sein (z. B. Least-Square), bei der Schätzung des Zustandsraums (z. B. Zustandsbeobachter) werden aus der Korrelation verschiedener Signale Zustände abgeleitet, die dann für die Verfahren der Paritätsgleichung in Zustandsraum-Modelle überführt werden können. Die dritte Kategorie bezeichnet die *verhaltensbasierten* Methoden. Zu diesen gehören z. B. Künstliche Neuronale Netze, deren Parameter für den applikationsspezifischen Einsatz gelernt werden. Eine differenziertere Übersicht der vorgestellten Kategorisierung zeigt ■ Bild 6.89.

5 Ifm cosulting: http://www.ifm-consulting.com
6 Beckhoff: http://www.beckhoff.de



■ **Bild 6.89** Kategorisierung gängiger Methoden zur Überwachung und Diagnose. Quelle: [RUDO14]

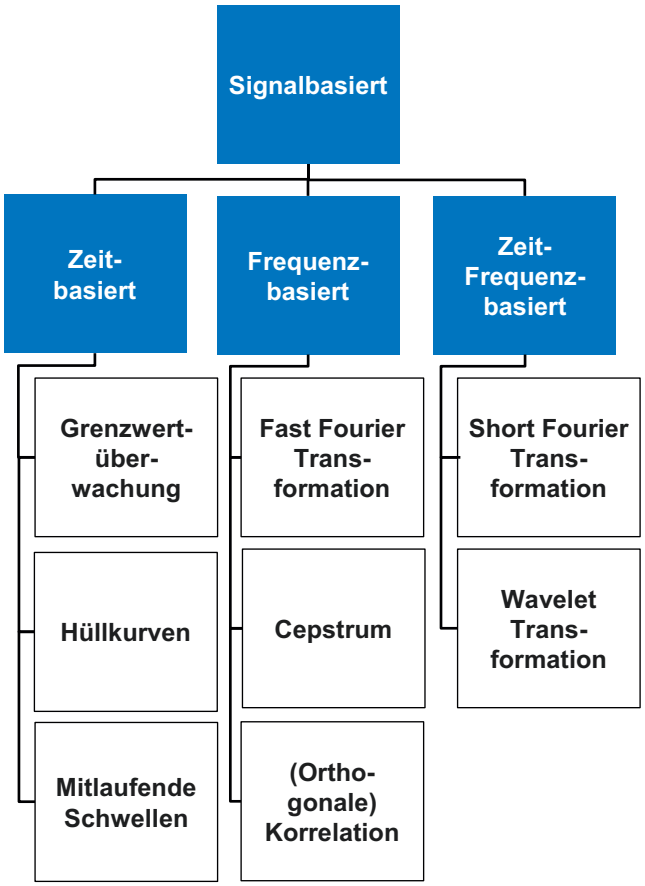


Bild 6.90 Überblick über signalbasierte Analysemethoden

Signalbasiert

Bei der signalbasierten Signalanalyse werden zeitbasierte, frequenzbasierte oder – als Mischform – zeit-frequenzbasierte Methoden zur Diagnose angewendet. Eine Übersicht über gängige Analysemethoden zeigt (Bild 6.90).

Zeitbasiert

Bei der zeitbasierten Signalanalyse besteht die einfachste Form, um Aussagen über die Gleichheit von Signalen zu treffen, in der Differenzbildung. Betrachtet man das Differenzsignal, lässt sich feststellen, an welchen Stellen die Signale sich unterscheiden. Analysiert man die Länge der Intervalle, in denen die Abweichungen auftreten, gibt das Hinweise über die Art des Signalunterschiedes. Liegen zwei binäre Signale vor, ist auch ein einfacher Bitvergleich durch die logische Operation „AND“ möglich. Summiert man alle Abweichungen des Differenzsignals, lässt sich quantitativ feststellen, in welchem Grad zwei Signale voneinander abweichen. Allerdings lassen sich dann keine lokalen Aussagen mehr über Unterschiede in den Signalen treffen.

Einen weiteren Algorithmus, um zwei Signale zu vergleichen bzw. zu analysieren stellt die Kreuzkorrelation als Maß für die lineare Abhängigkeit der beiden Signale dar. Durch Korrelation bei unterschiedlichen zeitlichen Verschiebungen τ können Informationen über zeitliche Verschiebungen zwischen zwei Signalen gewonnen werden. Die Kreuzkorrelation ist dabei in Anlehnung an [KIEN08, S. 202] für reellwertige Funktionen $x(t)$ und $y(t)$ definiert als:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot y(t+\tau) dt \qquad (6.42)$$

mit

τ = zeitliche Verschiebung

T = betrachtetes Zeitfenster

x üüüü

Frequenzbasiert

Eine Alternative zur Analyse eines Signals im Zeitbereich bietet die Frequenzanalyse, deren Ziel es ist, Prozesse „mathematisch systematisch zu beschreiben und analytisch zu untersuchen“ [KOLE08, S. 342]. Dazu werden kontinuierliche Signale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert. Der mathematische Zusammenhang zwischen der Signaldarstellung im Zeitbereich und der Darstellung im Frequenzbereich wird dabei durch die Fourier-Transformation beschrieben [KOLE08, S. 42]. Nach [KOLE08, S. 345] ergeben sich die Transformationen zu:

$$X(f) = \mathrm{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \tag{6.43}$$

$$x(t) = \mathrm{F}^{-1}\{X(f)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{+j2\pi ft} df \tag{6.44}$$

mit

$X(f)$ = Signal im Frequenzbereich

$x(t)$ = Signal im Zeitbereich

Aus der eindeutigen Umkehrbarkeit zwischen Vorwärts- (6.44) und der Rücktransformation (6.43) folgt, dass durch die Fourier-Transformation weder Informationen verloren gehen, noch neue Informationen gewonnen werden können [KOLE08, S. 345]. Vielmehr betrachtet die Analyse im Zeitbereich, **wann** bestimmte Charakteristika des Signals auftreten, während sich die Frequenzanalyse mit der Fragestellung beschäftigt, **wie oft** die Charakteristika auftreten [KOLE08, S. 38].

Da die Frequenzanalyse sich primär zur Untersuchung von periodischen Signalen eignet, wird sie z. B. zur Schwingungsdiagnose eingesetzt. Wie bei Kolerus in [KOLE08, S. 37] zu lesen, ermöglicht insbesondere dieses Verfahren eine Zuordnung von Schwingungen zu einzelnen Komponenten einer Maschine, welche im Zeitbereich in dieser Form nicht möglich wäre. Dazu wird heutzutage häufig die Fast-Fourier-Transformation (FFT) verwendet. Diese stellt eine speichereffiziente und schnelle Form der diskreten Fourier-Transformation dar und kann daher auch auf eingebetteten Systemen zur Frequenzanalyse verwendet werden.

Ein weiterer Vorteil der Fourier-Transformation besteht darin, dass aus Faltungen im Zeitbereich nach der Transformation Multiplikationen werden und umgekehrt. Allerdings muss man bedenken, dass die Transformation in den Frequenzbereich und zurück Zeit kostet, die für die Prozess-

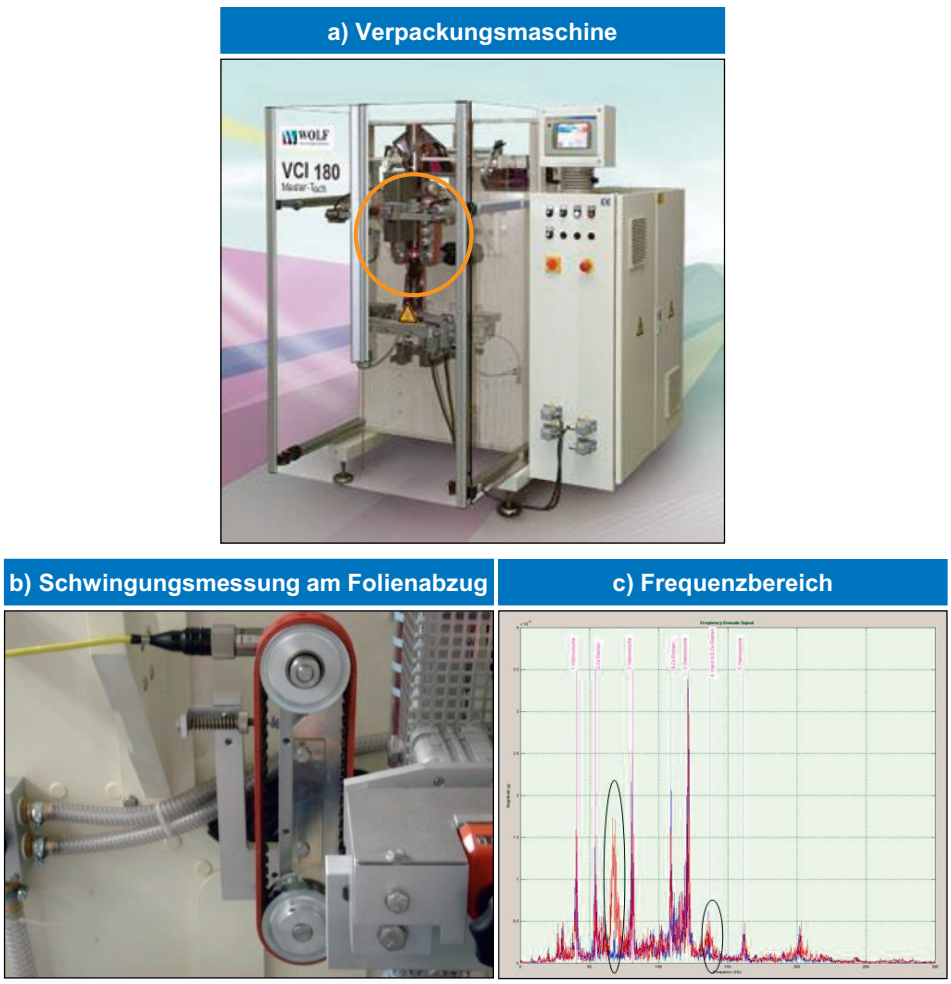


Bild 6.92 Schwingungsanalyse des Folienabzugs einer Schlauchbeutelmaschine (=Verpackungsmaschine). Quelle: WOLF Verpackungsmaschinen



Bild 6.93 (Beschleunigungs-) Messungen am Siegeltisch einer Verpackungsmaschine in Zeit- (c) und Frequenzdarstellung (d). Quelle: WOLF Verpackungsmaschinen

überwachung (z. B. Kollisionsüberwachung) essentiell ist.

Ein Beispiel, die Fourier-Transformation zur Berechnung von sonst komplexen Formeln zu benutzen, ist die in Gleichung (6.42) definierte Kreuzkorrelation. Diese stellt für den Vergleich von zwei Signalen ein wichtiges Werkzeug dar, um zeitliche Verschiebungen zwischen zwei Signalen zu bestimmen. Statt diese im Zeitbereich durch Überlagerung zu berechnen, können die Signale in den Frequenzbereich transformiert werden. Für Formel (6.42) ergibt sich dann die Inverse Fourier-Transformation:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{XY}(f) \cdot e^{i2\pi f \tau} df$$
mit $S_{XY}(f) = X(f) \cdot Y(f)$ als Kreuzleistungsspektrum, gebildet durch Multiplikation der fourier-transformierten Signale (6.45)

Bildet man vom Kreuzleistungsspektrum, welches im Frequenzbereich eine Multiplikation der transformierten Signale darstellt, die inverse Fourier-Transformation, ergibt sich daraus im Ortsraum wieder die Kreuzkorrelation. Diese Umformung ist in Formel (6.45) dargestellt.

Wie zuvor dargestellt eignet sich die Fourier-Transformation insbesondere zur Untersuchung von periodischen Signalen. Bild 6.92 a zeigt eine Schlauchbeutelmaschine der Firma Wolf. Für den Transport der Schlauchbeutelfolie ist ein Folienabzug zuständig, der kontinuierlich Folie von einer Rolle abzieht. Für den Betrieb ist am Folienabzug der Anpressdruck zu überwachen, für die reine Zustandsüberwachung der Verschleiß der Riemen. Daher wurde am Folienabzug ein Schwingungssensor angebracht (Bild 6.92 b). Beim Eingriff der Zähne des Folienabzug-Riemens in Antriebszahnrad entstehen Schwingungen, die durch die Schwingungen am Folienabzug moduliert werden. Bei fehlerhaftem Betrieb bzw. drohendem Verschleiß ergeben sich im Spektrum Amplitudenveränderungen (Bild 6.92 c, schwarze Umrandung).

Das zweite Beispiel behandelt die Quersiegel-Einheit der Verpackungsmaschine (Bild 6.93 a und b), welche bereits gefüllte Beutel versiegelt und gleichzeitig mittels eines Messers abtrennt. Mit zunehmender Betriebsdauer kann es zum Anschlagen des Siegeltisches aufgrund von initialen Fehlparametrierungen oder veränderter Mechanik kommen. Um dies zu detektieren wurde ein piezoelektrischer Sensor zur Beschleunigungsaufnahme angebracht. Während die Aussagen über ein Anschlagen des Siegeltisches im Zeitbereich (Bild 6.93 c) wenig Aussagen zulassen, ist im Frequenzbereich (Bild 6.93 d) eine deutliche Abweichung zwischen dem Soll-Zustand (rot) und dem Schadensbild bei

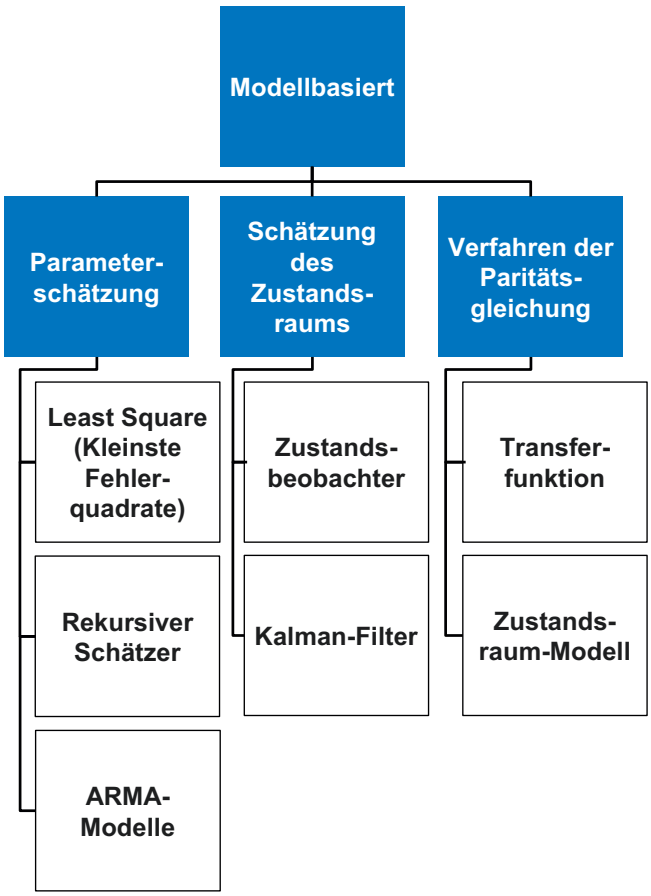


Bild 6.94 Überblick über modellbasierte Analysemethoden

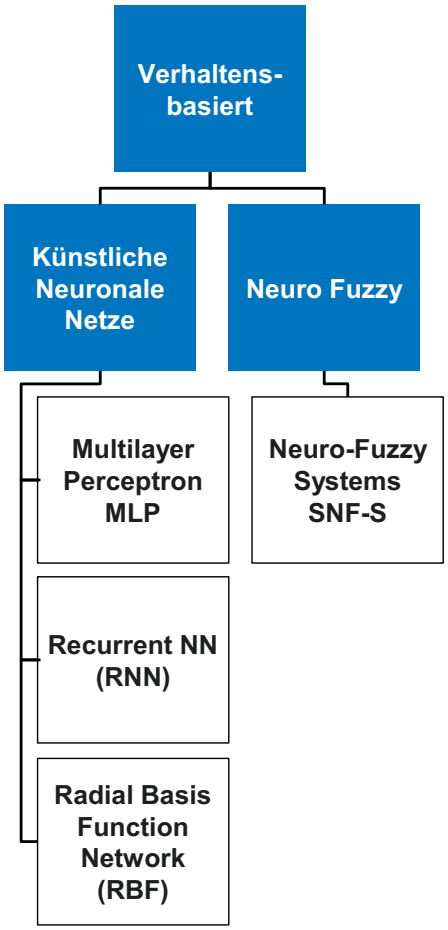


Bild 6.95 Überblick über modellbasierte Analysemethoden

Anschlagen (blau) zu erkennen. Obwohl die Schwingungserscheinungen sehr komplex sind, kann durch z. B. FFT und Hüllkurvenanalyse eine Entscheidung getroffen werden.

Modellbasiert

Modellbasierte Methoden extrahieren aus Messsignalen Muster und Parameter (z. B. Parameter statistischer Verteilungen), um aus diesen weiterführende Informationen zu berechnen. Darüber hinaus können insbesondere auch indirekte Signale erzeugt werden, welche nicht direkt gemessen werden können. Eine Übersicht häufig verwendeter Methoden zeigt Bild 6.94.

Als ein Beispiel können Zustandsbeobachter dazu eingesetzt werden, aus erfassten Messgrößen nicht bekannte Zustandsgrößen zu rekonstruieren. Damit ist ein Beobachter ein parallel geschaltetes Modell, welches sich iterativ dem realen System durch Beobachten annähert. Dazu wird jedoch die Beobachtbarkeit aller Zustandsgrößen vorausgesetzt. Weiterführende Informationen zu Zustandsbeobachtern und der Beobachtbarkeit von System sind ▶ Kap. 3.4.3 zu entnehmen.

Verhaltensbasiert

Verhaltensbasierte Methoden als dritte Kategorie versuchen, das Systemverhalten zu erlernen. Dazu werden beispielsweise künstliche neuronale Netze oder Neuro-Fuzzy-Systeme erstellt und deren Parameter wie z. B. Gewichtungen, Übertragungs- und Aktivierungsfunktionen sowie Schwellwerte für den applikationsspezifischen Einsatz gelernt. Ein ausführliches Beispiel zur Merkmalsklassifikation mittels neuronalen Netzen gibt ▶ Kap. 6.5.3. Eine differenziertere Übersicht der vorgestellten Kategorisierung zeigt Bild 6.95.

Expertensysteme und Künstliche Intelligenz

Ein Ansatz, der insbesondere bei der Maschinendiagnose Einsatz fand, ist die wissensbasierte Diagnose. Sie findet in sogenannten Expertensystemen Anwendung. Ein solches System soll in der Lage sein, mittels einer internen Wissensbasis Anfragen zu präzisen und vollständigen Problemstellungen zu beantworten und durch Hilfestellungen zur Umsetzung der Antwort beizutragen [WECK01]. In diesem Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI, englisch: Artificial Intelligence, AI) wird versucht, das Wissen des menschlichen Experten nachzubilden. Ein solches Expertensystem besteht aus (Bild 6.96):

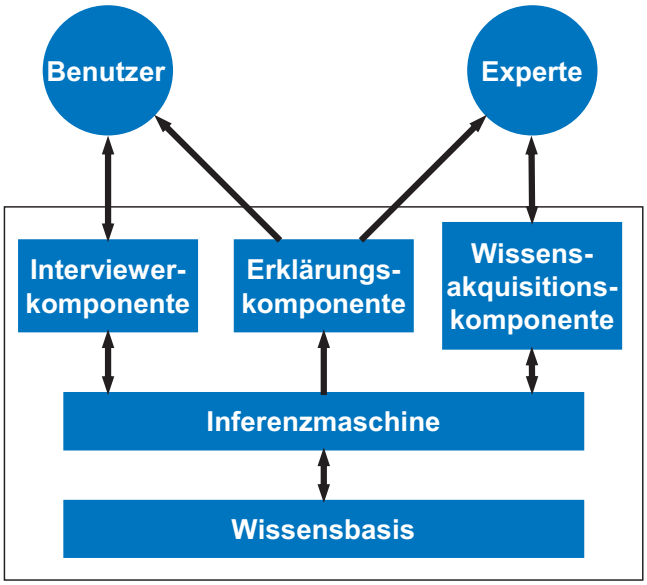


Bild 6.96 Architektur eines Expertensystems. Nach [MILB9

- einer Komponente zur Wissensakquisition,
- einer Wissensbasis (mit statischem und dynamischem Wissen),
- einer Erklärungskomponente sowie
- einer Inferenzmaschine, die die fallspezifische Schlussfolgerung aus der Wissensbasis durchführt.

Die Inferenzmaschine kann dabei durch verschiedene Schlussfolgerungsverfahren realisiert werden, wie beispielsweise Neuronale Netze, oder auch logikbasierte Programmiersprachen, wie PROLOG.

Der Einsatz solcher Expertensysteme für die Maschinendiagnose war insbesondere in den 1980er Jahren des letzten Jahrhunderts Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

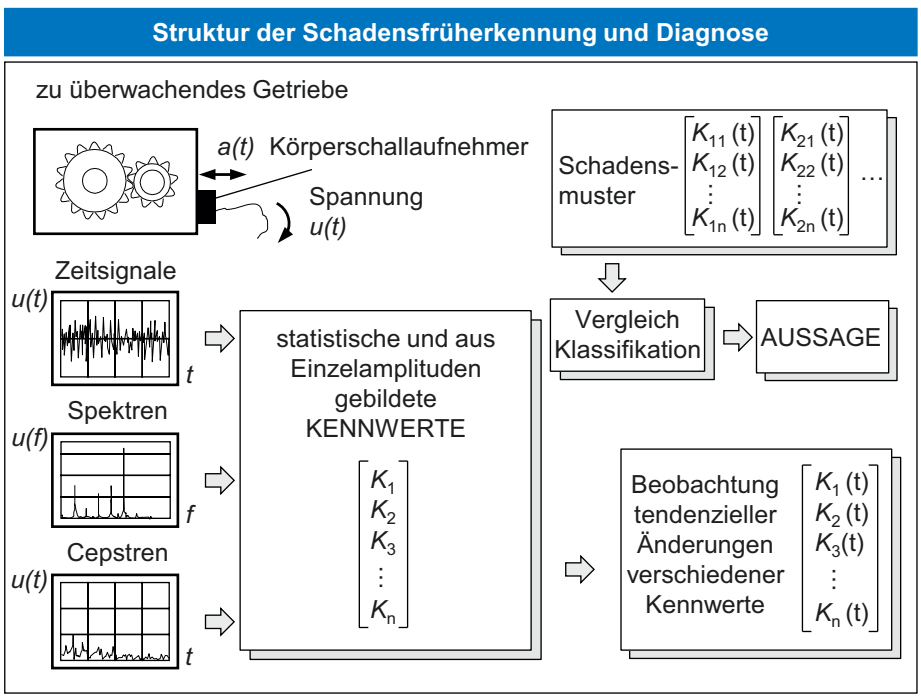
Jedoch blieben diese technisch hochkomplexen Systeme in der industriellen Anwendung bisher wenig erfolgreich. Wesentliche Gründe hierfür sind:

- Die Wissensakquisition solcher Systeme gestaltet sich als zu umfangreich, um eine für die industrielle Anwendung adäquate Wissensbasis zu erhalten. Dieses Problem der Wissensakquisition wurde zwar von der Forschung angegangen [PHIL92], jedoch ergaben sich daraus für das komplexe Anwendungsfeld der Maschinendiagnose keine hinreichend einsetzbaren Systeme.
- Die Fehleranfälligkeit solcher Systeme beim Schließen hängt direkt von der Qualität der Wissensbasis ab. Passen Problemstellung und Wissensbasis nicht zueinander, so können die Aussagen des Expertensystems leicht derart falsch werden, dass sie für den Anwender unverständlich sind. Dies führt in direkter Konsequenz zu einer mangelnden Akzeptanz beim Anwender.

6.5.3.2 Anwendungsbeispiele

Ein Anwendungsbeispiel für die Diagnose ist die Überwachung von Getrieben (Bild 6.97). Bei dieser Anwendung bildet der Körperschall die physikalische Basisgröße zur Beurteilung des Verzahnungszustands. Aus den drei Verarbeitungsstufen des Körperschallsignals Zeitspanne, Spektren und Cepstren können entweder über statistische Berechnungsvorschriften (Mittelwerte und Häufigkeitsverteilungen) oder über die Berechnung und Zusammenfassung von

Bild 6.97 Struktur der Schadensfrüherkennung und Diagnose. Nach [MENZ73; WECK77]



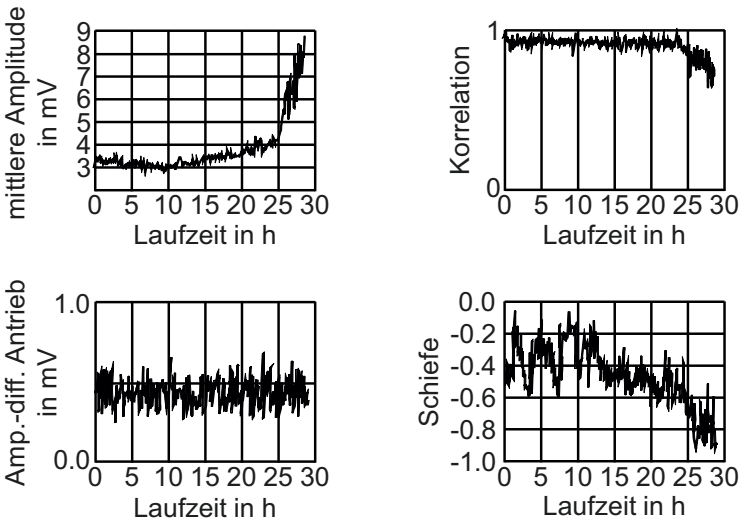


Bild 6.98 Entwicklung von Merkmalen bei einem Prüfstand mit Zahnfußbruch

Geometriedaten	Betriebsdaten	Versuchsverlauf
m_n = 5 mm b = 16 mm z_1 = 21 z_2 = 23 Werkstoff 42 CrMo4 V	T = 800 Nm n = 3000 min^{-1} ϑ_m (Öl) = 75°C	– starke Grübchenbildung – Zahnfußbruch nach 29h Laufzeit

Einzelpegeln (z. B. Systemgrundfrequenzen, deren harmonischen Reihen und Pegeldifferenzen) unterschiedliche Einzelkennwerte gebildet werden. Eine verknüpfende, vektorielle Betrachtung dieser Merkmale sowie deren Veränderungen $K_i(t)$ erlaubt es dann, über Vergleiche mit bekannten Mustern von aufgetretenen Schäden, Veränderungen der Bauteile frühzeitig zu erkennen. Um verschiedene Schadensarten sowie unterschiedliche Anwendungsfälle behandeln zu können, müssen mehrere Vergleichsmuster mit entsprechenden Merkmalen (in Bild 6.97 exemplarisch $K_{1i}(t)$, $K_{2i}(t)$) zur Verfügung stehen.

Bild 6.98 verdeutlicht den typischen Verlauf einiger signifikanter Merkmale für die Ausbildung eines Pittingschadens mit einem anschließenden Zahnbruch am Versuchsende. Das Merkmal „mittlere Amplitude" stellt den Mittelwert der Amplitudenanteile innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes dar. Die „Autokorrelation" beschreibt die Änderung eines Signals mit sich selbst nach einer zeitlichen Verschiebung, während die „Schiefe" eine Auswertung der Amplitudenhäufigkeitsverteilung des Spektrums innerhalb eines bestimmten Frequenzbereichs darstellt. Unter der „Amplitudendifferenz" wird der Abstand einer Systemfrequenz (z. B. Zahneingriffs- oder Drehfrequenz) zu einem um diese Frequenz herum zu ermittelnden Grundrauschanteil verstanden.

Deutlich zu erkennen ist das etwa ab der zwölften Betriebsstunde leicht ansteigende Merkmal „mittlere Amplitude" bei gleichzeitiger Abnahme des statistischen Merkmals „Schiefe". Die Veränderungen dieser Größen gehen sehr häufig mit Veränderungen der Mikrogeometrie einher. Zum Zeitpunkt t = 25 h kann von ersten Schäden (Pittings) an den Flanken ausgegangen werden, die sich in diesem Fall durch sprunghafte Veränderungen der o.g. Merkmale verfolgen lassen. Die Schädigungen schreiten in der Folgezeit rasch voran, was sich in einem weiteren steilen Ansteigen bzw. Abfallen der Merkmale wiederfinden lässt. Der Zahnfußbruch erfolgt nach der 29. Betriebsstunde.

Die Klassifikation auf Basis der bestimmten Merkmale kann mittels verschiedener Mechanismen erfolgen, vgl. ▶ Kap. 3. Ein Beispiel für eine Klassifikation ist die Zuordnung mittels Neuronaler Netze, wie sie nachfolgend am Beispiel eines Wälzlagers dargestellt wird [WECK92].

Als Elemente des Merkmalvektors wurden die Merkmale aus den Körperschall- und Temperatur-Signalen ausgewählt, deren Verläufe mit der Lagerschädigung korrelieren:

- Maximum des Körperschall-Hüllkurvensignals (30 bis 100 kHz),
- Mittelwert des Körperschall-Hüllkurvensignals (30 bis 100 kHz),
- spektraler Summenleistungspegel des Körperschall-Signals (0 bis 8 kHz),
- cepstraler Summenleistungspegel des Körperschall-Signals (0 bis 8 kHz),
- Temperatur des Lageraußenringes.

Die Signalverläufe über der Lagerstandzeit sind im Bild 6.99 dargestellt.

Bild 6.100 zeigt die Klassifizierung des Lagerzustandes anhand der Aktivierung der Neuronen in der Ausgabeschicht über der Standzeit des Lagers. Das erste Neuron ist dann aktiv, wenn noch keine messbare Lagerschädigung vorliegt. Das zweite Neuron zeigt erste messbare Veränderungen

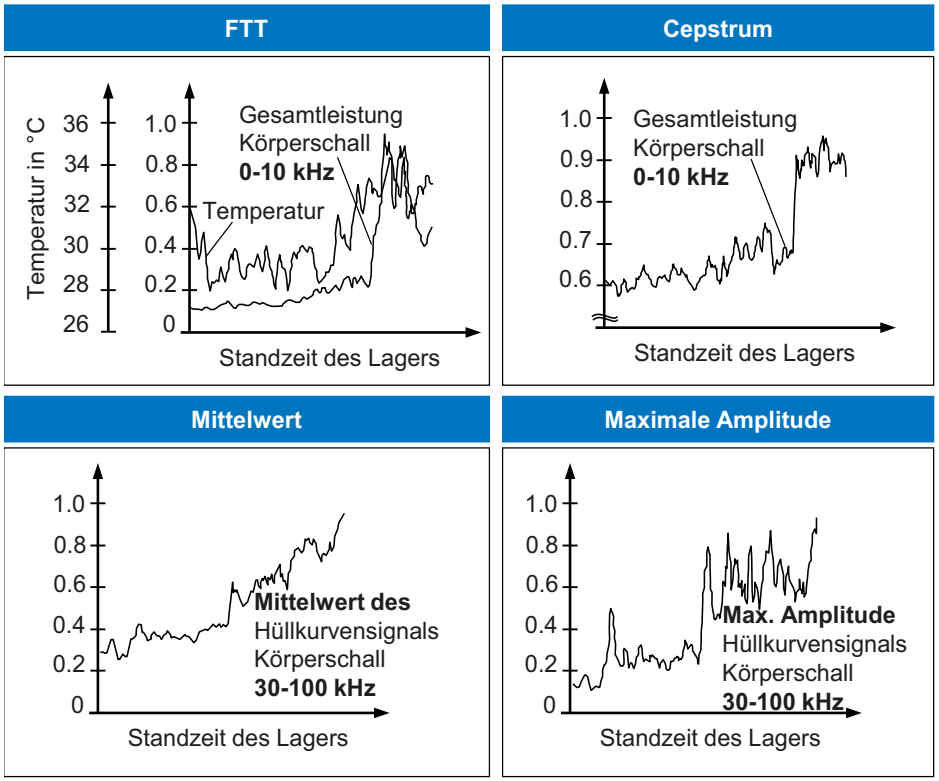


Bild 6.99 Verlauf verschiedener Signalmerkmale über die Lagerlaufzeit

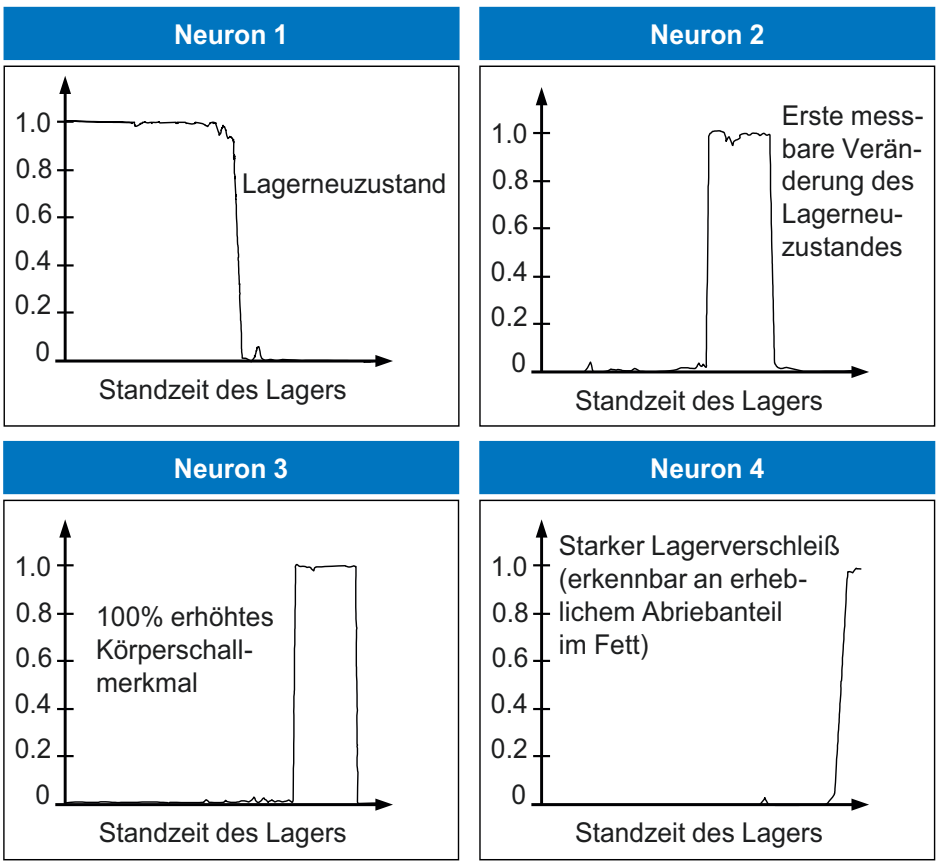


Bild 6.100 Klassifikation des Lagerzustandes durch das Neuronale Netz

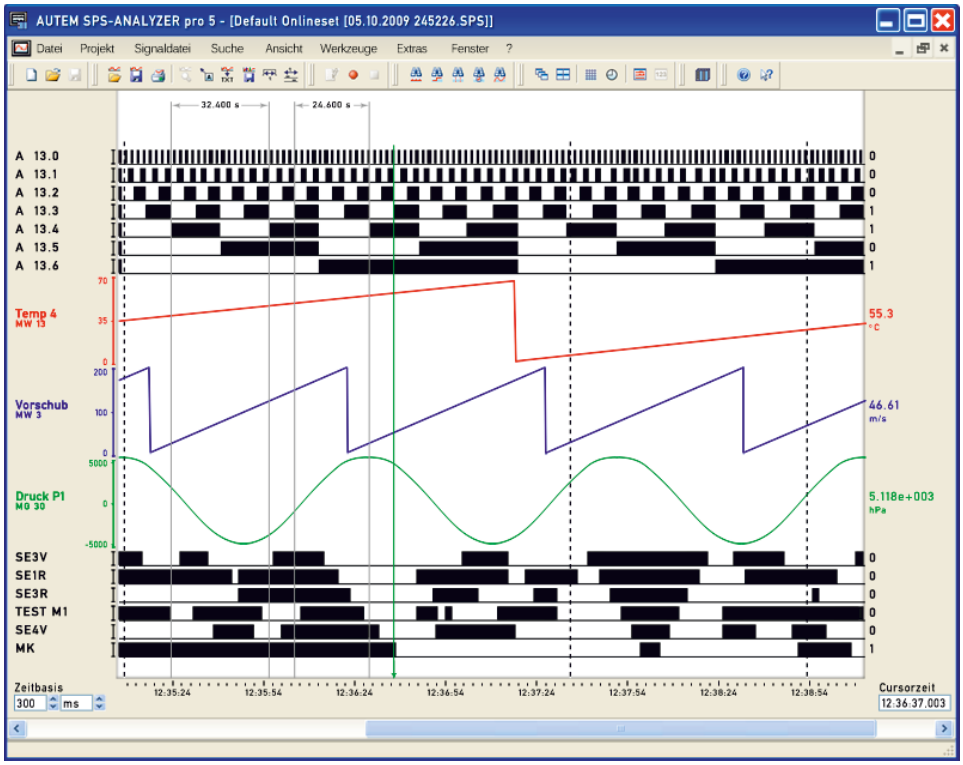


Bild 6.101 Zeitdarstellung eines SPS-Logikanalysators. Quelle: AUTEM

6

des Lagerzustandes an. Das dritte Neuron spricht bei stark (ca. 100 %) erhöhten Körperschallmerkmalen an. Das vierte Neuron zeigt starken Lagerverschleiß an. Das neuronale Netz ist in der Lage, diese Klassen klar zu unterscheiden und stellt daher einen geeigneten Klassifikator für diese Problemstellung dar.

Ein weiteres beispielhaftes Werkzeug in modernen Steuerungen zur Diagnose gestörter Maschinenzustände ist der SPS-Logikanalysator (Bild 6.101).

Ein SPS-Logikanalysator bietet die Möglichkeit, zeitliche Abläufe in der SPS und an den Schnittstellen auf dem NC-Bildschirm darzustellen. Dieser integrierte Analysator hat gegenüber einem handelsüblichen Logikanalysator einige Vorteile. Neben den SPS-Ein- und Ausgängen können auch interne SPS-Signale (z. B. Merker) angezeigt werden. Außerdem ist kein zeitintensives Anschließen von Messkabeln notwendig, und die Bedienung der vertrauten NC ist einfacher als die eines fremden Gerätes. Der hier dargestellte Analysator kann darüber hinaus kontinuierliche Signale anzeigen. Verschiedene Cursor sind setzbar. Es gibt verschiedene Suchfunktionen wie beispielsweise Muster in den digitalen Signalen oder Flanken in den analogen Signalen.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AC	Adaptive Control
ACC	Adaptive Control Constraint
ACO	Adaptive Control Optimization
A/D-Wandlung	Analogdigital-Wandlung
AI	Artificial Intelligence
ARMA-Modell	Autoregressive-Moving Average Modell
CM	Condition Monitoring (Zustandsüberwachung)
D/A-Wandlung	Digitalanalog-Wandlung
DMS	Dehnungsmessstreifen
FFT	Fast-Fourier-Transformation
HF	Hochfrequenz
KI	Künstliche Intelligenz
MLP	Multilayer Perceptron
NC	Numerical control
NCK	NC-Kern
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Gesamtanlageneffektivität)
PLC	Programmable Logic Control
PT_1	Verzögerungselement erster Ordnung
RBF	Radial Basis Function Network
RNN	Recurrent Neuronal Network
s-Karte	Standardabweichungskarte
SPC	Statistical process control
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TPM	Total Productive Maintenance
TQM	Total Quality Management
WZ	Werkzeug
WZL	Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre
$\bar{x}$ -Karte	Mittelwertkarte

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
Großbuchstaben		
B	–	Messwert
C_m	–	auf Zeichnungstoleranz bezogene Maschinenfähigkeit
D	mm	Fräserdurchmesser
D	dB	Dynamik eines Signals
F_A	N	Kraftanfangswert Verschleißmessung
F_{AB}	N	zulässiger Kraftabfall
F_c	N	Schnittkraft
$F_c(\varphi)$	N	arithmetische Summe der Schnittkräfte
F_E	N	Kraftgrenzwert bei Standzeitende
F_f	N	Vorschubkraft
F_{Gn}	N	gleitender Mittelwert der Vorschubkraft
F_p	N	Passivkraft
I	–	Leerlauf
I	A	Motorstrom
K_n	V	Komparatorschwellen
$L_{0\text{-}100}$	dB	Summenleistungspegel des Körperschall-Signals im Frequenzbereich von 0 bis 100 Hz
L_{ges}	dB	Summenleistungspegel des gesamten aufgenommenen Körperschall-Signals
$L_{v,r}$	min	Stelldauer des Vorschubmotors
M	Nm	Drehmoment
M_d	Nm	statisches Bremsmoment
M_m	–	Merkmal
$M_{\max}$	Nm	maximales Drehmoment der vorherigen Umdrehung
$M(t)$	Nm	momentanes Drehmoment auf Fräs„spindel
MWF	–	Mittelwertfaktor
$MTBF$	h	mittlere störungsfreie Zeit (mean time between failure)
$MTTR$	h	mittlere zu erwartende Reparaturdauer (mean time to repair)
N_G	%	Gesamtnutzungsgrad
N_T	%	technischer Nutzungsgrad
OEG	–	obere Eingriffsgrenze
P	–	Planbetrieb
P	W	Leistung
P_n	W	vorgegebene Schnittleistung
Q_s	m^3/s	Durchflussmenge Dielektrikum
R	–	Reparatur
$R(t)$	–	Zuverlässigkeit
$R_{xy}(\tau)$	–	Kreuzkorrelation
$Re\{G_b(if)_{neg}\}$	–	negativer Realteil der gerichteten Nachgiebigkeitsfunktion zwischen Werkstück und Werkzeug
T	mm	vorgegebene Zeichnungstoleranz
$T_{0,1}$	min	Abtastzeit
T_A	h	technische Ausfallzeit
T_{AP}	h	technische Ausfallzeit (anwenderbedingt)
T_{AT}	h	technische Ausfallzeit (herstellerbedingt)
T_B	h	Belegungszeit
T_C	h	Testzeit
T_N	h	tatsächliche Nutzungszeit

		eines Fertigungssystems
T_O	h	organisatorische Ausfallzeit
T_W	h	Wartungszeit
U	V	Spaltspannung
U_0	V	Leerlaufspannung
UEG	–	untere Eingriffsgrenze
U_{fm}	V	mittlere Entladespannung
U_k	V	Reglerverstärkung
U_{min}	dB	kleinste informationstragende Signaländerung
U_{max}	dB	größte vorkommende Signalwert
U_{soll}	V	Sollspannung Vorschubregelkreis
U_x	V	Spannungs-(Regel-)abweichung
V	–	Verfügbarkeit
V_e	–	Verstärkungsfaktor
V_r	–	Rückwärtsverstärkung
V_{soll}	min^{-1}	Sollwert Drehzahlregler
V_v	–	Vorwärtsverstärkung
V_w	mm^3/min	Abtragrate
W	–	Wartung
$X(f)$	–	Signal im Frequenzbereich
X_i	–	aktueller Mittelwert
XG_i	–	neuer gleitender Mittelwert
XG_{i-1}	–	vorheriger gleitender Mittelwert
Y_i	–	Hilfsvariable neuronales Netz
Z	–	Fräserzähnezahl
Z_i	–	Hilfsvariable neuronales Netz

Kleinbuchstaben

a	mm	Spaltweite
a_{max}	mm	maximale Schnitttiefe
a_{min}	mm	minimale Schnitttiefe
a_p	mm	Schnitttiefe
a_{cr}	mm	Grenzschnitttiefe
$a_{cr,\,min}$	mm	minimale Grenzschnitttiefe
a_0	mm	Sollschnitttiefe
b_z	mm	Schneidenabstand
c	–	n-dimensionaler Merkmalsvektor
f	Hz	Frequenz
f_a	Hz	Abtastfrequenz
f_{max}	Hz	höchste im Signal vorkommende Frequenz
f_s	Hz	Sperrfrequenz
f_{Ratter}	Hz	Ratterfrequenz
f_z	m/s	Vorschub je Schneide oder Zahn
f_0	mm/U	Sollvorschub
$g(c)$	–	Trennfunktion in Abhängigkeit des Merkmalsvektors c
i_V	A	Ventilstrom
$k_{c1,1}$	–	Hauptwert der spezifischen Schnittkraft
$1\text{-}m_c$	–	Anstiegswert der spezifischen Schnittkraft
m	–	Zahl der Wellen zwischen zwei Messereingriffen
n	–	Stichprobengröße
n_{cr}	min^{-1}	kritische Drehzahl
n_{ist}	min^{-1}	aktuelle Drehzahl
n_{st}	min^{-1}	Drehzahlstabilitätsminima
r	mm	Werkstückradius
s_x	(mm)	Standardabweichung
t_0	min	Pausendauer
t_c	min	Schnittzeit
t_d	min	Zündverzögerungszeit
t_{df}	min	Brennverzögerungszeit
t_{dfk}	min	kurzfristiger Mittelwert Brennverzögerungszeit
t_{dfl}	min	langfristiger Mittelwert Brennverzögerungszeit
t_{dfsoll}	min	Sollwert Brennverzögerungszeit
t_e	min	Entladezeit
t_f	min	Fallzeit
t_I	min	Impulsdauer
t_p	min	Periodendauer
t_r	min	Anstiegszeit
$u(t)$	–	zeit-und amplitudenkontinuierliches Sensorsignal
u_f	V	Funkenspannung
u_i	–	diskrete Sensorsignalwerte
v_c	mm/min	Schnittgeschwindigkeit
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
w	–	Wortbreite/ Anzahl Bits
w_{ij}	–	Wichtungsfaktoren für die Eingangswerte eines Neurons
x_i	–	Eingangswert eines Neurons
$x(t)$	–	Signal im Zeitbereich
y_i	–	Ausgangswerte des Neurons
z_E	–	im Eingriff befindliche Schneidenzahl

Griechische Buchstaben

Δl_{fr}	mm/min	Vorschub
Δd_w	mm	Durchmesserabnahme
φ_i	°	Fräsereintrittswinkel
φ_j	°	Vorschubrichtungswinkel an Schneide j
φ_o	°	Fräseraustrittswinkel
φ_s	mm	Schnittbogen
φ_T	°	Schneidenteilungswinkel
δ_s	dB	Sperrdämpfung
ε	–	Phasenverschiebung zwischen Schwingung des schneidenden Zahns und Welligkeit durch vorherige Schneide
η	–	Wirkverhältnis
θ	–	Parameter der Transferfunktion

		eines Neurons
κ	°	Einstellwinkel des Werkzeugs
λ	–	Ausfallrate
μ	–	Mittelwert des Vorschubkraft-Signals
σ	–	Standardabweichung der Häufigkeitsverteilung des Körperschall-Signals
τ	–	Zeitliche Verschiebung
φ	°	Vorschubrichtungswinkel

Literaturverzeichnis

[ARNO93] Arnold, M.: Feldbussysteme, Teil 1: Grundlagen der offenen Kommunikation; Teil 2: Konzepte und Ausführungen realisierter Systeme. In: ELRAD, 1993

[AULM70] Aulmann, A.: Bausteine und Anwendungsbeispiele für die Übertragung und Verarbeitung von Winkelinformationen. In: Sonderdruck „Funk und Technik", 1970, Nr. 1–4

[BACK87] Backé, W.: Fluidtechnische Realisierung ungleichmäßiger periodischer Bewegungen. In: Ölhydraulik und Pneumatik. Band 5. Jg., 1987, S. 22–38

[BACK88] Backé, W.: Neue Möglichkeiten der Verdrängerregelung, 1988. Tagungsunterlagen zum 8. Aachener Fluidtechnischen Kolloquium

[BEUC89] Beuck, W.; u. a.: Förderprogramm Fertigungstechnik (PFT) des BMFT. Hrsg.: Kernforschungszentrum Karlsruhe. Kfk-PFT 143, April 1989: Qualitätssicherung bei der Planung und Realisierung sowie der Störungsanalyse von Flexiblen Fertigungssystemen und CNC-Koordinaten-Meßgeräten. Karlsruhe: Eigendruck Kernforschungszentrum, 1989

[BRAA97] Braasch, J.: Genügen Drehgeber zur Positionierung von Werkzeugmaschinen? In: MSR Magazin, 1997, Nr. 7–8

[BRAA00] Braasch, J.; Fa. Heidenhain: Genauigkeit von Vorschubantrieben. Traunreut, Juni 2000. Firmenschrift

[BRYA79] Bryan, J. B.: Design and Construction of a precision 84 inch Diamond Turning Machine. In: Precision Engineering. 1. Jg., 1979, S. 13–17

[DIN19] DIN 31051 (2019). Grundlagen der Instandhaltung

[DIN95]: DIN 1319 (1995). Grundlagen der Meßtechnik

[DIN99] DIN 32876 (1999). Prüfung geometrischer Größen – Elektrische Längenmessung

[DOET85] Doetsch, G.: Anleitung zum praktischen Gebrauch der Laplace-Transformation und der z-Transformation. München: Oldenbourg, 1985

[ECKH93] Eckhardt, V.; et al.: Die Grenzen liegen jetzt bei der Mechanik. In: Elektronik Heft 18, 1993

[ERNS98] Ernst, A.: Digitale Längen- und Winkelmesstechnik. Positionsmesssysteme für den Maschinenbau und die Elektronikindustrie. (Reihe: Die Bibliothek der Technik. Bd. 165). 3. Aufl. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1998

[ETEL95] ETEL S.A.: Lineare kollektorlose Motoren großer Kraft. Môtiers, Schweiz, 1995. Firmenschrift

[EVER93] Eversheim, W.; König, W.; Pfeiffer, T.; Weck, M. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993

[FAHR93] Fahrbach, C.; Hammann, G.: Ohne Umwege – Servoantriebe in Vorschubachsen erhöhen die Bearbeitungsgeschwindigkeit. In: Maschinenmarkt 99. 22. Jg., 1993

[FÖRD97] Fördergemeinschaft SERCOS interface e. V.: IEC 1491 SERCOS interface – Digitale Schnittstelle zwischen numerischen Steuerungen und Antrieben an numerisch gesteuerten Maschinen. Frankfurt: Fördergemeinschaft SERCOS interface e. V, 1997

[GROß81] Groß, M.; Siemens AG: Elektrische Vorschubantriebe an Werkzeugmaschinen, 1981. Firmenschrift

[HAGE99] Hagemeister, W.: Auslegung von hochdynamischen servohydraulischen Antrieben für eine aktive Fräsown spindellagerung. Diss. RWTH Aachen, 1999

[HEID00] Heidenhain: Positionsmeßsysteme für elektrische Antriebe. Traunreut, März 2000. Firmenschrift

[HEID89] Heidenreich, W.: Aufbautechniken für Halbleiter-Magnetfeldsensoren. In: Technisches Messen. 56. Jg., 1989, Nr. 11, S. 436–443

[HENN99] Henneberger, G.: Elektrische Maschinen I – Grundlagen, Wirkungsweise, Aufbau, Betriebsverhalten. Vorlesungsskript RWTH Aachen, 1999

[HEWL92] Hewlett-Packard: Magnetisches Längenmeßsystem ML01, Band 30-05. Kirchzarten, 1992. Firmenschrift

[HIMB88] Himburger, T.: Die Dynamik des Bohrvorgangs als Grundlage eines Überwachungskonzeptes. Diss. TU Hamburg-Harburg, 1988

[HOTT20] : Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: Auswahlhilfe für Piezo-Sensoren. URL: https://www.hbm.com/de/6810/auswahlhilfe-piezoelektrische-sensoren/. [Stand: 03.02.2020]

[INTE84] Integrated Systems: MatrixX user's guide. Firmenschrift. Palo Alto, CA, 1984

[ISER83] Isermann, R.: Systemidentifikation. Berlin: Springer, 1983

[JAKO79] Jakob, L.: Sicherheitskupplungen in Achsantrieben von NC-Maschinen. Konstruktion, Elemente, Methoden. Stuttgart: Konradin, 1979

[JAKO83] Jakob, L.: Anwendungen drehstarrer, flexibler Kupplungen. In: Der Zuliefermarkt, Sept. 1983

[KIEL92] Kiel, E.; Schierenberg, O.: Einchip-Controller für das SERCOS-Interface. In: Elektronik, 6/1992, S. 50–59

[KÖNI92] König, W.; Ketteler, G.; Klumpen, T. (Hrsg.): Process Monitoring in Turning, Milling, Drilling and Grinding Processes, 1992

[KÜHN85] Kühne, L.: Entwicklung eines universellen Überwachungssystems für Fertigungseinrichtungen. Diss. RWTH Aachen, 1985

[KYNA99] Kynast, R. (Hrsg.): SERCOS interface – Technical Overview, 1999

[LORE99] Lorenz, L.; Kanelis, K.: Antriebslösungen optimiert – Signalverarbeitung und Leistungschalter vereint. In: Components, 99, Nr. 3, S. 13–16

[LUDA91] Luda, G.: Drehstrom-Asynchron-Linarantriebe: Grundlagen und praktische Anwendungen für industrielle Zwecke. Würzburg: Vogel, 1991

[MATH17] Mathis, W.; Reibiger, A.: Kupfmüller Theoretische Elektrotechnik. Berlin: Springer Verlag, 2017

[MENZ73] Menzel; Mirande; Weingärtner: Fourier-Optik und Holographie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1973

[MEYE91] Meyen, H. P.: Acoustic Emission (AE) – Mikroseismik im Schleifprozeß. Diss. RWTH Aachen, 1991

[MEYR93] Meyr, H.: Regelungstechnik I + II. Vorlesungsskript RWTH Aachen, 1993

[MILB92] Milberg, J.: Werkzeugmaschinen – Grundlagen. Berlin: Springer, 1992

[MILL90] Miller, W.: Bezeichnungen für Weg- und Winkelmeßsysteme, Verwirrende Begriffe. In: Industrieanzeiger 78, 1990

[MURR99] Murrenhoff, H.: Grundlagen der Ölhydraulik, 1999

[MURR99] Murrenhoff, H.: Servohydraulik, 1999

[NELL91] Nelle, G.: Optoelektronische Meßverfahren zur digitalen Längenmessung. In: Konstruktion. 43. Jg., 1991

[NIEM74] Niemann, H.: Methoden der Mustererkennung. Frankfurt a. M.: Akademische Verlagsgesellschaft, 1974

[NIEM83] Niemann, H.: Klassifikation von Mustern. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer, 1983

[OPHE98] Ophey, L.: Leistungssteigerung mit Direktantrieben? // Offensivkonzepte wirtschaftlicher Produktionstechnik. Zwickau: Neugebauer, R. CPK; Technische Universität Chemnitz-Zwickau; CPK – Chemnitzer Produktionstechnisches Kolloquium, 1998

[ÖZME00] Özmeral, H.: Elektromagnetisches Fast Tool Servo System für den Einsatz in der Ultrapräzisionstechnik. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik. Bd. 12). Aachen: Shaker, 2000

PAUC08 Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: Zerspantechnik – Prozesse, Werkzeuge, Technologien, 12. Aufl. Wiesbaden, Viewegown-Teubner, 2008

[PFEI76] Pfeifer, T.; u. a.: Verfahren und Methoden zur Beurteilung der Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen, 1976

[PFEI99] Pfeifer, T.; Wiegers, L.: Reliable tool wear monitoring by means of image optimization in machine vision. 2nd International Conference on High-Speed Machining. Darmstadt: Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, 1999

[PHIL91] Philipp, W.: Linear-Direktantriebe hoher Genauigkeit und Dynamik. In: Konstruktion. 43. Jg., 1991, Nr. 12, S. 425–429

[PHIL92] Philipp, W.: Regelung mechanisch steifer Direktantriebe für Werkzeugmaschinen. Berlin: Springer, 1992

[RAKE93] Rake, H.: Regelungstechnik A+B, 1993

[ROSE94] Rosenbauer, T.: Getriebe für Industrieroboter – Beurteilungskriterien, Kenndaten, Einsatzhinweise. Diss. RWTH Aachen, 1994

[RUDO14] Rudolf, T.: Adaptierbare Parametrierung von Diagnosesystemen durch Verwendung digitaler Antriebssignale in der Prozessüberwachung. Diss. RWTH Aachen, 2014

[RUMM92] Rummich, E.; Gfrörer, R.: Elektrische Schrittmotoren und -antriebe, Funktionsprinzip – Betriebseigenschaften – Meßtechnik. (Reihe: Kontakt & Studium). Ehningen: expert, 1992

[SALZ97] Salzmann, T.; Klug, R.-D.: Mehr Qualität für Antriebe im Megawattbereich. In: engineering & automation, 1997, Nr. 1–2, S. 38–40

[SCHE91] Schehl, U.: Werkzeugüberwachung mit Acoustic Emission beim Drehen, Fräsen und Bohren. Diss. RWTH Aachen, 1991

[SCHI90] Schierling, H.: Selbstinbetriebnahme – eine neue Eigenschaft moderner Drehstromantriebe. In: atp. Nr. 32. Jg., 1990

[SCHU93] Schuhmacher, W.; Kiel, E.: Elektrische Antriebe in den neunziger Jahren. In: Elektronik Heft 7, 1993, S. 94–98

[SESS91] Sesselmann, T.: Maßstäbe für interferentielles Abtasten ermöglichen Nanometer-Meßschritte. In: WB Werkstatt und Betrieb, 1991, Nr. 124-2

[SPIE90] Spies, A.: Längen in der Ultrapräzisionstechnik messen. In: Feinwerktechnik & Meßtechnik. 98. Jg., 1990

[STEA79] Stearns, S. D.: Digitale Verarbeitung analoger Signale. München, Wien: R. Oldenbourg, 1979

[ULRI82] Ulrich, H.-J.: Verhütung von Kollisionsschäden an NC-Drehmaschinen. In: Industrie-Anzeiger. 45. Jg., 1982, Nr. 104

[VDI19] VDI/VDE 2600-2 (2019). Prüfprozessmanagement – Ermittlung der Messunsicherheit komplexer Prüfprozesse.

[WALC74] Walcher, H.: Digitale Lagemeßtechnik. Düsseldorf: VDI, 1974

[WECK99] Weck, M.; Krüger, P.; Brecher, C.: Grenzen für die Reglereinstellung bei elektrischen Lineardirektantrieben. In: Antriebstechnik. 38. Jg., April 1999, Nr. 2+3, S. S. 55–58 und 71–76

[WECK77] Weck, M.; Teipel, K.: Dynamisches Verhalten spanender Werkzeugmaschinen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1977

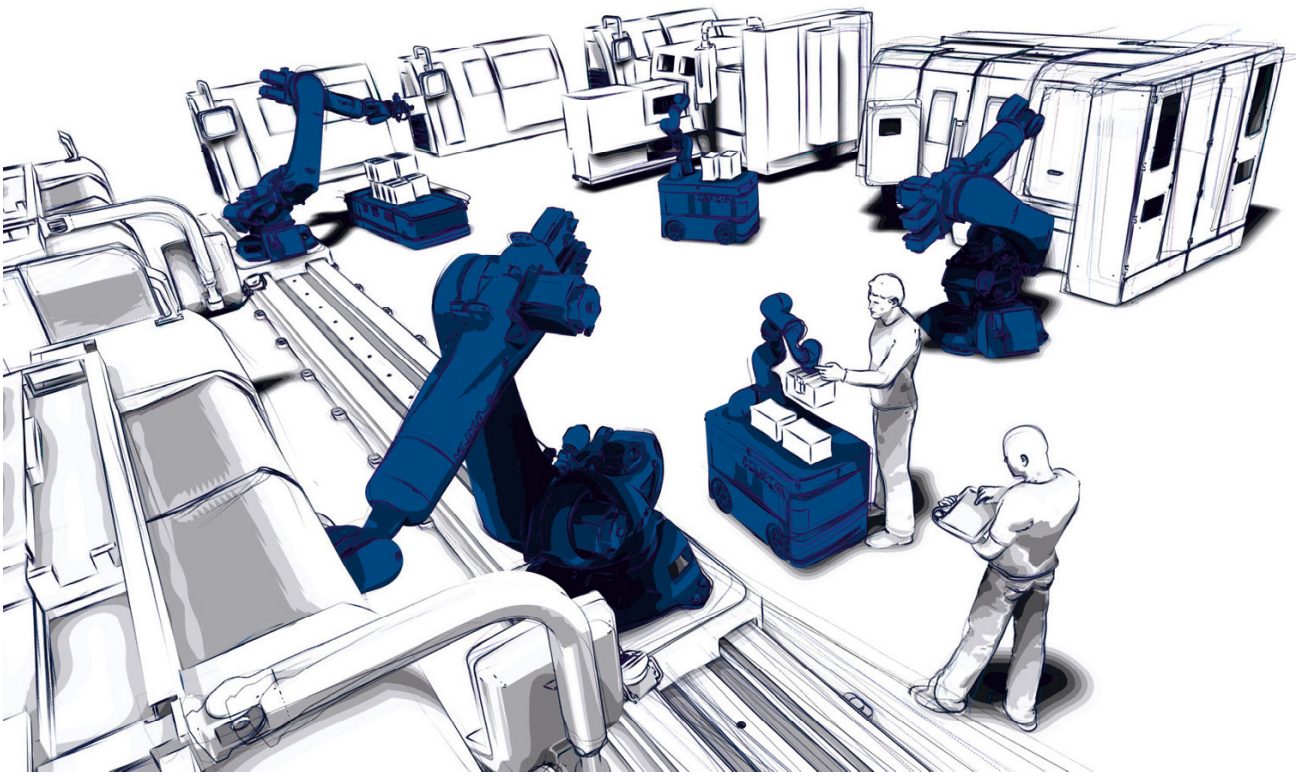
[WECK06] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. (Reihe: VDI-Buch). 7., neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006

[WECK92] Weck, M., Fauser, M.: Lagerüberwachung mit neuronalen Netzen. In: wt Produktion und Management. 12. Jg., 1992, S. 34–36

[WITT88] Wittman, G.: Spieleinstellbare Getriebe mit konischen Verzahnungen. In: Zuliefermarkt. 36. Jg., 1988

[YE92] Ye, G.: Erhöhung der Bahngenauigkeit NC-gesteuerter Vorschubachsen mit Hilfe eines Kompensationsfilters. Fortschritt-Berichte VDI. (Reihe: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2. Bd. 255). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992

Kapitel 7



Automatisierung von Maschinen und Anlagen

Ich danke meinen Mitarbeitern Christian Fimmers M. Sc., Jerome Flender M. Sc. und Simon Storms M. Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

www.wzl.rwth-aachen.de

www.smartautomationlab.de

Automatisierung und Steuerungstechnik

Robotikanwendungen

IKT für das Industrial IoT

Flexible Produktionsprozesse

Modellbasierte Entwicklung

Cloud & Edge Computing

Mensch-Maschine-Interaktion



Bild: Martin Braun

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Steinbachstraße 19
52074 Aachen
+49 241 80 27408
automation@wzl.rwth-aachen.de

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Abteilung Automatisierung und Steuerungstechnik

Automatisierung von Maschinen und Anlagen



7.1 Begriffsbestimmung – 284

7.2 Geschichtliche Entwicklung und Gründe für die Automatisierung von Werkzeugmaschinen – 284

7.3 Steuerungs- und Automatisierungstechnik als Teilaufgabe der Maschinenentwicklung – 285

7.4 Steuerung von Funktionsabläufen – 287

7.4.1 Automatisierbare Funktionen der Fertigungseinrichtungen – 287

7.4.2 Funktionsfolgen – 288

7.4.3 Elemente der Steuerung, Programmierung und Speicherung – 289

7.5 Beispiele automatisierter Funktionen – 290

7.5.1 Weg- und Schaltinformationen – 290

7.5.2 Werkstücktransport und -handhabung – 292

7.5.3 Werkzeughandhabung und -speicherung – 295

7.5.4 Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Sicherheit – 298

7.5.5 Leittechnik – 298

7.5.6 Entsorgung – 298

Abkürzungsverzeichnis – 299

Literaturverzeichnis – 299

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_7

7.1 Begriffsbestimmung

Die Automatisierung umfasst alle Maßnahmen zum vollständig oder teilweise selbstständigen Ablauf von Prozessen, die nach einem vorher erstellten Programm oder einer künstlich erzeugten Intelligenz (KI) ohne Eingreifen des Menschen gesteuert werden. Voraussetzungen hierzu sind die Mechanisierung und die Steuerungstechnik, ◘ Bild 7.1. Die *Mechanisierung* ersetzt die Muskelkraft und Muskelarbeit des Menschen durch Vorrichtungen und motorischen Antrieb der Maschinen. Die *Steuerungstechnik* umfasst das Speichern, die logische Verarbeitung und die Übertragung von Weg- und Schaltinformationen sowie die Ansteuerung von Aktoren.

Ein *Automat* ist demnach eine Vorrichtung oder Maschine, die nach einem einmaligen Einricht- bzw. Programmiervorgang und nach Beschicken mit Material und Hilfsstoffen definierte Aufgaben teilweise oder völlig selbstständig durchführt.

Ein *Halb-* oder *Teilautomat* ist im Werkzeugmaschinenbau eine Maschine, die alle Haupt- und Vorschubbewegungen des Werkzeugs bzw. Werkstücks selbstständig durchführt. Funktionen wie Materialvorschub, Werkstückspannen, Drehzahlvorwahl u. ä. werden von Hand vorgenommen.

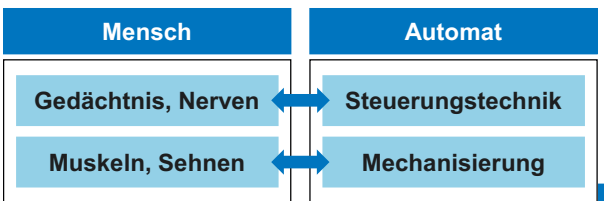
Der Vollautomat als Werkzeugmaschine führt alle Bewegungen und Funktionen selbsttätig aus; der Mensch braucht nicht in den Arbeitsablauf einzugreifen. Er übt lediglich noch Kontrollfunktionen aus und muss eventuell Rohmaterial in das Magazin bzw. Rohlinge in das Futter einlegen.

7.2 Geschichtliche Entwicklung und Gründe für die Automatisierung von Werkzeugmaschinen

Erste Vorrichtungen, die gewisse Ähnlichkeiten mit Werkzeugmaschinen haben, gehen auf das Mittelalter zurück. Beispielsweise wird bei der Wippendrehbank aus dem 14. Jahrhundert das Werkstück auf einer Holzbank zwischen verstellbaren Spitzen geführt und ausschließlich durch Muskelkraft mit einem Stichelmesser bearbeitet. Die Schnittbewegung, d. h. die Drehung des Werkstücks, wird mit einer Fußwippe über einen Umschlingungsseiltrieb aufgebracht; die Vorschubbewegung geschieht von Hand [WITT60].

Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts gelingt es mit Hilfe der Dampfmaschine, motorisch getriebene Bearbeitungsmaschinen einzusetzen. Während anfangs bei diesen Maschinen das Werkzeug noch von Hand geführt werden musste, entwickelte man um 1790 Metallbearbeitungsmaschinen mit geführten Werkzeugschlitten (Supporten) und Gestellteilen aus Gusseisen anstelle von Holz. Im Jahr 1830 baute *Maudslay* in England eine Drehmaschine mit selbsttätigem Längsvorschub. Damit war die erste Stufe der Mechanisierung gegeben und zugleich die Voraussetzung für die Automatisierung geschaffen [BRUI66]. Der Übergang von der Mechanisierung zur Automatisierung ist in den letzten 150 Jahren der industriellen Entwicklung fließend gewesen. Die Steuerungstechnik entwickelte sich von der rein mechanischen Kurven-, Hebel- und Nockensteuerung über hydraulische, elektrische und elektrohydraulische Positionier- und Nachformsteuerungen bis zur elektronischen Steuerung.

Die Entwicklung im Bereich der Fertigungsprozessautomatisierung wurde in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich durch die immense Zunahme der Leistungsfähigkeit elektronischer Bauelemente und der zugehörigen Software bestimmt. Seit etwa 1960 haben sich numerische Steuerungen, seit 1970 programmierbare und rechnergeführte Steuerungen in dem weiten Anwendungsfeld der Steuerungstechnik durchgesetzt. Mit diesen Steuerungen und den Möglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung und Kommunikation ist heute die Basis gegeben, die Fertigung mit durchgängigen Datenmodellen in den gesamten Informationsfluss eines Betriebes zu integrieren. Die höchste Stufe der Automatisierung haben neben den Transferstraßen für die Massenproduktion derzeit flexible Fertigungssysteme erreicht. Letztere wurden für die automatische Fer-



	Automatisierungsgrad		
	Handbedienung	Teilautomat	Vollautomat
Mensch	x	x	
Mechanik	x	x	x
Steuerungstechnik		x	x

◘ **Bild 7.1** Zusammenhänge zwischen menschlicher Tätigkeit, Mechanisierung und Automatisierung

tigung unterschiedlicher Werkstücke innerhalb bestimmter Teilefamilien entwickelt, wobei auch das Umrüsten der Maschine automatisch erfolgt. In solchen Systemen sind mehrere numerisch gesteuerte Maschinen durch automatische Materialtransporteinrichtungen bzw. Roboter so miteinander verkettet, dass man die Bearbeitungsreihenfolge der Werkstücke frei wählen kann. Die Steuerung der Maschinen und des Materialflusses geschieht mit Hilfe eines Leitsystems [BEYE07]. Wegen der Komplexität und hohen Investitionskosten solcher flexibel verketteten Anlagen ist eine angemessene Wirtschaftlichkeit nicht einfach realisierbar. Hohe Störungsraten haben dazu geführt, kleinere Systeme, sogenannte Fertigungszellen, zu schaffen, die übersichtlicher und vom Benutzer einfacher zu handhaben sind. Dabei wird immer mehr Funktionalität vom Leitsystems in die Steuerung integriert, sodass sich zunehmend Mischformen aus zentralistischen Ansätzen mit dezentral organisierten Elementen herausbilden.

Entsprechend dieser Entwicklung verlagert sich künftig die Tätigkeit des Menschen von unattraktiven, monotonen und körperlich anstrengenden Arbeiten auf kreative Aufgaben der Planung, Konstruktion sowie Überwachung und Optimierung der Vorgänge.

Bild 7.2 zeigt in allgemeiner Form die einzelnen Entwicklungsstufen der Automatisierung am Beispiel der Drehbearbeitung. In der ersten Stufe werden alle Steuerungs- und Hilfsfunktionen (Bedienung der Maschine, Werkstücktransport und Messen) von Hand ausgeführt. In der zweiten Stufe entlastet der Halbautomat den Benutzer. Wegen der größeren Stückzahl fällt jedoch mehr manuelle Arbeit für Transport und Messen an. Es folgt als dritte Stufe die Vollautomatisierung der Bearbeitung und des Werkstücktransports sowie die Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen durch Handhabungseinrichtungen, wie z. B. Industrieroboter. Geschieht das Messen hier noch von Hand, wird in der vierten Stufe auch dieser Vorgang von einem Messautomaten vollzogen. Der Mensch greift nur ein, wenn das Messergebnis ein Nachstellen des Drehautomaten erfordert. Schließlich findet in der fünften Stufe ein vollautomatischer Fertigungsprozess statt. Durch das in die Maschine integrierte Werkstückmesssystem wird eine selbsttätige Korrektur der Werkzeugzustellung ermöglicht. Der Mensch greift nur noch im Störungsfall ein.

Die Gründe für die Automatisierung lagen zu Beginn der Industrialisierung hauptsächlich in der Forderung nach einer höheren Produktivität, d. h. nach schnellerer und leichterer Herstellung größerer Werkstückzahlen. Durch das tayloristische Prinzip der Arbeitsteilung konnten in der Vergangenheit enorme Produktivitätssteigerungen erreicht werden. Die vorherrschenden Techniklösungen im Bereich der Automatisierungstechnik orientierten sich daher bis in die heutige Zeit an den Prinzipien einer Großserienfertigung. Neuere Entwicklungen zeigen jedoch, dass sich ein Trend von der

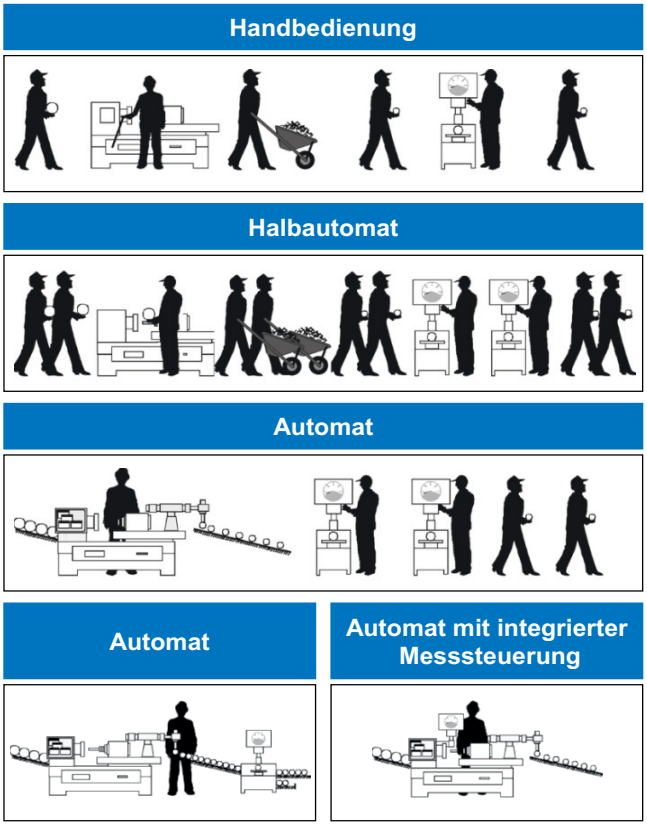


Bild 7.2 Stufen der Automatisierung. Nach Saljé

Großserienfertigung hin zur Kleinserien- und Einzelfertigung abzeichnet. Das bedeutet, dass qualifizierte Facharbeit in Kombination mit ganzheitlichen Aufgabeninhalten zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Übertragen auf den Bereich der Bearbeitungsmaschinen charakterisieren umfassende Arbeitsinhalte, ausgehend von der Programmierung über die Optimierung, bis hin zur Überwachung von Fertigungsprozessen, den Arbeitsplatz des Facharbeiters an den Werkzeugmaschinen. Die grundlegende Voraussetzung für die Unterstützung des Personals im Umgang mit neuen, innovativen Techniklösungen ist hierbei in der ergonomischen Gestaltung der Maschinennutzer-Schnittstelle zu sehen. Moderne Steuerungen bieten in der Regel Programmierschnittstellen an, die eine individuelle Anpassung an die Bedürfnisse der Benutzer ermöglichen. Gleichzeitig können die Steuerungen um eigene Funktionalitäten erweitert werden. Hierzu zählt z. B. die Ferndiagnose und die Einbindung in das Intra- und Internet.

7.3 Steuerungs- und Automatisierungstechnik als Teilaufgabe der Maschinenentwicklung

Der Wertschöpfungsanteil der Automatisierungstechnik am gesamten Entwicklungsprozess hat während der letzten Jahr-

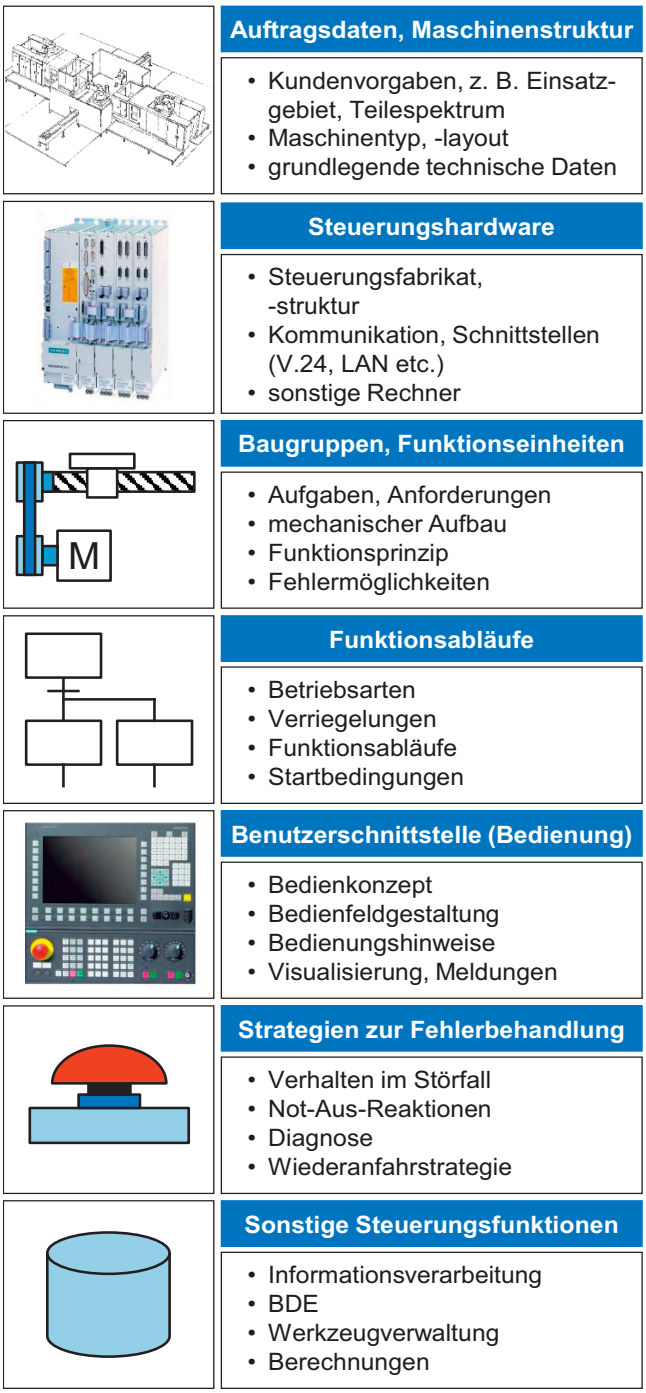


Bild 7.3 Beispielhafter Aufbau eines Pflichtenheftes

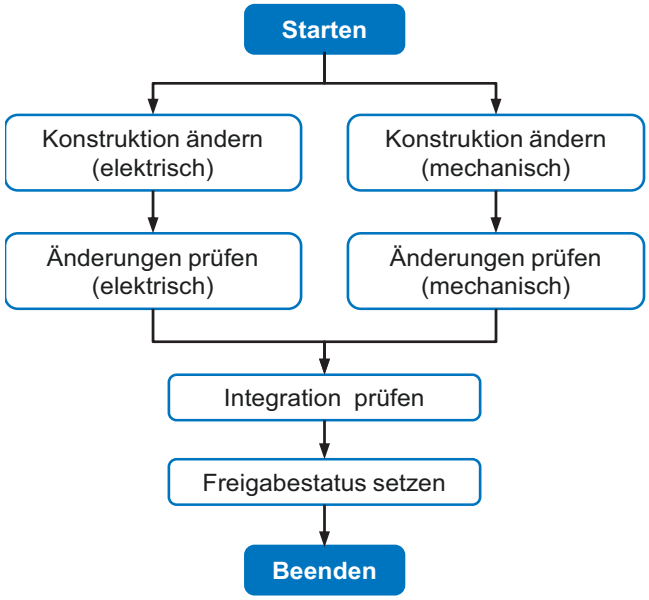


Bild 7.4 Beispiel eines Konstruktionsarbeitsablaufs im PLM-System

zehnte stark zugenommen. Die Aufgaben der Automatisierungstechnik betreffen beispielsweise die Steuerung von Achsen und Peripherie-Komponenten, die Integration der Sicherheitstechnik sowie die informationstechnische Anbindung der Maschine an die Fertigungsinfrastruktur.

Die Integration automatisierungstechnischer Funktionen bedingt Wechselwirkungen auf mechanischer, elektrotechnischer und informationstechnischer Ebene. Der dadurch entstehenden Komplexität kann nur durch die abteilungsübergreifende Kooperation verschiedener Fachabteilungen begegnet werden.

Ein gebräuchliches Hilfsmittel zur abteilungs- und disziplinübergreifenden Kooperation sind Lasten- und Pflichtenhefte [VDI12]. Das Lastenheft enthält die Anforderungen aus Sicht des Anwenders. Das Pflichtenheft ergänzt die Angaben des Lastenheftes, beispielsweise durch die in Bild 7.3 dargestellten Angaben.

Lasten- und Pflichtenhefte werden oft durch weitere Spezifikationsmethoden ergänzt. Beispiele hierfür sind Prinzipskizzen, Wirkungspläne sowie tabellarische Aufstellungen von Aktorik und Sensorik. Ein weiterer Ansatz zur Spezifikation ist die Strukturierung des mechatronischen Systems mit Funktionen. Hierbei werden Funktionen als disziplinübergreifende Beschreibungsmittel verwendet, denen technische Elemente zur Realisierung zugeordnet werden (vgl. [VDI04]).

Zur Verwaltung der interdisziplinären Produktdaten finden die im Automobilbau gebräuchlichen *Product Lifecycle Management Systeme (PLM)* vermehrt auch im Maschinen- und Anlagenbau Einzug. Die Verwaltung von Produktstrukturen, CAD-Daten, Zugriffsrechten und Projekten sind zentrale Funktionen heutiger PLM-Systeme. Ein weiterer zentraler Bestandteil eines PLM-Systems ist, die Arbeitsabläufe der Konstruktion abzubilden und deren Ablauf zu überwachen, Bild 7.4. Zusätzlich werden beispielsweise Möglichkeiten zur Verwaltung von Lieferanten-, Simulations- und Wartungsdaten angeboten. PLM-Systeme besitzen in der Regel eine Schnittstelle zur Unternehmensressourcenplanung (Enterprise Resource Planning, ERP), welche die Herstellung der einzelnen Produktkomponenten und die Zuordnung zu Fertigungsressourcen koordiniert.

7.4 Steuerung von Funktionsabläufen

7.4.1 Automatisierbare Funktionen der Fertigungseinrichtungen

Die Möglichkeiten, manuell ausgeführte Funktionen sowie menschliche Denkprozesse zur Bedienung und Steuerung von Maschinen zu automatisieren, sind im Bereich der Fertigungstechnik sehr vielfältig. Die einzelnen Fertigungsverfahren und -aufgaben erfordern in der Regel speziell angepasste Lösungen.

Der derzeitige Stand der Technik der mechanischen Fertigung ist durch den hohen Entwicklungsstand von Werkzeugmaschinen gekennzeichnet, die komplizierte Bearbeitungsaufgaben mit entsprechend hohen technologischen Anforderungen zu lösen vermögen. Darüber hinaus hat sich der Einsatz vollautomatischer Maschinen (z. B. Drehautomaten) sowie verketteter Anlagen (z. B. flexibles Fertigungssystem) in der mechanischen Fertigung flächendeckend durchgesetzt. In den letzten Jahren konzentrierten sich Automatisierungsbemühungen auf die Flexibilisierung von Fertigungsanlagen für die Kleinserien- und Einzelfertigung. Der selbstständige Ablauf wechselnder Bearbeitungs-, Handhabungs- und Spannaufgaben für eine große Anzahl verschiedener Werkstücke erfordert dazu eine einfache und schnelle Umprogrammierung der Funktionsfolgen sowie die Anpassung von Greif- und Spannvorrichtungen.

Die an Fertigungseinrichtungen durchführbaren Basisfunktionen, auf die sich die Automatisierungsbestrebungen konzentrieren, sind in ◘ Bild 7.5 den Objekten Maschine, Werkzeug, Vorrichtungen und Werkstück zugeordnet.

Zur Automatisierung der in ◘ Bild 7.5 gezeigten Funktionen (Transportieren, Handhaben, Ordnen von Werkstücken, Einrichten der Maschine etc.) ist die elektronische Datenverarbeitung in Form von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS, ▶ Kap. 10) und numerischen Steuerungen (NC, ▶ Kap. 11) eine entscheidende Voraussetzung. Mit der Zunahme der Komplexität sowie dem Investitionswert der Anlagen kommen sowohl der Zuverlässigkeit der Komponenten als auch einem geeigneten Diagnosesystem eine große Bedeutung zu, um Fehler an der Anlage frühzeitig zu erkennen und zu lokalisieren. Dies ist besonders im Hinblick auf Folgeschäden und daraus resultierenden kostenintensiven Stillstandszeiten wichtig.

Die für den Material- und Betriebsmittelfluss in einer Werkzeugmaschine erforderlichen Teilfunktionen werden prinzipiell anhand von ◘ Bild 7.6 verdeutlicht. Die dort aufgeführten Funktionen werden von einer NC mit einer SPS initiiert, ausgeführt und überwacht. Da die Automatisierung der verschiedenen Funktionen einer Anlage oder einer Maschine immer mit einem hohen Kapitaleinsatz verbunden ist, entscheiden in der Regel Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen darüber, welche Untermenge der in ◘ Bild 7.6 aufgeführten Funktionen zu automatisieren ist.

Bei allen Automatisierungsbemühungen hat die Praxis gezeigt, dass die Störanfälligkeit mit zunehmender Komplexität und zunehmendem Automatisierungsgrad überproportional ansteigt. Daher ist für den jeweiligen Anwen-

◘ **Bild 7.5** Automatisierbare Funktionen

		Objekt			
		Maschine	Werkzeug	Vorrichtung	Werkstück
Funktion	Transportieren, Handhaben, Ordnen		X	X	X
	Einrichten	X	X	X	
	Speichern	X	X	X	X
	Spannen, Entspannen	(X)	X	X	X
	Bearbeiten	X	(X)	(X)	X
	Aufbereiten		X	X	X
	Kontrollieren (Messen und Auswerten)	(X)	X	(X)	X
	Diagnose (Maschinen- und Werkzeugzustand)	X	X	X	

X - Objekt führt die Funktion aus
(X) - Objekt indirekt an der Funktion beteiligt

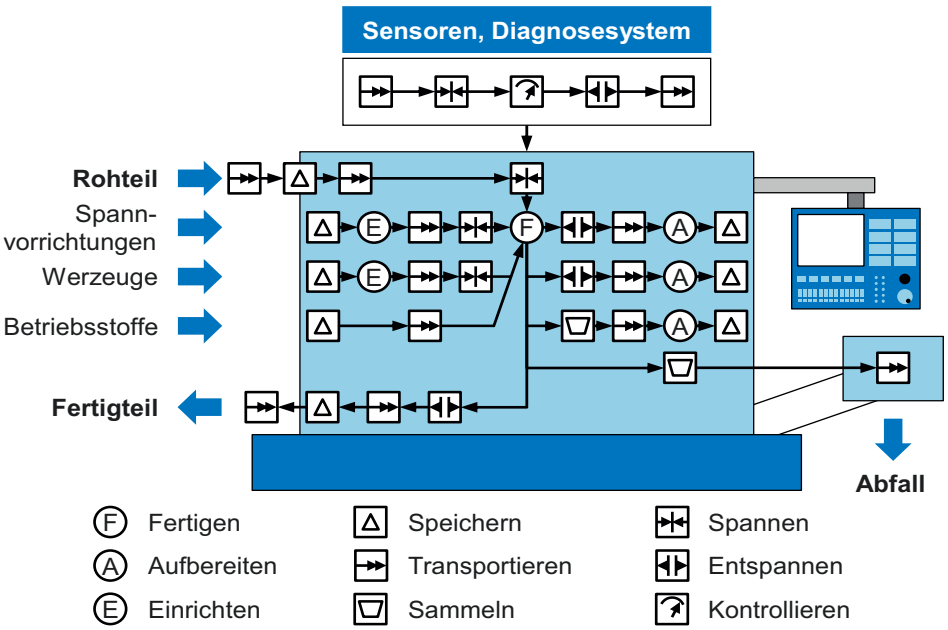


Bild 7.6 Prinzipieller Aufbau von Teilfunktionen einer Werkzeugmaschine

dungsfall zu analysieren, ob sich durch ein Automatisierungssystem annähernd die Prozesssicherheit erreichen lässt, welche durch die kognitiven Fähigkeiten des Menschen erreicht wird.

In dem oft komplexen Zusammenspiel von Organisation (Material- und Werkzeugverwaltung, Maschinenprogrammierung, Maschinenaufrüstung, Fertigungskontrolle) und Optimierung des technologischen Prozessablaufs treten oft Abweichungen von den Planungsdaten auf. Die Automatisierung der Erkennung dieser Abweichung und anschließende Einleitung einer geeigneten Maßnahme zur Behebung derselben, sollen die Anlage zu einer Selbstoptimierung befähigen; eine Eigenschaft, die aktuell für einzelne Anlagenabschnitte bzw. Bearbeitungszentren in der Entwicklung steht, jedoch noch nicht umfänglich für vernetzte Produktionsanlagen umsetzbar ist. Wirtschaftliche Lösungen, um diese Abweichungen zu beseitigen, können meist nur von qualifizierten Mitarbeitern und nicht durch ein Automatisierungssystem gefunden werden.

7.4.2 Funktionsfolgen

Voraussetzung für einen automatisierten Fertigungsablauf ist eine räumliche und zeitliche Koordination der Teilfunktionen. Diese Aufgabe wird von der Maschinensteuerung übernommen. Sie besteht darin, die genaue Folge aller Teilfunktionen zu speichern, die Abläufe folgerichtig zum entsprechenden Zeitpunkt zu initiieren, die Ausführung zu überwachen, ggf. den Fertigungsprozess zu regeln (Messregelung, Adaptive Control) und den Zustand des Gesamtsystems kontinuierlich zu diagnostizieren.

Außer der zentralen Aufgabe der Maschinensteuerung, den Fertigungsprozess zu steuern, müssen die Bearbeitungstrajektorien und die benötigten Werkzeuge sowie die zugehörigen Betriebsmittel und Spannvorrichtungen gespeichert, transportiert, gespannt und entspannt werden. Während und nach der Bearbeitung erfolgt die Überprüfung der Fertigungsqualität, d. h. die Werkstückmaße werden vermessen und, falls erforderlich, entsprechende Korrekturschritte eingeleitet. Die Überwachung und Diagnose nahezu aller Komponenten der Maschine sowie des eigentlichen Fertigungsprozesses geschieht während der gesamten Betriebszeit. Die vollständige Realisierung dieser allumfassenden Steuerungsaufgabe ist nur bei sehr aufwendigen Einrichtungen, wie flexiblen Fertigungssystemen, gegeben.

Vor allem die Überwachung der am Prozess beteiligten Objekte, z. B. Werkzeugzustand, bereitet heute mangels Sensoren, die die Verschleißgrößen direkt erfassen können und für den Einsatz unter anspruchsvollen Umgebungsbedingungen (Verschmutzung, Temperatur etc.) geeignet sind, noch große Schwierigkeiten.

Die Programm- bzw. Ablaufsteuerung einer Anlage muss entsprechend der wechselnden Bearbeitungsaufgabe umprogrammiert werden. In Bild 7.7 wird der allgemeine Ablauf einer Funktionsfolge aus Teilfunktionen und Makros verdeutlicht. Makros sind eine wiederverwendbare, abgeschlossene Verkettung mehrerer Teilfunktionen. Sie erleichtern dem Benutzer die Erstellung der Programmieranweisungen für komplizierte, umfangreiche Funktionsabläufe. Teilfunktionen und Makros eines Arbeitszyklus (Bearbeitung eines Werkstücks) werden entsprechend der programmierten Funktionsfolge initiiert und ausgeführt. Die auszuführenden Funktionen laufen dabei entweder nacheinander, d. h. nach

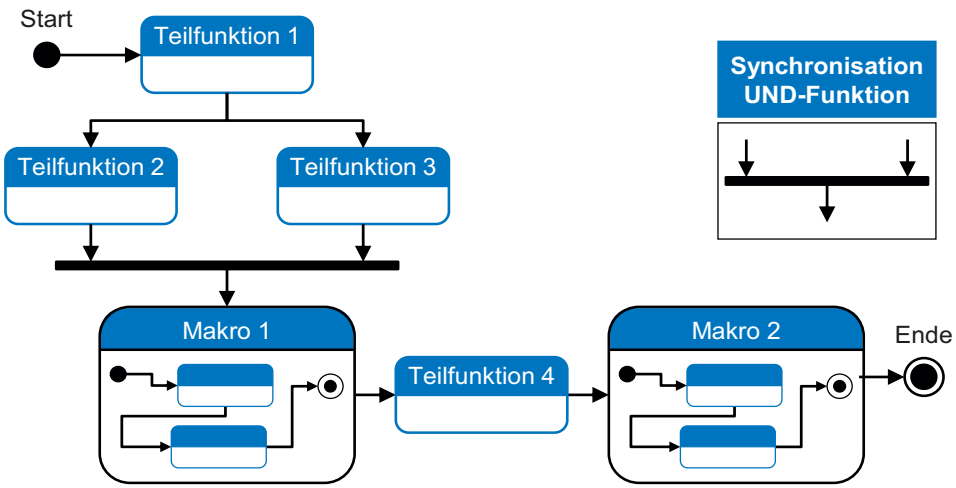


Bild 7.7 Ablauf einer Funktionsfolge in Unified Modelling Language (UML)

Quittierung der zeitlich vorher ablaufenden Funktion(en), oder wenn möglich bzw. erforderlich auch parallel ab. Die Quittierung der letzten auszuführenden Funktion (z. B. Vermessung des Werkstücks) beendet die Ausführung der Funktionsfolge und initiiert gleichzeitig die erste Teilfunktion für die nächste Werkstückbearbeitung oder setzt die Maschine still.

7.4.3 Elemente der Steuerung, Programmierung und Speicherung

Die Steuerung wird mit Hilfe mechanischer, hydraulischer, pneumatischer, elektrischer oder elektronischer Elemente bzw. deren Kombination aufgebaut. Die Komplexität der Elemente zur Ausführung der Teilfunktionen ist von der Steuerungsart abhängig. Einfache Elemente sind Hand- oder Endschalter, wobei letztere in der Regel gleichzeitig zur Quittierung der vorangegangenen Wegfunktion herangezogen werden können.

Bei mechanischen Steuerungen erfordern die Funktionsaufrufe häufig komplizierte Schaltmechanismen. Endanschläge und Nocken sind auf entsprechenden Trägersystemen angebracht, die sich ihrerseits mit dem Maschinenschlitten bewegen und durch ihre örtliche Lage zu den mechanischen Schaltfühlern den Vorschubweg bestimmen. Sie initiieren Schalt- und Steuerungsfunktionen, die über Kurvenscheiben rein mechanisch ausgeführt werden (vgl. ► Kap. 8).

Bei elektrischen und elektronischen Steuerungen werden elektrische Schalter (Hand- und Endschalter) zur Initiierung bzw. Quittierung von Funktionen eingesetzt. Die logische Signalverarbeitung geschieht bei elektrischen Steuerungen mit Hilfe von Relais, bei elektronischen Steuerungen je nach Aufgabenumfang mit Hilfe von integrierten Schaltkreisen, Mikroprozessoren und Prozessrechnern. Das Umsetzen der bei elektronischen Steuerungen meist energieschwachen Steuerbefehle in die Ausführungsfunktionen erfolgt mit Verstärkern bzw. Servobausteinen. Üblicherweise finden hier Schütze, Transistor- und Thyristorelemente oder Ventile und Kupplungen Verwendung (vgl. ► Kap. 10).

Zur Erzeugung der Hauptarbeitsbewegung einer Maschine (z. B. Linearbewegung von Pressenstößeln und Hobelschlitten, Drehbewegung von Hauptspindeln an Dreh- und Fräsmaschinen) sowie der Vorschubbewegungen (z. B. Kreuztische, Pinolen sowie Walzen- und Zangenvorschub bei der Blechbearbeitung) werden elektrische und hydraulische Motoren zur Erzeugung der rotatorischen oder translatorischen Bewegung eingesetzt. Diese werden je nach Anwendungsfall drehzahl- oder auch kraftgeregelt ausgeführt. Häufig müssen geeignete Wandler (z. B. Getriebe, Spindelmuttersysteme) zwischengeschaltet werden, um den gewünschten Drehzahl- bzw. Drehmomentenbereich zu erreichen oder um die motorische Drehbewegung in eine lineare Antriebsbewegung umzuwandeln.

Zur Überwachung der Maschinenfunktionen und des Fertigungsprozesses werden Schalter, Sensoren und Messsysteme eingesetzt. Die Wahl der richtigen Steuerung ergibt sich immer aus dem Kompromiss aus Komfort und Funktionsumfang und dem Preis, den der Kunde zu zahlen bereit ist.

Eine wichtige Voraussetzung für die Wiederverwendung von programmierten Werkstückbearbeitungsfolgen ist die Speicherung der zur Ausführung benötigten Informationen. Dazu gehört die Reihenfolge der Einzelfunktionen, d. h. die sequenzielle Vorgabe der Schalt- und Weginformationen, die in ihrer Gesamtheit das Bearbeitungsprogramm ergeben. Schaltinformationen dienen dabei der Ausführung von einzelnen Teilfunktionen (z. B. Wechsel von Drehzahlen und Vorschüben, Weiterschalten des Werkzeugrevolvers, Klemmen des Maschinenschlittens, Spannen von Werkzeugen und Werkstücken). Weginformationen beinhalten alle Angaben für die Bewegungsfolgen der verschiedenen Baugruppen, wie Schlitten,

		Speichermedium		
Steuerungs-technologie	**Program-mierung**	**Weg-funktion**	**Schalt-funktion**	**Ausführung der logischen Verknüpfung und Pro-grammablauf-steuerung**
Kurven-gesteuerte Maschine	Herstellung der mechanischen Speichermedi-en und Setzen von Nocken	- Fest-anschläge - Kurven-scheiben - Kurven-lineal	- Nocken auf Hilfssteuer-welle und bewegten Schlitten	- Kupplung, Getriebe - Schalt-gestänge - Kurven
nach-formende (kopierende) Maschine	Herstellung der mechanischen Speichermedi-en und Setzen von Nocken	- Schab-lonen - Kurven-lineal - 3D-Modelle	- Endschalter - Nocken auf Leisten oder Trommeln	- SPS - Relais
Kurven- und elektronisch gesteuerte Maschinen	Herstellung der mechanischen Speicher-medien, über Display und Tastatur	- Festan-schläge - Kurven-scheiben	- Endschalter - Nocken auf Leisten oder Trommeln und bewegte Schlitten	- SPS - Relais (teilweise auch NC)
elektrisch / elektronisch gesteuerte Maschinen (SPS)	über Kreuz-schienen-verteiler, Steckertafel oder über Display und Tastatur	- Maßstäbe	- Steckertafel - Endschalter - Nocken mit Schaltern	- SPS - Relais
numerisch gesteuerte Maschine (Basis: Mikro-prozessor)	online über Display und Tastatur, offline über Program-miersprachen oder grafisch	NC-Programme - ROM- und RAM-Speicher - magnetische und optische Speicher (Netzwerk, USB, Harddisk)		- NC - SPS - Relais

Bild 7.8 Speichermedien für Schalt- und Weginformationen

Pinole usw. in den einzelnen Achsen, die zur Erzeugung der Werkstückgeometrie erforderlich sind. Im Bild 7.8 sind die verschiedenen Speichermedien für die Achsbewegungen (Geometrie) und Schaltbefehle in Abhängigkeit der verwendeten Steuerungstechnologie zusammengestellt.

7.5 Beispiele automatisierter Funktionen

7.5.1 Weg- und Schaltinformationen

Die Bearbeitung von Werkstückkonturen wie Bohrungen, das Drehen von Absätzen oder das Fräsen rechtwinkliger Teile erfordert die Vorgabe definierter, zeitlich nacheinander ablaufender Bewegungen der Maschinenschlitten, der Spindel(n) usw. innerhalb bestimmter Weggrenzen. Voraussetzung für die Steuerung von Bewegungen und für die Schaltvorgänge von einer Funktion zur nächsten ist entweder die Kenntnis der Wegendinformation durch lineare Wegaufnehmer (▶ Kap. 7.5.1.1) Nocken- bzw. Schalterleisten (▶ Kap. 7.5.1.2) oder durch absolute bzw. inkrementelle Drehgeber (▶ Kap. 7.5.1.3). Die zu den Messverfahren zugehörigen physikalischen Prinzipien sind in ▶ Kap. 2.3 erläutert.

7.5.1.1 Lineare Wegaufnehmer

Die Positionsbestimmung linear geführter Maschinenteile, wie beispielsweise von Hauptachsen, wird in der Regel durch optische, lineare Längenmessgeräte durchgeführt, Bild 7.9.

Inkrementale optische Messgeräte funktionieren nach dem in Bild 7.10 dargestellten Funktionsprinzip. Die

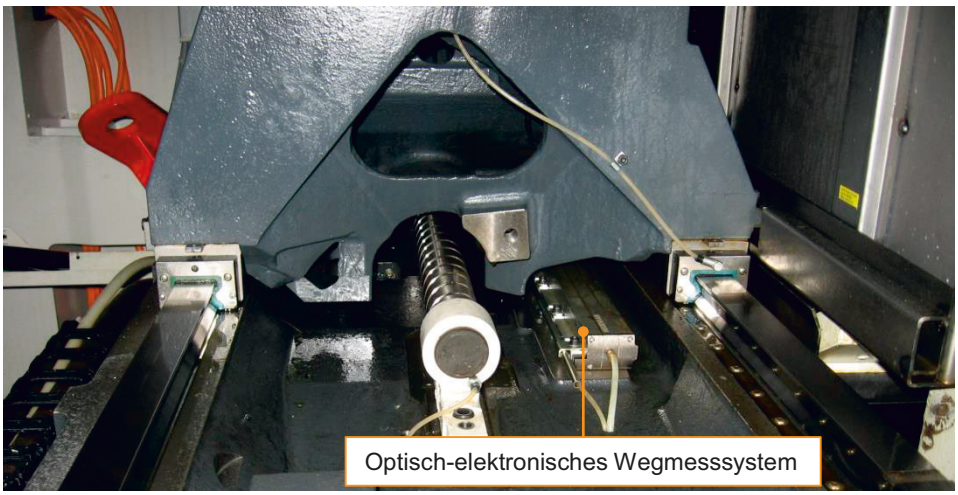


Bild 7.9 Optisch-elektronisches Wegmesssystem zur Positionsbestimmung einer Maschinenachse

Messeinheit, bestehend aus Lichtquelle, Kondensor, Abtastplatte und Photoelemente, ist fest mit der bewegten Maschinenachse verbunden und wird parallel über einen stationär befestigten Glasmaßstab geführt. Auf dem Glasmaßstab ist eine Codespur eingeprägt, die abwechselnd lichtdurchlässig und -undurchlässig ist [SCHÖ97]. Durch das Verfahren der Messeinheit über den Maßstab kann aus der Anzahl der Lichtimpulse (aufgenommen durch die photosensitiven Elemente) und der Teilungsperiode der Codespur der Verfahrweg und damit die Position der Achse berechnet werden, ▶ Kap. 2.3.2.

Die Positionsinformationen können anschließend in der Maschinensteuerung dazu genutzt werden, Bewegungsabläufe und andere Schaltvorgänge zu steuern.

7.5.1.2 Nocken- und Schalterleisten

Weginformationen lassen sich mechanisch am einfachsten mit Nockenleisten vorgeben und speichern, die verstellbar nebeneinander oder hintereinander auf Schienen oder Walzen angeordnet sind. Die Nocken können mechanisch über Hebel oder mit elektrischen, pneumatischen oder hydraulischen Schaltern abgetastet werden. Mit diesen Wegspeichern werden dann bei Erreichen der Position Schalter betätigt, die die laufenden Funktionen beenden und neue einleiten. Bild 7.11 zeigt die Nockenleisten am Kreuztisch einer Bettfräsmaschine. Die Nocken dienen dabei zur Feststellung eines zu erreichenden Weges und zur Initiierung der folgenden Funktionen wie Änderung der Vorschubgeschwindigkeit und -richtung oder der Spindeldrehzahl. Die Folge von verschiedenen Schaltfunktionen kann auch auf Nockentrommeln gespeichert werden. Die Trommel dreht sich dabei

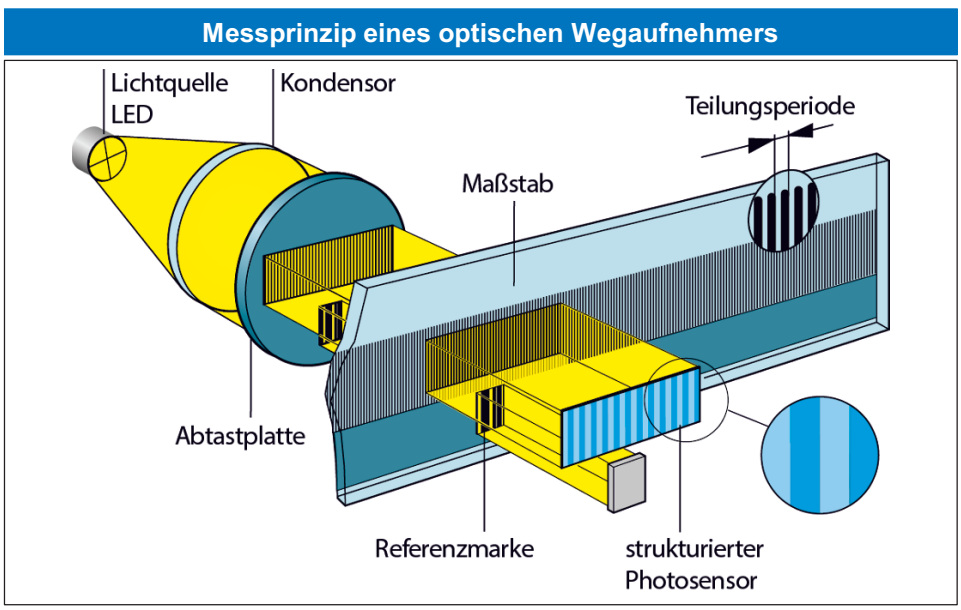


Bild 7.10 Funktionsweise eines optischen inkrementellen Wegaufnehmers. Quelle: HEIDENHEIN

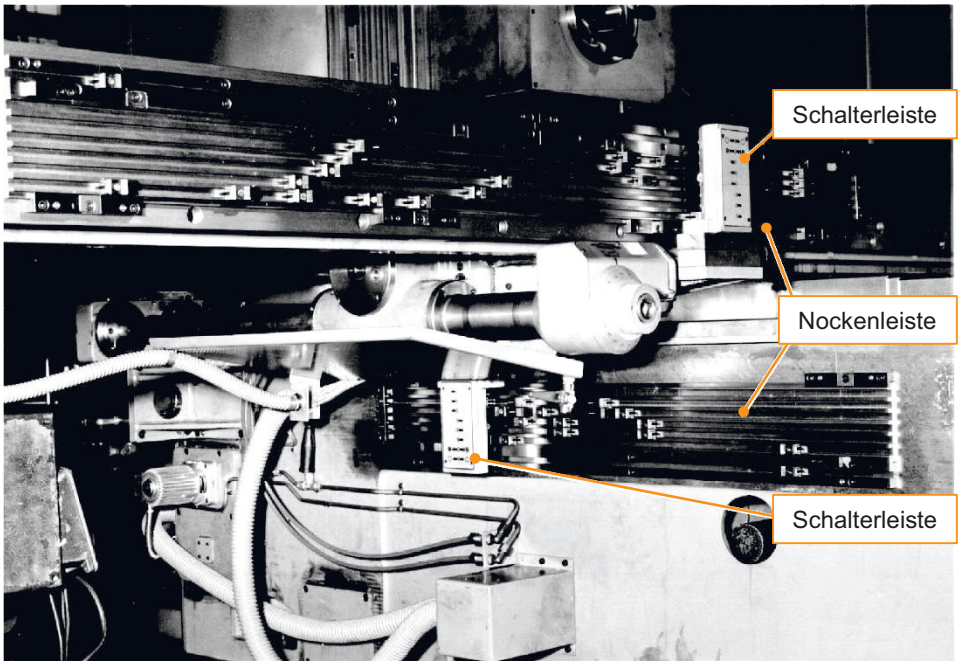


Bild 7.11 Nockenleisten zur Wegbegrenzung und Initiierung von Schaltvorgängen

entsprechend dem Arbeitsfortschritt weiter. Nach einer Umdrehung ist der Arbeitszyklus beendet und kann wieder neu gestartet werden. Die absolute Schaltgenauigkeit der Nocken liegt bei ca. 0,1 mm.

Bei häufig wiederkehrender Bearbeitung eines Werkstücks lohnt es sich, die gesamte Nockenleiste mit den mechanischen Nocken wiederzuverwenden. Zu diesem Zweck wird die Leiste von der Maschine abgenommen und bei Wiederholung des Fertigungsauftrags an die Maschine montiert.

7.5.1.3 Absolute und inkrementale Drehgeber zur Erfassung der Istposition einer Maschinenbaugruppe und zur Drehzahlregelung

Drehgeber werden in Verbindung mit Kugelrollspindeln zur (in)direkten Erfassung von Tischpositionen oder zur direkten Erfassung von Winkellagen, z. B. von Drehtischen, eingesetzt.

Bild 7.12 zeigt einen NC-gesteuerten Maschinenschlitten. Die aus dem Ausgangssignal des Drehgebers über die Steigung der Gewindespindel in der Maschinensteuerung ermittelte Ist-Position wird mit dem entsprechenden Positionssollwert verglichen.

Aus der Differenz von Soll- und Istwert wird der Geschwindigkeitssollwert für den Motor gebildet und dem Antriebsverstärker übermittelt. Die Drehzahlregelung wird mit einem Antriebsverstärker realisiert, der in Abhängigkeit von der vorgegebenen Solldrehzahl eine Läufer- bzw. Feldspannung liefert und entsprechend der mit dem Tachogenerator ermittelten Ist-Geschwindigkeit (Drehzahl) korrigiert. In Abhängigkeit des Positions-Istwertes des Drehgebers können u. a. auch Schalt- und Wegfunktionen initiiert werden (Beispiel: Geschwindigkeitsänderungen, Vorschub weiterer Achse, etc.).

7.5.2 Werkstücktransport und -handhabung

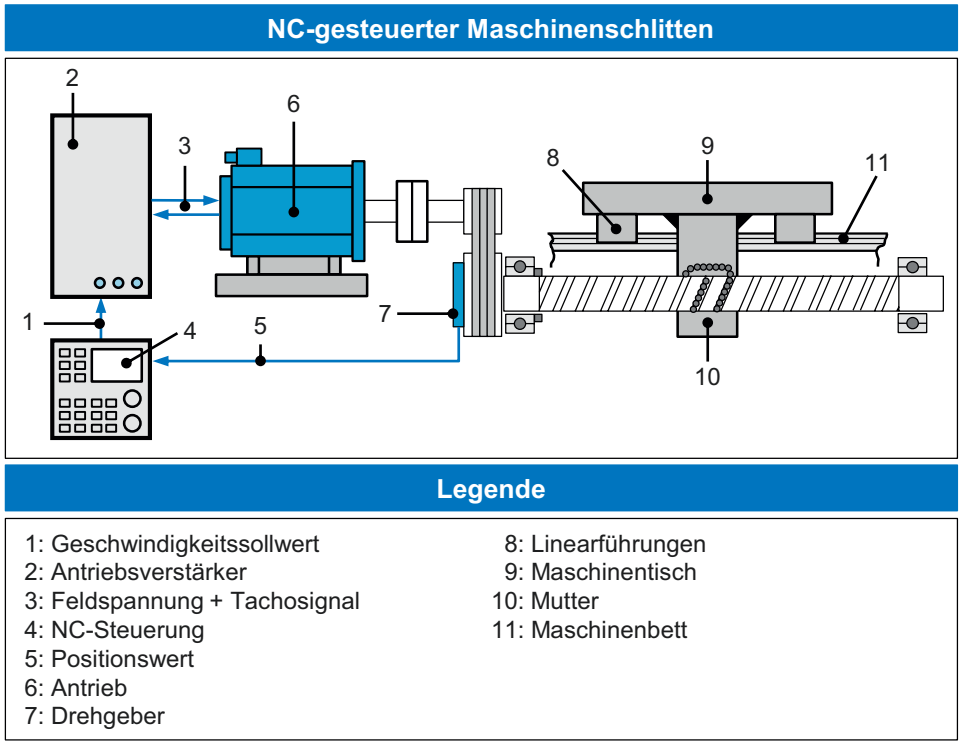
Die Automatisierung des Werkstücktransports ist eine wichtige Maßnahme zur Reduzierung der Nebenzeiten. Die Versorgung einer Werkzeugmaschine mit Rohmaterial erfolgt in der Regel mit Stangenmaterial (Rund-, Vierkant- oder Sechskantprofile), Ringwerkstoff, Stangenabschnitten oder mit vorgeformten Rohlingen.

In diesem Abschnitt werden Transportsysteme- bzw. Hilfseinrichtungen vorgestellt, mit denen die Bereitstellung der zu bearbeitenden Werkstücke an den entsprechenden Werkzeugmaschinen ermöglicht wird.

Die Versorgung einer vollautomatischen Drehmaschine mit Stangenmaterial erfordert Systeme für die Materialspeicherung und den Materialvorschub. Eine Lösungsmöglichkeit stellt das in Bild 7.13 gezeigte Spannfutter dar, das in einer Drehmaschine mit Trommelwerkzeugspeicher eingesetzt wird. Das Stangenmaterial wird dabei mit dem Gegenfutter durch die hohle Arbeitsspindel gezogen. Der Materialvorschub kann somit durch den Verfahrweg des Werkzeugschlittens flexibel gestaltet werden. Dieses Spannfutter kann weiter zur Bearbeitung beider Seiten des Werkstückes benutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Versorgung einer Drehmaschine mit Stangenmaterial ist in Bild 7.14 dargestellt. Der Werkstofftransport wird hierbei über einen zweiteiligen Werkstoffschieber (Teleskopschieber) realisiert, der aus

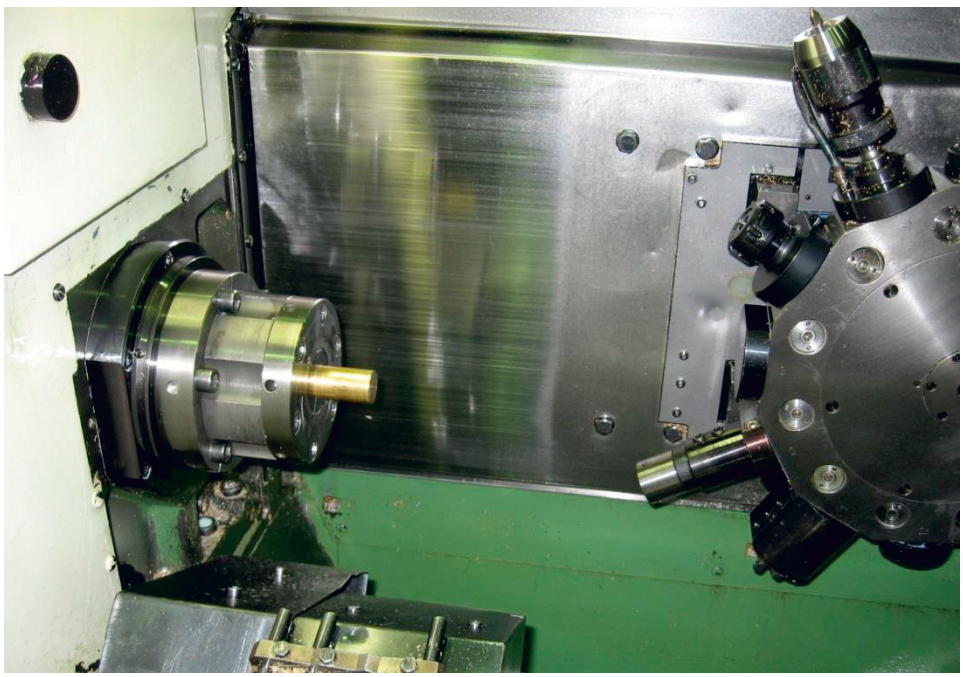
Bild 7.12 NC-gesteuerter Maschinenschlitten. Quelle: Boehringer



einem Außenteil und einem Innenschieber besteht. Der Außenteil des Teleskopschiebers verharrt mit kürzer werdender Stange am hinteren Ende der Arbeitsspindel, während der Innenschieber mit kleinerem Durchmesser das Vorschieben der Reststange im Bereich der Spindel übernimmt. Dabei wird der Innenschieber über den Kettentrieb und den Mitnehmer durch das geschlitzte Außenteil angetrieben.

Da sich während der Bearbeitung die komplette Stange dreht, muss eine entsprechende Lagerung im Bereich des Stangenlademagazins vorgesehen werden. Diese wird üblicherweise mit Rollen oder in Form einer Ölführung in einem geschlossenen Rohr realisiert, wobei sich durch die Rotation der Stange ein tragender, hydrodynamischer Ölfilm aufbaut.

Bild 7.13 Werkzeugspeicher mit Futter zur Realisierung des Stangenvorschubs



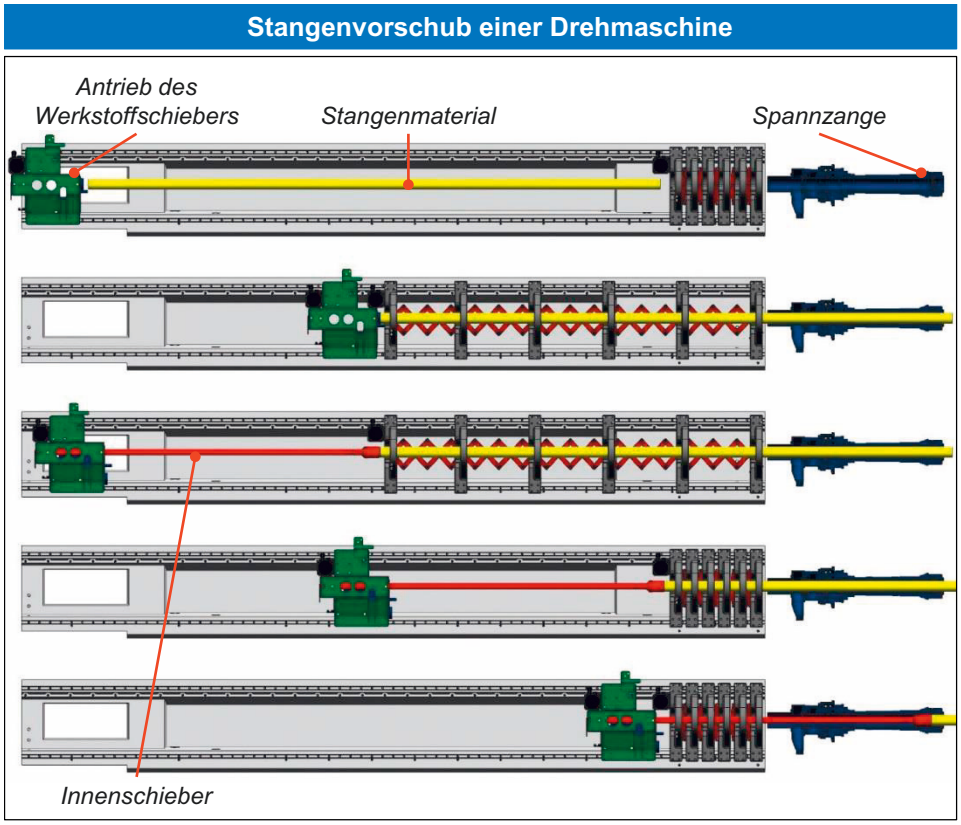


Bild 7.14 Werkstoffspeicher für den Stangenvorschub einer Drehmaschine. Quelle: INDEX-Werke

Bei vollautomatisierten, flexiblen Fertigungssystemen (▶ Kap. 9, Band 1) können die zu bearbeitenden Rohteile in einer Fertigungszelle vorbereitet (Beispiel: Sägezelle, Handarbeitsplätze etc.) und in weiteren Fertigungszellen auf den entsprechenden Werkzeugmaschinen bearbeitet werden. Der Transport zwischen den einzelnen Zellen wird, wie in Bild 7.15 dargestellt, in der Regel über Handhabungsgeräte, Flurförderfahrzeuge oder Transportbänder realisiert. Durch die Flexibilität von programmierbaren Handhabungsgeräten wie Industrierobotern oder modularen Greif- und Transportsystemen können die Umrüstzeiten und damit die Kosten einer Umstellung auf andere Werkstücke niedrig gehalten werden.

Durch den Einsatz von automatischen Palettenwechseleinrichtungen wird der Nutzungsgrad der Maschine beträchtlich gesteigert, da das Auf- und Abspannen der Werkstücke automatisch oder manuell, parallel zum Bearbeitungsvorgang erfolgen kann. Mit Hilfe geeigneter Palettentransporteinrichtungen können mehrere Maschinen zu einem flexiblen Fertigungssystem verkettet werden.

In der rechnergestützten Fertigung sind der Material- und der Informationsfluss untrennbar miteinander ver-



Bild 7.15 Vollautomatische Fertigungsstraße für Frästeile. Quelle: GROB-WERKE

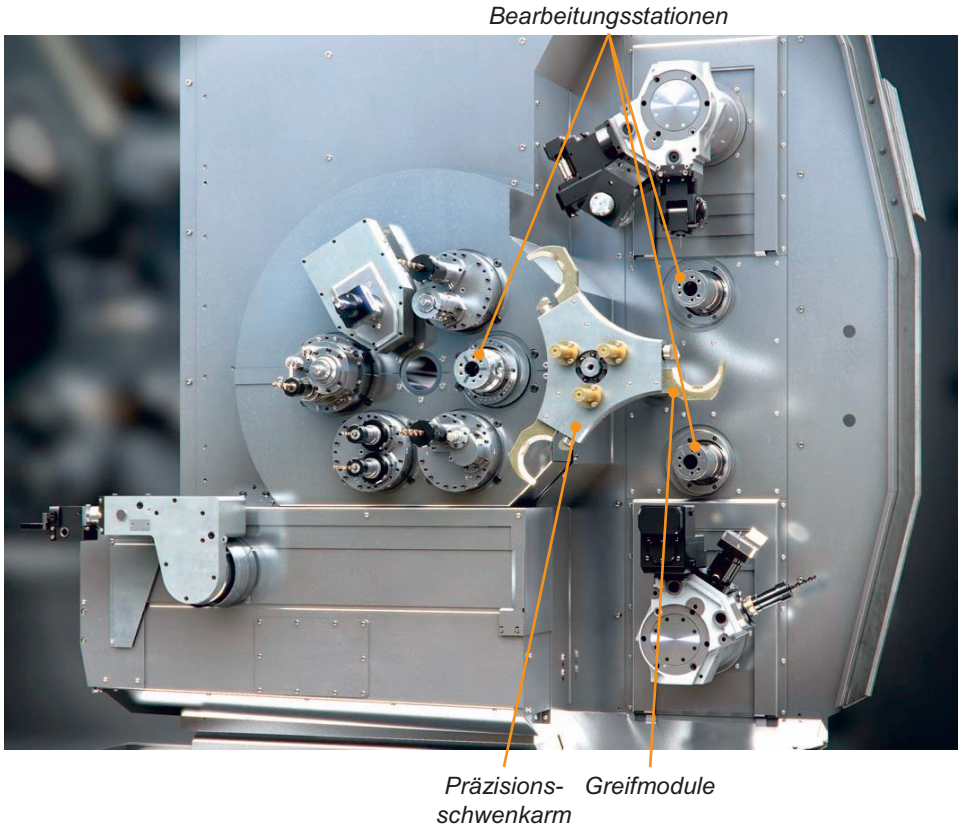


Bild 7.16 Präzisionsschwenkarm zum Werkstücktransfer an einem Bearbeitungskasten einem CNC-Mehrspindelautomaten. Quelle: Alfred H. Schütte

bunden. Insbesondere die flexible, automatisierte Fertigung erfordert diese Kopplung. Für die Erkennung der Paletten mit den jeweils aufgespannten Werkstücken werden elektronische Identifikationssysteme eingesetzt. Sie bestehen aus einem Codeträger und einer Auswerteeinheit. Der Codeträger kann je nach Anforderung z. B. als Transponder, Barcode oder RFID (*radio-frequency identification*) ausgeführt sein. Er ist in die Palette eingebaut und trägt eine individuelle Kennung. Das Lesen und somit die Identifizierung der Palette erfolgt durch eine an einen Rechner (Leitrechner, Zellenrechner, Maschinensteuerung) angebundenen Leseeinheit. Mit dieser Information kann gemäß dem Arbeitsplan die entsprechende Bearbeitungsmaschine vom Transportsystem angesteuert und das zugehörige NC-Programm zur Maschine gesendet werden.

Der automatische Werkstückwechsel und -transfer in Drehmaschinen kann ebenfalls mit Hilfe von Beschickungsautomaten realisiert werden. In Bild 7.16 ist ein Präzisionsschwenkarm zum Transfer zwischen verschiedenen Bearbeitungseinheiten einer Drehmaschine gezeigt. Der Schwenkarm verfügt über drei Greifmodule, die mechanisch gleich aufgebaut sind. Nach Abschluss eines Bearbeitungstaktes übernimmt der Schwenkarm das Werkstück und übergibt es nach einer 120°-Drehung der nächsten Bearbeitungsstation. Eine solche Ausführung ermöglicht die parallele Bearbeitung mehrerer Werkstücke.

7.5.3 Werkzeughandhabung und -speicherung

Eine weitere Voraussetzung für einen vollautomatischen Bearbeitungsablauf ist die Automatisierung des Werkzeugwechsels und der Werkzeughandhabung. Bedingung dafür ist das Vorhandensein geeigneter Schnittstellen zwischen Maschinen, Werkzeugen, Handhabungsgeräten, Werkzeugmagazinen, Identifikationssystemen, Steuerungen usw. Typische Schnittstellen für Fräswerkzeuge sind der Steilkegel SK (DIN ISO 7388) [DIN14] und der Hohlschaftkegel HSK (DIN 69893) [DIN11]. Bei Drehmaschinen findet der Zylinderschaft mit Anzugskeil (DIN ISO 10889) [DIN06] sowie weitere Schnittstellen Verwendung

Bild 7.17 zeigt eine automatische Schnellspanneinrichtung mit Hohlschaftkegel, wie sie in Dreh-, Bohr-, Fräs- und Schleifmaschinen zu finden ist. Die gelöste bzw. gespannte Stellung ist in der oberen bzw. unteren Bildhälfte zu sehen. Die mechanische Kopplung des Werkzeugs mit der Arbeitsspindel erfolgt im Wesentlichen über die Zugstange und die Spannzange. Indem die Zugstange in Richtung FE bewegt wird, bewirkt der Konus des Spannkegels ein Spreizen der Spannzange, wodurch das Werkzeug gespannt wird. Die Haltekraft für die Zugstange wird über das Tellerfederpaket, welches im Abstandshalter verbaut ist, aufgebracht. Damit ist sichergestellt, dass das Werkzeug auch bei Ausfall der Energieversorgung nicht herausfällt. Das Öffnen der Spannein-

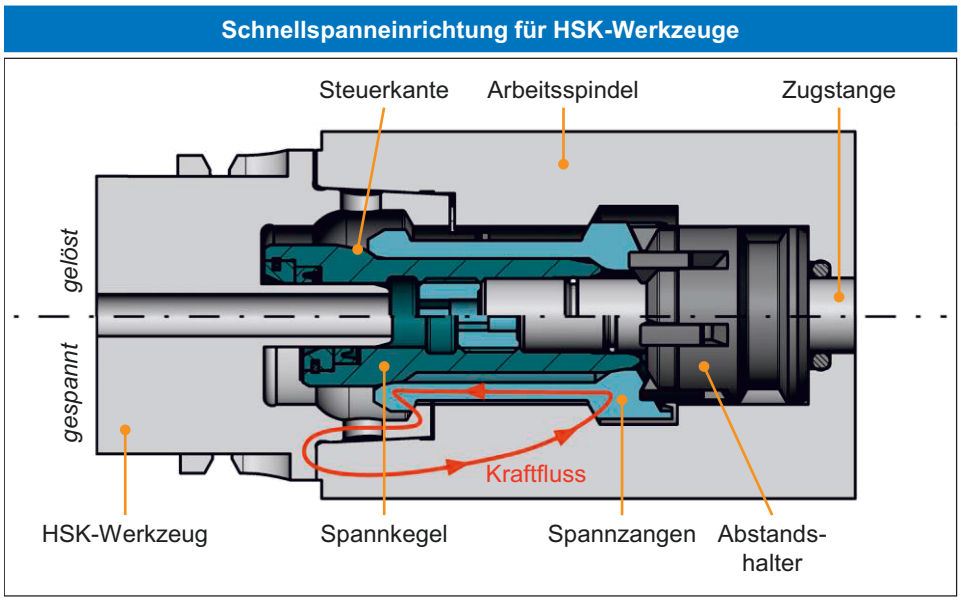


Bild 7.17 Automatische Schnellspanneinrichtung für Hohlschaftkegelwerkzeuge. Quelle: OTT-JAKOB Spanntechnik

richtung kann elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch erfolgen. Dazu wird ein Kolben mit Druck beaufschlagt, sodass eine Kraft in Gegenrichtung zur Federkraft FE erzeugt wird, welche das Tellerfederpaket zusammendrückt. Durch ein gleichzeitiges Verschieben der Zugstange nach links, löst sich der Spannkegel aus der Spannzange. Sobald die Steuerkante die Spannzange passiert hat, kann das Werkzeug entnommen werden.

Zur Überwachung des Werkzeugflusses, d. h. zur eindeutigen Identifikation der Werkzeuge, werden wie bei der Materialflussüberwachung elektronische Identifikationssysteme eingesetzt, die aus einem Lesekopf und einem individualisierten Codeträger bestehen, Bild 7.18. Mittels eines Lesekopfes kann ein Rechner (Leitrechner, Zellenrechner, Maschinensteuerung) den Code auslesen und das vorliegende Werkzeug identifizieren. Bei einem Werkzeugwechsel kann somit z. B. die Einwechselung des korrekten Werkzeuges überprüft werden.

Als weiteren Vorteil ermöglicht die Codierung eine automatische Erfassung der Standzeiten der Werkzeuge.

Die in einer Drehmaschine benötigten Werkzeuge sind entweder in einem Revolverkopf, Bild 7.13 rechts, oder ähnlichen Systemen gespeichert und werden nacheinander in Arbeitsposition geschaltet. Werkzeuge für Fräsmaschinen befinden sich häufig in Speicherketten-Systemen unterschiedlicher Bauarten. Bild 7.19 zeigt ein in eine Werkzeugmaschine integriertes Werkzeugspeicherkettensystem. Das manuelle Aus- und Einwechseln zusätzlicher oder nicht weiter benötigter Werkzeuge erfolgt durch den Maschinenbediener über eine Werkzeugwechselstation.

Ein zur Bearbeitung benötigtes Werkzeug wird über eine Handhabungseinrichtung aus dem Magazin in die Übernahmeposition für den Werkzeugwechsel gebracht und anschließend von der Werkzeugwechseleinrichtung mit dem Werkzeug in der Arbeitsspindel ausgetauscht. Das alte Werkzeug wird anschließend vom Handhabungssystem an seinem Platz der Speicherkette abgelegt. Bild 7.20 zeigt den Werkzeugwechsel mit einem Doppelgreifer in einem Bearbeitungszentrum.

Zum Werkzeugwechsel fährt das Flächenportal mit dem im Greifer befindlichen Werkzeug bis zur Werkzeugübernahmestellung vor. Der Doppelgreifer im Arbeitsraum fährt vor, Bild 7.20 a, und schwenkt um 90°, Bild 7.20 b. In dieser Position werden die Werkzeuge gefasst, verriegelt und anschließend in Spindel und Greifer des Flächenportals gelöst. Danach fährt der Doppelgreifer in die Schwenkstellung vor und schwenkt um 180°, Teilbild b) bis d) und fährt in die Werkzeugübernahmestellung zurück. Die Werkzeuge werden im Doppelgreifer entriegelt und in Spindel und

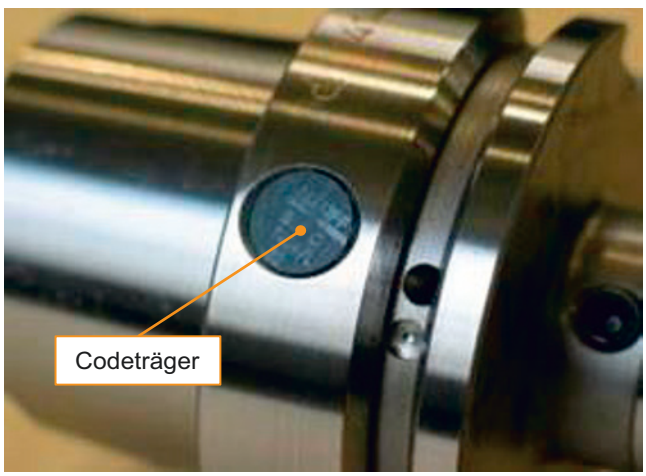


Bild 7.18 Werkzeug mit elektronischem Identifikationssystem. Quelle: GROB-WERKE GmbH & Co. KG

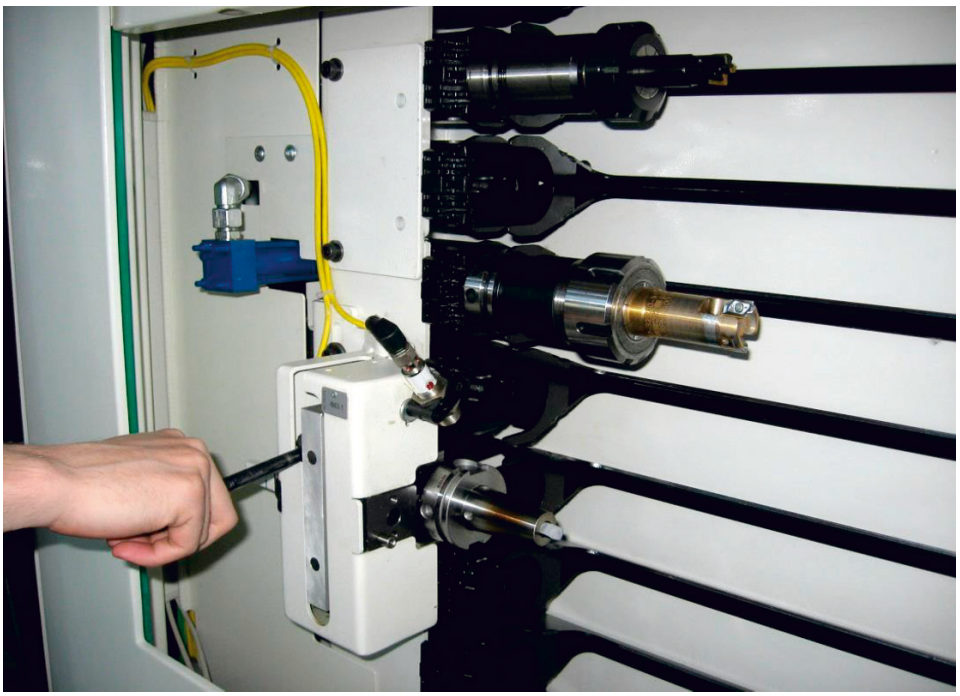


Bild 7.19 Manuelle Werkzeugwechselstation eines integrierten Werkzeugspeicherkettensystems

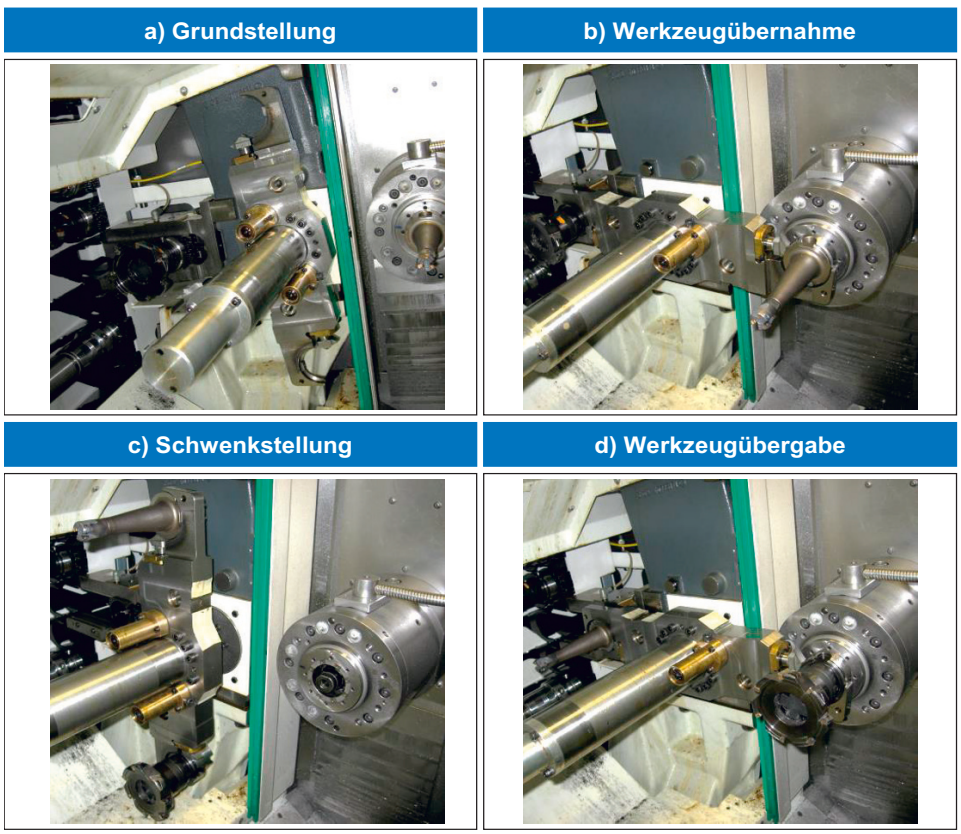


Bild 7.20 Werkzeugwechsel in einem Bearbeitungszentrum

Greifer des Flächenportals gespannt. Anschließend schwenkt der Doppelgreifer um 90° zurück und fährt in die Grundstellung.

Eine weitere Möglichkeit neben Speicherkettensystemen ist die Werkzeug-Bereitstellung in separaten Speicherkassetten, welche die auftragsspezifischen Werkzeuge für einen definierten Arbeitszeitraum, z. B. drei Schichten, aufnehmen. Dabei werden die Werkzeuge anhand von asymmetrischen Mitnehmernuten oder einer Orientierungsnut im Magazin ausgerichtet.

7.5.4 Prozessüberwachung, Prozessregelung, Diagnose und Sicherheit

Im Bereich der automatisierten Fertigung nehmen die Überwachung und die direkte Korrektur des Produktionsprozesses eine wichtige Stellung ein. Durch die Diagnose der Maschine und der Werkzeuge können Produktionskosten gesenkt werden, da beispielsweise Stillstandzeiten durch frühzeitige Erkennung von Maschinenfehlern vermieden werden können. Weiterhin können durch geeignete Sensorsysteme Positionsabweichungen während des Bearbeitungsprozesses erkannt und der Fertigungsprozess korrigiert werden, sodass die Güte der hergestellten Bauteile gesteigert werden kann. Auch kann die Kompensation von Werkzeugverschleiß oder thermodynamischer Verformung zu geringeren Maßabweichungen führen, ▶ Kap. 12.

Im Gegensatz zu kleinen und mittleren CNC-Werkzeugmaschinen werden Großwerkzeugmaschinen häufig ohne Arbeitsraumverkleidung betrieben. Dadurch entsteht eine Gefahr für Bediener und Dritte, die während der Bearbeitung in den Arbeitsraum gelangen können. Durch die Überwachung des Arbeitsraumes mit optischen Sensoren oder Ultraschall-Systemen gelingt es beispielsweise, bei Betreten des Arbeitsraums die Maschine zu stoppen und die Gefahr für Personen, die in den Arbeitsraum gelangen, zu vermindern.

Planungsebene	- Produktionsplanung - Konstruktion - Arbeitsvorbereitung
Leitebene	- Auftragsfeinplanung - Koordination der Auftragsdurchsetzung - Zellenübergreifende Material- und Werkzeugflusssteuerung
Zellenebene	- Verwaltung des Bestands an Zellenaufträgen - Ablaufsteuerung bei Durchführung eines Zellenauftrags - Zelleninterne Material- und Werkzeugflusssteuerung
Steuerungs-ebene	- Steuerung und Überwachung von Prozessen
Sensor-/ Aktorebene	- Ansteuerung und Überwachung von Komponenten

Bild 7.21 Hierarchieebenen eines Leitsystems

7.5.5 Leittechnik

Unter dem Begriff Leittechnik wird die Steuerung und die Überwachung von Mehrmaschinensystemen verstanden. Die Datenverarbeitung in einem Produktionssystem (z. B. flexibles Fertigungssystem) erfolgt durch verschiedene spezialisierte Softwaremodule, die jeweils den Hierarchieebenen des Leitsystems, Bild 7.21, zugehörig sind, ▶ Kap. 14.

Der *Planungsebene* kommen dabei Funktionen wie Konstruktion oder Produktionsplanung zu. Aufgabe der *Leitebene* ist es, Aufträge der Planungsebene in dem Produktionssystem umzusetzen, indem den verschiedenen Einheiten der Ausführungsebene (*Zellen*) entsprechende Fertigungs-, Montage- oder Transportaufträge erteilt werden.

Die Aufträge werden von den Zellenrechnern in Steueranweisungen für die entsprechenden Anlagenteile umgesetzt und an die Steuerungen der Maschinen, Transportsysteme, Lager usw. übermittelt. Diese setzen die Steueranweisungen dann in die erforderlichen Aktionen der Einheit (Maschine, Roboter, Transportsystem, Lager usw.) um und erfassen Fehlermeldungen, Maschinen- und Betriebsdaten, die an die höheren Ebenen übertragen und dort ausgewertet werden.

7.5.6 Entsorgung

Der Entsorgung von Kühlschmierstoffen und Spänen wird unter dem Gesichtspunkt der Umweltverträglichkeit bei der Automatisierung von Werkzeugmaschinen besondere Beachtung geschenkt. Zusätzlich zur Handhabung von Werkzeugen, Spannmitteln und Werkstücken ist auch der Transport, der mit der Produktivität der Maschinen ansteigenden Spänemenge, in die Automatisierungsbestrebungen einzubeziehen. Vollautomatische Werkzeugmaschinen sind konstruktiv so aufgebaut, dass Späne ungehindert in den freien Raum unterhalb des Maschinengestells fallen können. Mit einer geeigneten Schneidengeometrie und den entsprechenden, optimalen Prozessparametern erreicht man kurzbrechende, nicht wirrende Späne. Verfahrbare Schutzhauben verhindern, dass umherfliegende Späne dem Arbeitsraum entweichen können. Unter diesen Bedingungen lassen sich Späne definiert auffangen und anschließend mit Transportbändern oder anderen Förderanlagen aus dem Maschinenbereich entfernen. Größere Fertigungssysteme oder Maschinenverbände sind mit Fördersystemen ausgerüstet, die die Späne zentral zusam-

menführen, Bild 7.22. Werden bei der Bearbeitung Kühlschmierstoffe eingesetzt, so werden diese in Behältern unter den Späneförderern gesammelt und, soweit sie an den Spänen haften bleiben, in Spänezentrifugen abgeschieden.

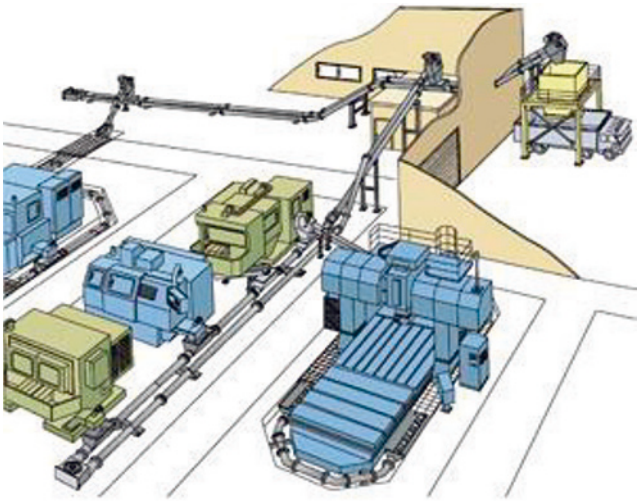


Bild 7.22 Automatisches Fördersystem zur zentralisierten Späneerfassung von Drehautomaten. Quelle: LNS GROUP

Abkürzungsverzeichnis

BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
ERP	Enterprise Resource Planning
HSK	Hohlschaftkegel
KI	Künstliche Intelligenz
LAN	Local Area Network
NC	Numerische Steuerungen
PLM	Product Lifecycle Management
RFID	Radio-Frequency Identification
SK	Steilkegel
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
UML	Unified Modeling Language

Literaturverzeichnis

[BEYE07] Beyerer, J.: visIT Leittechnik. Karlsruhe: Fraunhofer IITB, 2007

[BRUI66] Bruins, D. H.: Werkzeuge und Werkzeugmaschinen. München: Hanser-Verlag, 1966

[DIN06] Norm DIN ISO 10889 (2006). Werkzeughalter mit Zylinderschaft

[DIN11] Norm DIN 69893 (2011). Kegel-Hohlschäfte mit Plananlagen

[DIN14] Norm DIN ISO 7388 (2014). Werkzeugschäfte mit Kegel 7/24 für automatischen Werkzeugwechsel

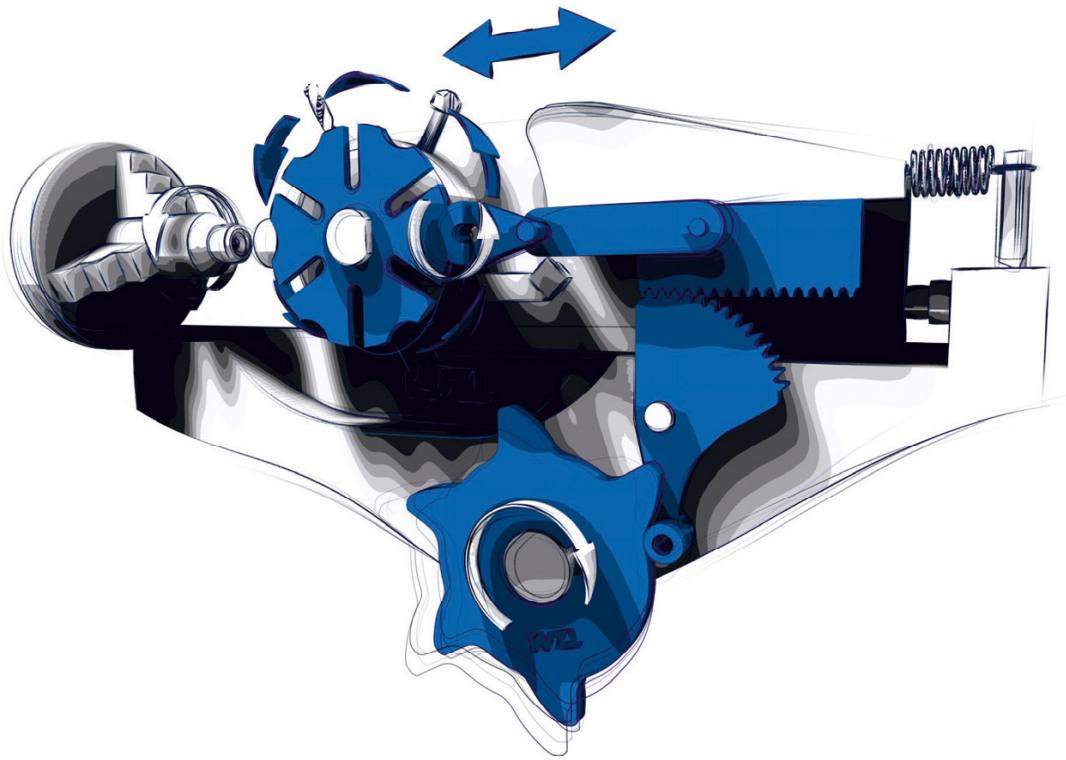
[SCHÖ97] Schöne, A.: Meßtechnik. Zweite, überarbeitete. Aufl. Berlin: Springer, 1997

[VDI04] Richtlinie VDI 2206 (2004). Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

[VDI12] Richtlinie VDI 2519 Blatt 1 (2012). Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/ Pflichtenheften

[WITT60] Wittmann, K.: Die Entwicklung der Drehbank. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1960

Kapitel 8



Mechanische Steuerungen

Ich danke meinen Mitarbeitern Dr.-Inform. Enno Bierbaum, Dipl.-Ing. Christian Ecker, Dr.-Ing. Alexander Epple, Christian Fimmers M.Sc., Dr.-Ing. Markus Obdenbusch und Stephan Wein M.Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

Mechanische Steuerungen



8.1 Einspindeldrehautomat – 305

8.2 Mehrspindeldrehautomat – 312

8.3 Weiterentwicklung des mechanisch gesteuerten Mehrspindlers – 321

8.4 Elektronische Königswelle – 322

8.4.1 Funktionsweise 323

8.4.2 Anwendung 325

Abkürzungsverzeichnis – 325

Formelzeichenverzeichnis – 325

Literaturverzeichnis – 326

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_8

Dieses Kapitel dient dem Verständnis der Realisierung von Bewegungs- und Steuerungsabläufen vor der Zeit der NC-Technik. Mechanisch gesteuerte Bewegungsabläufe finden dennoch aufgrund ihrer hohen Robustheit bei nicht veränderbaren und häufig wiederkehrenden Funktionen weiterhin Verwendung.

Kennzeichen der mechanischen Steuerung ist, dass sowohl die Speicherung als auch die Initiierung und Ausführung des Arbeitsablaufs durch mechanische Elemente wie Nocken, Kurven, Hebel usw. erfolgt. Trotz der schnellen Entwicklung der elektronisch oder NC-gesteuerten Maschinen werden mechanische Steuerungen heute noch vor allem im Bereich der Drehautomaten wirtschaftlich angewendet, wo aufgrund der großen Werkstückzahlen kürzeste Taktzeiten erforderlich sind und mittlere bis längere Rüstzeiten in Kauf genommen werden können. Weitere Vorteile der mechanisch gesteuerten Drehautomaten sind neben der hohen Produktivität ihre große Betriebssicherheit sowie die geringen Kosten für Anschaffung, Betrieb und Wartung. Aufgrund der relativ langen Rüstzeiten und der aufwendigeren Realisierung von Fertigungsabläufen auf mechanisch gesteuerten Maschinen ergibt sich im Vergleich zu numerisch gesteuerten Maschinen eine geringere Flexibilität.

Bei Drehautomaten, an denen im Folgenden die Wirkungsweise mechanischer Steuerungen erläutert werden soll, unterscheidet man zwischen Ein- und Mehrspindeldrehautomate, ◘ Bild 8.1.

Beim Einspindeldrehautomat (Einspindler) kommen die Revolverwerkzeuge nacheinander zum Einsatz. Nach der kurzen Eingriffszeit eines Revolverwerkzeugs in dessen Arbeitsphase folgt eine längere Stillstandszeit des Werkzeugs. Weitere Werkzeuge sind auf Querschlitten angebracht, die in Abhängigkeit vom Bearbeitungsschritt nacheinander oder parallel zu den Revolverwerkzeugen verwendet werden.

Mechanisch gesteuerte Einspindler wurden bis in die 1980er Jahre gebaut, viele Funktionen wurden nach und nach durch neue, NC-gesteuerte Maschinenkonzepte ersetzt. Heute werden mechanisch gesteuerte Mehrspindler nicht mehr hergestellt [HEIS14]. Auf dem Gebrauchtmarkt werden diese Automaten retrogefittet angeboten und finden

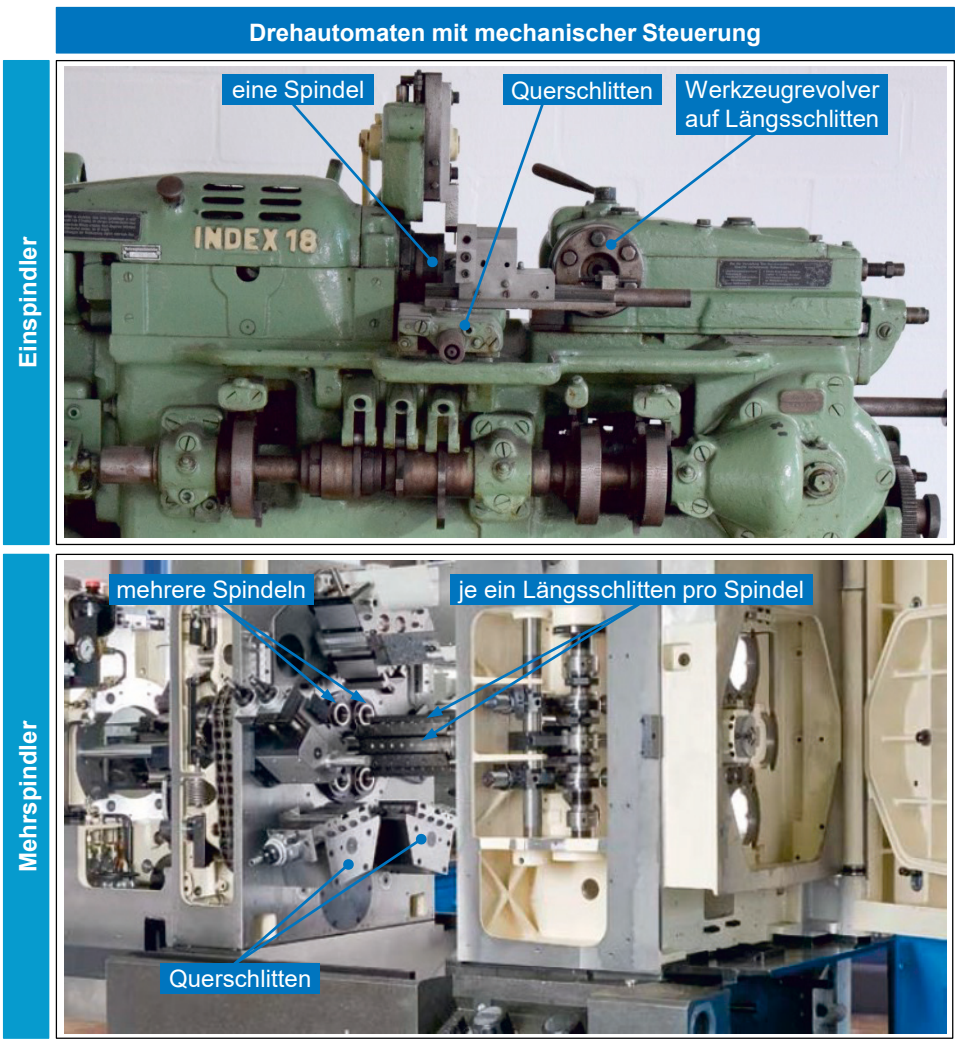


Bild 8.1 Drehautomaten mit mechanischer Steuerung; oben: Einspindler „Index 18", unten: Sechsspindler „SG 18" der Firma Schütte. Quelle: Alfred H. Schütte

trotz ihres Alters aufgrund ihrer hohen Robustheit weiterhin Verwendung.

Beim Mehrspindeldrehautomaten (Mehrspindler) wird gleichzeitig auf vier bis acht Spindeln je ein Werkstück bearbeitet. Dabei ist jeder Spindelposition ein Werkzeugsatz zugeordnet, der die Vorschübe bzw. Schnittbewegungen ausführt. Ist die Bearbeitung des Werkstücks in einer Spindelposition beendet, wird die Spindel durch Drehung der Spindeltrommel in die nächste Position bewegt. Dort wird das Werkstück mit dem Werkzeugsatz dieser Spindelposition weiterbearbeitet. Durch die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Teile auf den verschiedenen Spindeln eines Mehrspindlers können je nach Maschinentyp und Werkstück Stückzeiten von nur wenigen Sekunden erreicht werden. Der Mehrspindler besitzt daher ein Mehrfaches an Produktivität gegenüber dem Einspindler [WECK13].

Die Funktionen mechanisch gesteuerter Mehrspindler werden immer mehr durch NC-basierte Techniken ersetzt. Bei neuen Maschinen werden nur noch Nebenfunktionen mechanisch gesteuert. Die auf dem Markt verfügbaren Maschinen reichen von mechanisch gesteuerten Maschinen über Mischformen bis zu Maschinen, deren Bewegungsachsen ausschließlich NC-gesteuert sind. Im Gegensatz zu den Einspindelautomaten werden mechanisch gesteuerte Mehrspindelautomaten noch weiterentwickelt und in größeren Stückzahlen gefertigt. Trotz der beschränkten Flexibilität dieser Maschinen eröffnen angepasste Werkzeugsätze die Möglichkeit, ein breites Produktspektrum hochgenauer Bauteile in hoher Losgröße zu fertigen.

Eine Übersicht zur Historie der Ein- und Mehrspindler findet sich in [HEIS14].

8.1 Einspindeldrehautomat

Am Beispiel des Einspindeldrehautomaten (Bild 8.2) werden die verschiedenen Elemente einer mechanischen Steuerung vorgestellt.

In Bild 8.3 ist der Querschnitt durch den Revolverdrehautomaten aus Bild 8.2 mit den verschiedenen Elementen der mechanischen Steuerung in der Vorderansicht skizziert. Der Hauptantrieb im Bettsockel enthält zwei Wechselradstufen, die manuell gewechselt werden können. Eine der Stufen dient der Variation der Spindeldrehzahl. Mittels der anderen Stufe wird die Drehrichtung geändert und der Drehzahlunterschied zwischen Rechts- und Linkslauf für den Vorschub bzw. den Rückschub beim Gewindeschneiden eingestellt. Mit Ketten werden die Bewegungen über die Schaltkupplungen für den Rechts- bzw. Linkslauf auf die Arbeitsspindel übertragen.

Bild 8.4 zeigt den Aufbau des Getriebes in der Draufsicht von Bild 8.2. Auf der Hauptsteuerwelle sind Kurvenscheiben und Nockenscheiben angebracht, erstere steuern die Bewegung des Werkzeuglängs- und Werkzeugplanschlittens, letztere schalten mit Nocken Schnellschaltkupplungen (vgl. Bild 8.5), die schnell ablaufende Hilfsfunktionen initiieren. Die Bewegung der langsam laufenden Hauptsteuerwelle wird von der schnell laufenden Hilfssteuerwelle über Wechselräder abgeleitet, die so ausgelegt sind, dass eine Umdrehung der Hauptsteuerwelle der Bearbeitungszeit eines Werkstücks entspricht.

Der Zeitpunkt der Initiierung der verschiedenen Steuer- und Schaltfunktionen wird von der Lage der Nocken auf den Nockentrommeln, die auf der Hauptsteuerwelle angebracht

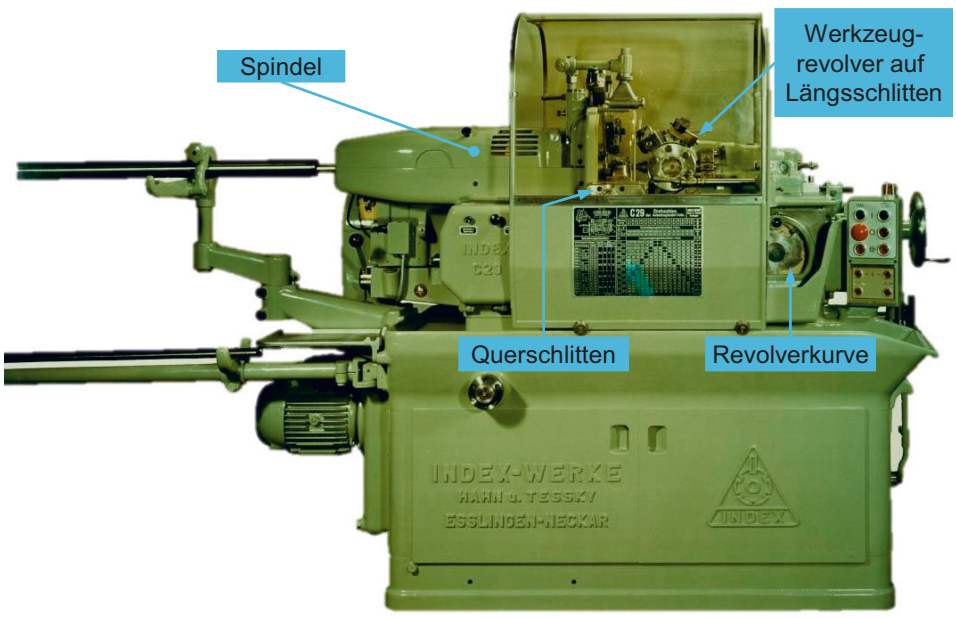


Bild 8.2 Einspindeldrehautomat „Index C29". Quelle: INDEX-Werke

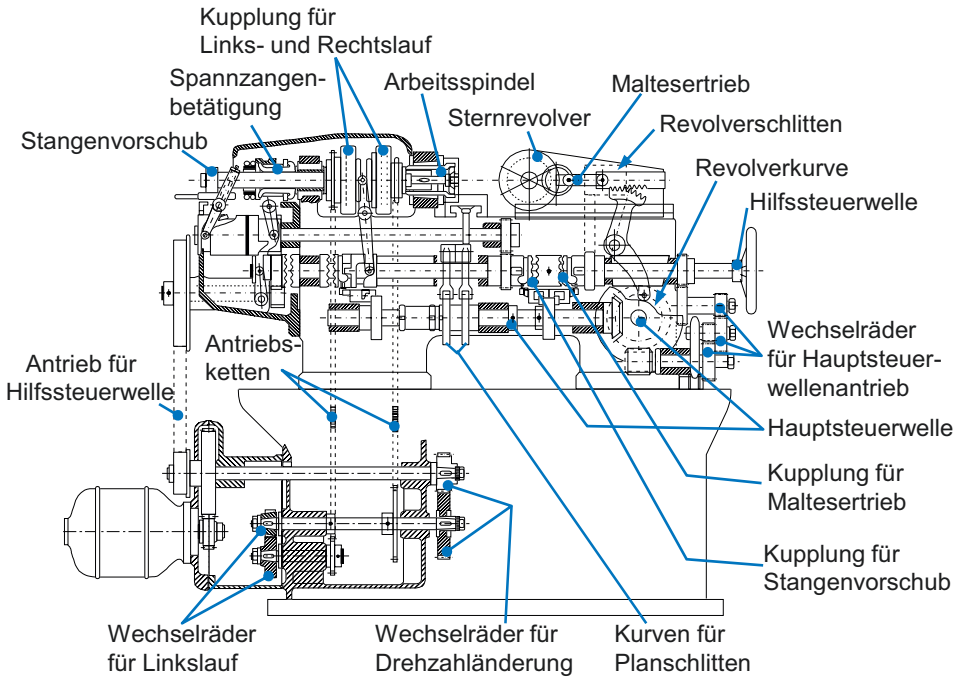


Bild 8.3 Antrieb und mechanische Steuerung des Revolverdrehautomaten (Seitenansicht). Quelle: INDEX-Werke

8

sind, bestimmt. Die Hauptsteuerwelle besteht aus zwei Wellenzügen die senkrecht aufeinander stehen und über einen Kegeltrieb gekoppelt sind. Die in Bild 8.4 vertikal eingezeichnete Komponente (2) steuert über die Revolverkurve den Längsvorschub des Revolvers, die horizontale Komponente (1) über die Kurvenscheibe für den Querschlitten den Planvorschub.

Die schnell laufende Hilfssteuerwelle wird vom Hauptantrieb über eine Riemenscheibe angetrieben, Bild 8.3 und Bild 8.4. Auf der Hilfssteuerwelle sind die bereits oben erwähnten schnell schaltenden Klauenkupplungen angebracht, die im ausgelösten Zustand die Kurventrommeln für die schnellen Schalt- und Hilfsfunktionen antreiben. Zu diesen Funktionen gehören beispielsweise Stangenvorschub, Werkstückspannung, Einschwenken von Anschlägen, Änderung der Drehzahl und die Maltesertriebschaltung für die Weiterschaltung des Werkzeugrevolvers.

Bild 8.5 zeigt die für die Schaltfunktionen der Hilfssteuerwelle eingesetzte Schnellschaltkupplung. Um die Kupplung auszulösen, wird der Schaltstift (5) über Gestänge

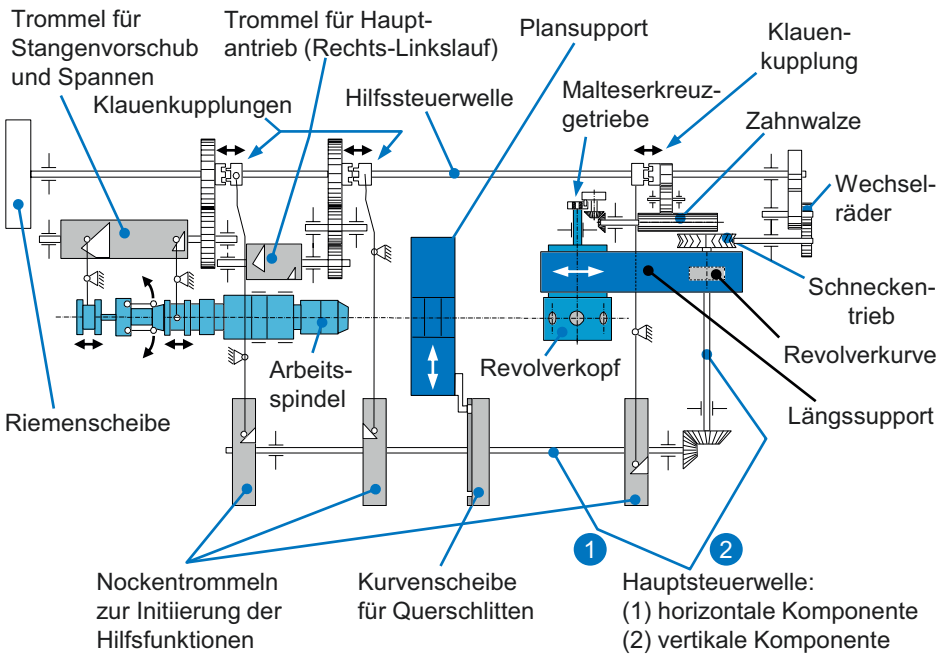


Bild 8.4 Getriebeschema eines mechanisch gesteuerten Drehautomaten mit Hilfs- und Hauptsteuerwelle (Draufsicht). Nach INDEX-Werke

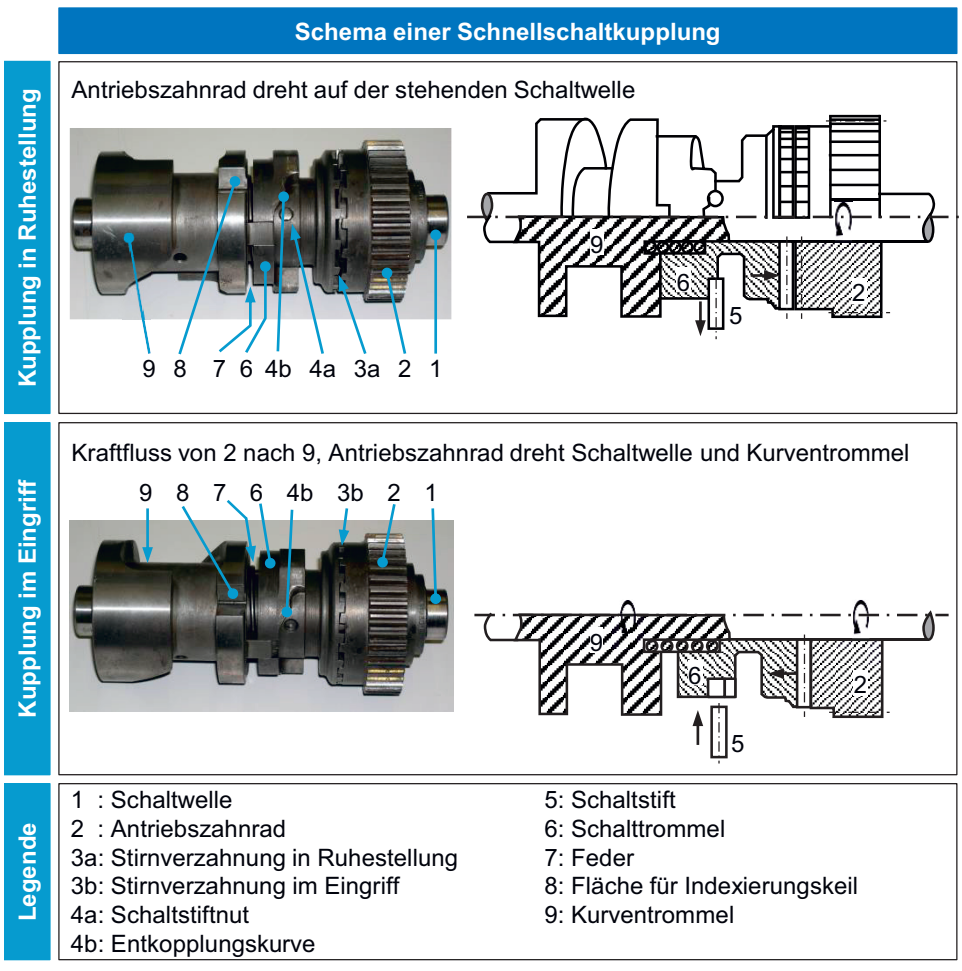
aus der Nut (4a) der Schalttrommel (6) herausgezogen. Die Schalttrommel, die in Drehrichtung mit der Kurventrommel (9) formschlüssig gekoppelt ist, wird über eine vorgespannte Feder axial gegen das auf der Kurventrommelwelle kontinuierlich umlaufende Antriebszahnrad (2) gedrückt. Über die Stirnverzahnung, die sich auf dem umlaufenden Zahnrad und der Schalttrommel befindet, wird ein Formschluss zwischen den beiden Elementen hergestellt. Das erforderliche Moment zum Antrieb der Kurventrommel wird nun vom Antriebszahnrad (2) über die Schalttrommel (6) auf die Kurventrommel (9) übertragen. Kurze Zeit nach der Initiierung der Schaltfunktion wird der Schaltstift (5) wieder radial vorgefahren. Nach der Ausführung der Schaltfunktion, d. h. nach einer bzw. einer halben Umdrehung der Hilfssteuerwelle, wird die Schalttrommel vom Indexbolzen über die Entkopplungskurve (4b) axial vom Antriebszahnrad weggezogen. Der Kraftfluss ist wieder unterbrochen.

Bild 8.6 zeigt die Hauptsteuerwelle des Einspindeldrehautomaten aus Bild 8.2. Rechts im Bild sind die Kurvenscheiben mit den Rollenhebeln für die Bewegung der vier Planschlitten zu sehen. Auf dem linken Teil der Hauptsteuerwelle befinden sich drei Nockenscheiben mit den Initialnocken und den Übertragungsgestängen für die Betätigung der Schnellschaltkupplungen für Schaltfunktionen wie Revolverweiterschaltung, Stangenvorschub, Spannen des Werkstücks und Rechts- oder Linkslauf der Spindel.

Als Beispiel für eine von der Hilfssteuerwelle angetriebene Nebenbewegung ist in den folgenden Bildern das Schalten des Werkzeuglängsrevolverkopfes dargestellt. Bild 8.7 und Bild 8.8 zeigen das Revolverschaltgetriebe und die Phasen des Ablaufs einer Revolverschnellschaltung.

Bild 8.7 veranschaulicht den Schaltablauf des Revolverkopfes. Ein Nocken auf der Nockenscheibe der Hauptsteuerwelle rückt über Hebel die Klauenkupplung für das Malteserkreuzgetriebe auf der Hilfssteuerwelle ein, die hierdurch genau eine Umdrehung ausführt. Vor Betätigung der Kurbel (1) ist der Getriebezug noch in gestreckter Stellung und der Revolverkopf indexiert, sodass der Schlitten über den Abtasthebel und die Zahnstange der Kontur der Kurvenscheibe folgt. Eine starke Feder zieht den Schlitten nach hinten und sorgt für die exakte Anlage der Abtastrolle an der Kurvenscheibe. Bei Betätigung der Kurbel (2) verkürzt sich die Distanz zwischen Zahnstange und Malteserkreuz, sodass die Feder den Schlitten bis zu seiner hintersten Stellung

Bild 8.5 Schema einer Schnellschaltkupplung



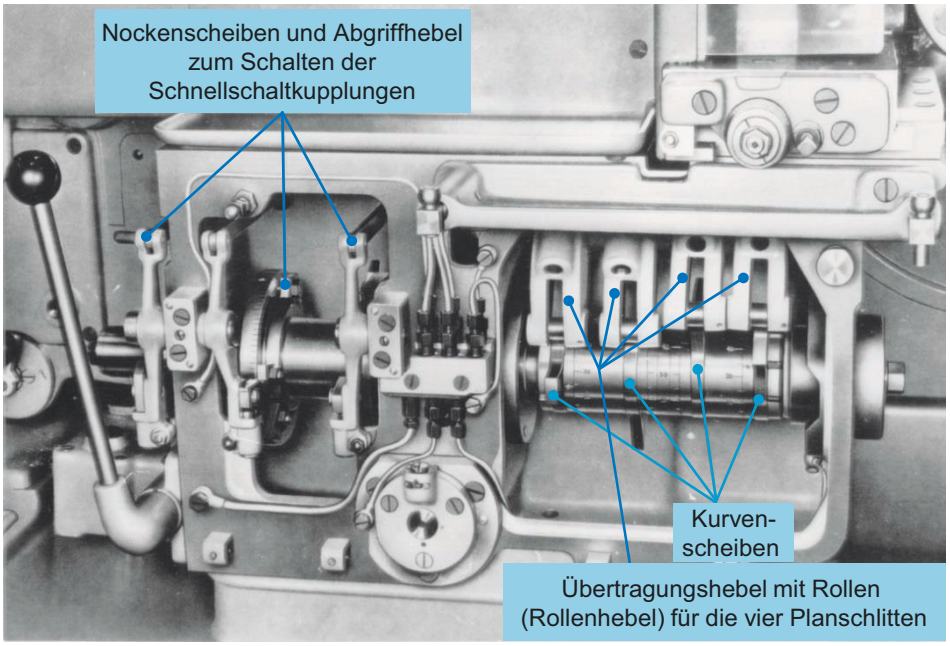


Bild 8.6 Hauptsteuerwelle eines Drehautomaten mit Planschlitten-kurven und Nockenscheiben. Quelle: INDEX-Werke

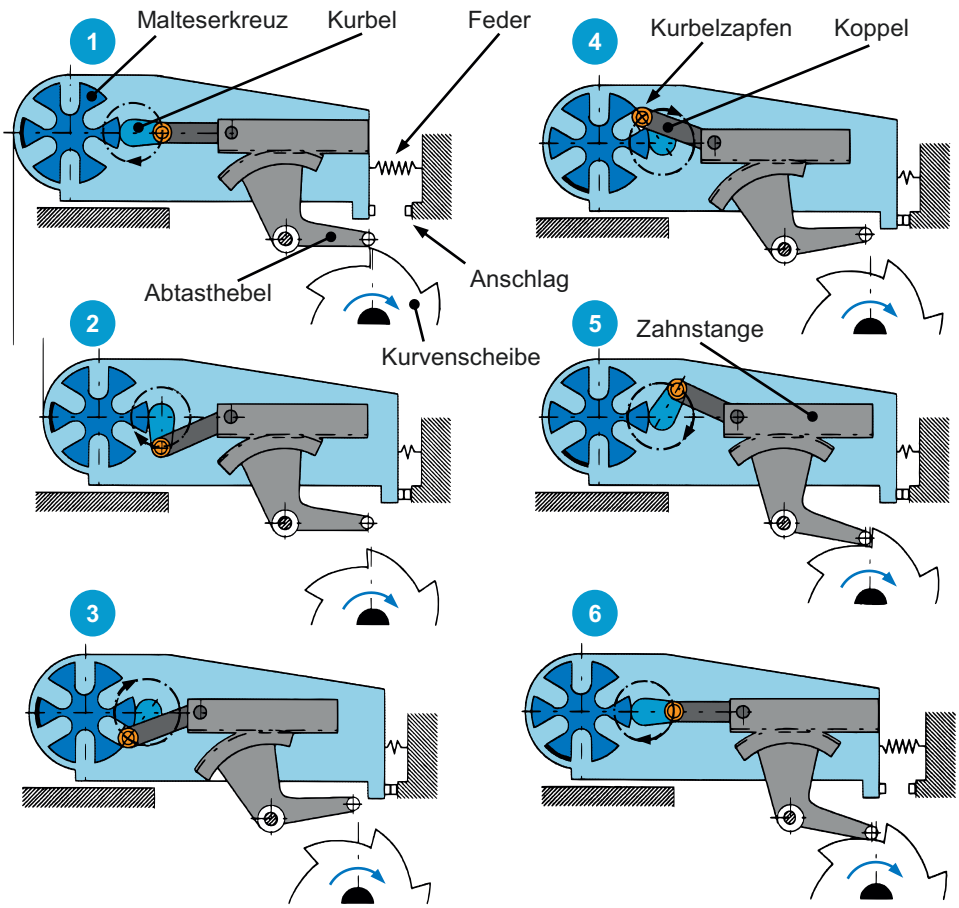


Bild 8.7 Revolverkopf-Schnellschaltung des Drehautomaten aus Bild 8.2. Nach INDEX-Werke

gegen einen Anschlag zurückzieht und der Abtasthebel angehoben wird. In dieser Stellung schaltet die Kurbel das Malteserkreuz um eine Teilung weiter (3). Auf diese Weise können Niveausprünge auf der Scheibe überbrückt werden. Nach dem Schalten des Revolverkopfes (4) wird mit der Kurbelbewegung zunächst wieder der Abtasthebel an die Kurvenscheibe gedrückt (5). Diese hat sich in der Zwischenzeit kontinuierlich um einen kleinen Winkel bis zum Beginn der nächsten Kontur weitergedreht. Gestützt auf die Kurvenscheibe drückt die Kurbel in der letzten Phase (6) den Schlit-

ten gegen die Federkraft nach vorn. In der gestreckten Stellung der Kurbel wird dann der Revolverkopf mit einem Indexbolzen blockiert (vgl. ◘ Bild 8.8), der über die Kurven neben dem Kegelrad geschaltet wird. Im indexierten Zustand folgt der Schlitten wieder ausschließlich der Kontur der Kurvenscheibe für die nächste Operation.

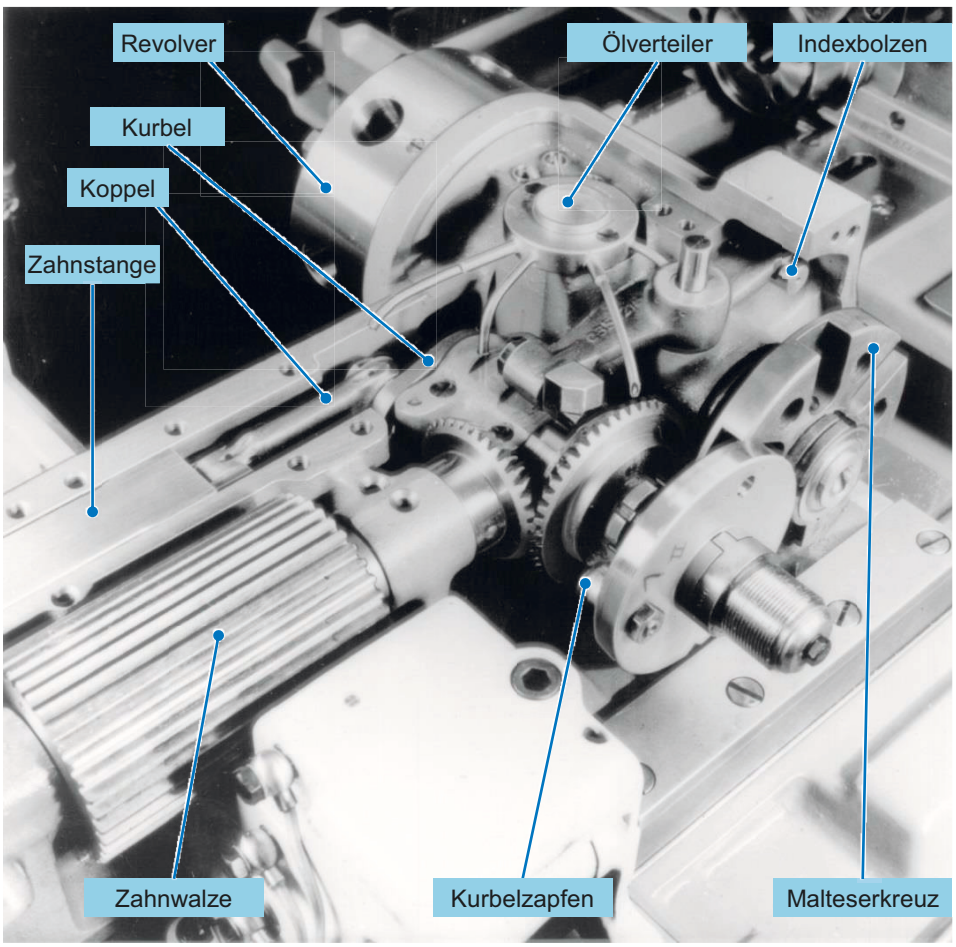
Das geöffnete Schaltgetriebe ist in ◘ Bild 8.8 zu sehen. Im vorderen Teil des Bildes ist die Scheibe mit dem Kurbelzapfen zu erkennen, der in das Malteserkreuz eingreift. Die Drehbewegung für die Kurbelwelle gelangt von der Hilfssteuerwelle über eine Klauenkupplung und ein Zwischenrad auf die Zahnradwalze, die auch bei Längsbewegung des Schlittens im Eingriff mit dem Zwischenrad bleibt (vgl. auch ◘ Bild 8.4). Von der Zahnradwalze verläuft der Kraftfluss über den Kegelradtrieb auf die Kurbel und den Kurbelzapfen des Maltesertriebes.

Am anderen Ende der Kurbelwelle ist in gleicher Winkellage die Kurbel zu sehen, die über die Koppel mit der Zahnstange in Verbindung steht. Ebenfalls auf der Kurbelwelle ist neben dem Kegelrad ein Nocken angeordnet, der über einen Hebel den Indexbolzen anhebt bzw. diesen in den Werkzeugrevolver einrasten lässt. In moderneren Konstruktionen werden die schnell auszuführenden Hilfsfunktionen zum Teil elektromotorisch oder elektrohydraulisch ausgeführt, sodass die schnell laufende Hilfssteuerwelle entfallen kann. Die Steuerung erfolgt über eine mit der Hauptsteuerwelle synchron laufende Steuertrommel, die mit Hilfe positionierter Nocken und elektrischer Schalter die Steuerfunktionen zeitgerecht initiiert.

Ein anderer Weg, die einzelnen Steuerfunktionen entsprechend dem Arbeitsfortschritt einzuleiten, wird über einen Drehgeber realisiert, der auf der Hauptsteuerwelle angebracht ist (vgl. ▶ Kap. 2.3). Beim Erreichen bestimmter Winkel der Hauptsteuerwelle werden die einzelnen Funktionen, die der jeweilige Bearbeitungsplan verlangt, über elektrische oder andere Aktoren ausgeführt.

Kurvenscheibenberechnung

Die Arbeitsgenauigkeit eines kurvengesteuerten Automaten hängt wesentlich von der exakten Berechnung der Kurvenscheibenkontur ab. Am Beispiel des Drehteils in ◘ Bild 8.10 oben links, das von der Stange bearbeitet wird, soll im Folgenden die Revolverschlittenkurve für einen Einspindel-Drehautomaten (◘ Bild 8.2) mit sechsteiligem Revolver berechnet werden. Ausgehend von der Werkstückzeichnung in ◘ Bild 8.10 sind die folgenden Arbeitsschritte durchzuführen:



◘ **Bild 8.8** Revolver-Schaltgetriebe des Drehautomaten aus ◘ Bild 8.2. Nach INDEX-Werke

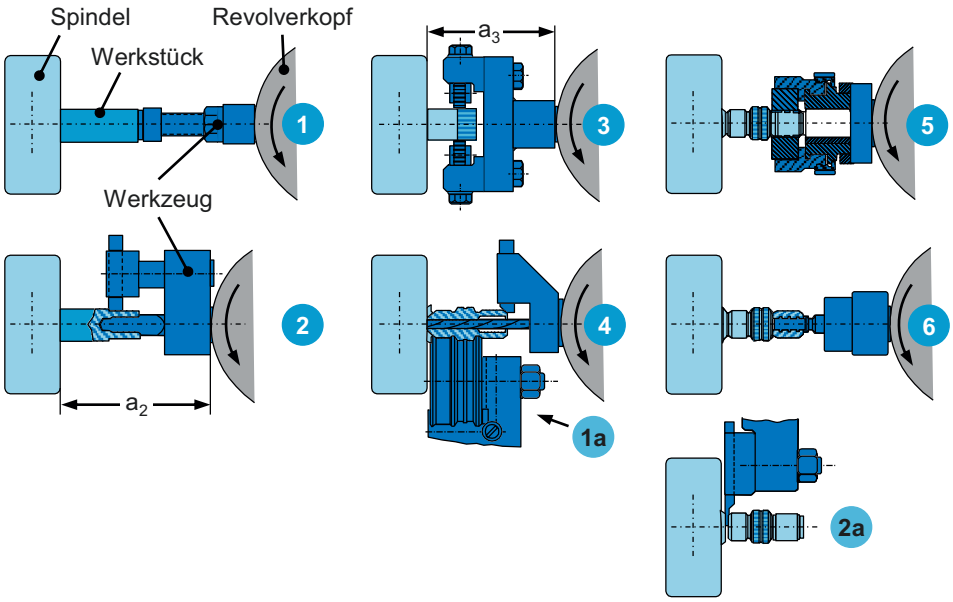


Bild 8.9 Werkzeugfolgeplan mit den zugehörigen Schlittenstellungen

- *Erstellen des Werkzeugfolgeplans:*
  Die Arbeitsfolge wird so festgelegt, dass das Werkstück mit den sechs verfügbaren Revolverstellungen und höchstens vier Planschlitten vollständig bearbeitet wird. Zur Senkung der Stückzeit sind möglichst mehrere Werkzeuge teils in Mehrfachwerkzeughaltern auf dem Revolverkopf und den Planschlitten in Eingriff zu bringen. Nach diesen Überlegungen zeichnet man den Werkzeugfolgeplan mit den zugehörigen Schlittenendstellungen entsprechend Bild 8.9 auf.
- *Erstellen eines Kurvenberechnungsblatts:*
  Ist die Werkzeugfolge nach Überprüfung der Kollisionsfreiheit festgelegt, steht auch die Folge der Arbeitsgänge und Schaltfunktionen fest. Man trägt diese Folge getrennt nach Revolver- und Planschlitten in die Zeilen eines vorbereiteten Berechnungsblatts ein, Bild 8.10. Die Spalten dienen zum Eintragen aller von den Arbeitsgängen abhängigen Kurvenberechnungsdaten.
- *Bestimmen der Arbeitsspindeldrehzahlen, Wege und Vorschübe:*
  Die erforderliche Spindeldrehzahl n ermittelt man aus den in Werkstofftabellen empfohlenen Schnittgeschwindigkeit ν und dem jeweils größten Drehdurchmesser d_{max} nach der Gleichung), da die Drehzahl während der Bearbeitung konstant bleibt.

$$n = \frac{v}{\pi \cdot d_{max}} \tag{8.1}$$

Die Eintragung nimmt man im Kopfteil des Berechnungsblatts vor, Bild 8.10. Die Arbeitswege werden der Werkstückzeichnung entnommen. Um ein Anschneiden der Werkzeuge beim schnellen Vorziehen des Schlittens zu verhindern, schlägt man einen Sicherheitszuschlag von 0,5 mm auf und trägt die resultierenden Werte in Spalte 1 ein.
In Spalte 2 werden die benötigten Vorschubwerte F_i in mm/Umdrehung eingetragen, die von der verlangten Oberflächengüte, der Zerspanbarkeit des Werkstoffs, der Gewindesteigung, der Steifigkeit des Drehteils und des Werkzeughalters, sowie der gewünschten Standzeit, der Kühlung des Werkzeugs und der Leistung des Antriebsmotors abhängen. Diese Werte werden Richtwerttabellen entnommen.

- *Berechnung der Arbeitsspindelumdrehungen eines Arbeitsgangs:*
  Da die Kurvenscheibe zur Herstellung eines Werkstücks einmal umläuft und diese Drehung von der Arbeitsspindel abgeleitet wird, muss zur Bestimmung eines Kurvenabschnitts eines Arbeitsgangs die jeweils benötigte Anzahl der Spindelumdrehungen berechnet werden.
  Die für die weiteren Berechnungen benötigten und auf die Hauptzeit t_h entfallenden Umdrehungen U_h setzen sich aus den Anteilen U_{hi} der einzelnen Arbeitsgänge i zusammen (Spalte 3) und berechnen sich aus den Arbeitswegen l_i und den zugehörigen Vorschüben F_i, Gleichung (8.2).

$$U_h = \sum U_{hi} = \sum \frac{l_i}{F_i} \tag{8.2}$$

Für die Revolverschlittenkurve werden die Anteile der Planschlitten nicht berücksichtigt (Spalte 4), solange sie zeitparallel zu der Bearbeitungszeit des Revolverschlittens ausgeführt werden.

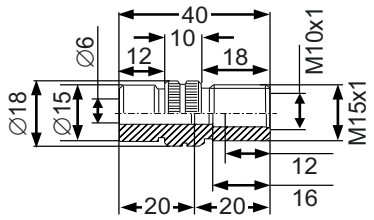
- *Verteilung der Kurvenabschnitte:*
  Die Kurvenscheibe ist in 360° / 100 = 3,6° Abschnitte unterteilt. Die Winkel auf der Scheibe werden daher in Hundertstel-Teilungen angegeben. Der gesamte Kurven-

Bild 8.10 Kurvenberechnungsblatt

Gg: Gewindegänge
(..): Werte bei der Berechnung nicht berücksichtigt

Umdrehungen für ein Werkstück:
(545 * 100) / 73 = 746

Stückzeit:
(60 * 746) / 3000 = 15s



Werkstoff: Rundmessing 18 DIN 1756 Ms 58		
Spindelumdrehungen/min	Drehen	3000
	Gewinde schneiden, außen	1500
	Gewinde schneiden, innen	1500
Schnittgeschwindigkeit in m/min	Drehen	170
	Gewinde schneiden, außen	70
	Gewinde schneiden, innen	47
Erforderliche Umdrehungen für ein Werkstück		746
Stückzeit in Sekunden		15

Arbeitsgang entsprechend dem Werkzeugfolgeplan				Arbeitsweg	Vorschub bei einer Umdrehung der Arbeitsspindel	Arbeitsspindelumdrehung		Hundertstel der Kurvenscheibe			
						für betreffenden Arbeitsweg	zu berücksichtigen	für Leerwege	für Arbeitswege	von	bis
	Spalte			1	2	3	4	5	6	7	8
Revolverkopf	1	Werkstoff-Anschlag						4		0	4
		Schalten des Revolverkopfes						4		4	8
	2	Bohren und Gewindeansatz überdrehen		23,5	0,15	157	157		21	8	29
		Schalten des Revolverkopfes						4		29	33
	3	Kordeln	vor	12	0,4	30	30		4	33	37
			zurück	12	0,6	20	20		2,5	37	39,5
		Schalten des Revolverkopfes						4		39,5	43,5
	4	Durchbohren und Ansatz drehen		22	0,125	175	175		23,5	43,5	67
		Schalten des Revolverkopfes						4		67	71
	5	Außengewinde	Aufschneiden	17Gg		34	34		4,5	71	75,5
			Rücklauf	17Gg		17	17		2,5	75,5	78
		Schalten des Revolverkopfes						4		78	82
	6	Innengewinde	Einschneiden	14Gg		28	28		3,5	82	85,5
			Rücklauf	14Gg		14	14		2	85,5	87,5
Planschlitten	1a	Vorderer Planschlitten Formdrehen		2,5	0,025	100	(100)		(13)	54	67
	2a	Hinterer Planschlitten Abstechen		4,5 1	0,075 0,1	60 10	60 10		8 1,5	87,5 95,5	95,5 97
Zugabe nach dem Abstechen								3		97	100
							545	27	73		

scheibenumfang entspricht der Summe aller Hundertstel für die Hauptzeiten H_h und für die Nebenzeiten H_n. Die Zahlen der Hundertstel für die Nebenzeiten sind in den Betriebshandbüchern der Hersteller fest vorgegeben, z. B. vier Hundertstel für eine Revolverkopfschaltung oder drei Hundertstel als Zugabe nach dem Abstechen (Spalte 5). Daher lässt sich die Zahl der verbleibenden Hundertstel für die Hauptzeit direkt aus der Gleichung (8.3) berechnen.

$$H_h = 100 - \sum H_{ni} \tag{8.3}$$

Da eine direkte Proportionalität zwischen den Hundertsteln der Kurvenscheibe und der Anzahl der Arbeitsspindelumdrehungen vorliegt, werden die Hundertstel H_{hi} für die einzelnen Hauptzeitanteile (Spalte 6) nach der Gleichung (8.4) bestimmt.

$$H_{hi} = H_h \cdot \frac{U_{hi}}{U_h}, \text{ z. B. } H_{h2} = 73 \cdot \frac{157}{545} = 21{,}09 \tag{8.4}$$

Aus diesen Angaben lässt sich dann in den Spalten 7 und 8 die Aufteilungsfolge bestimmen.

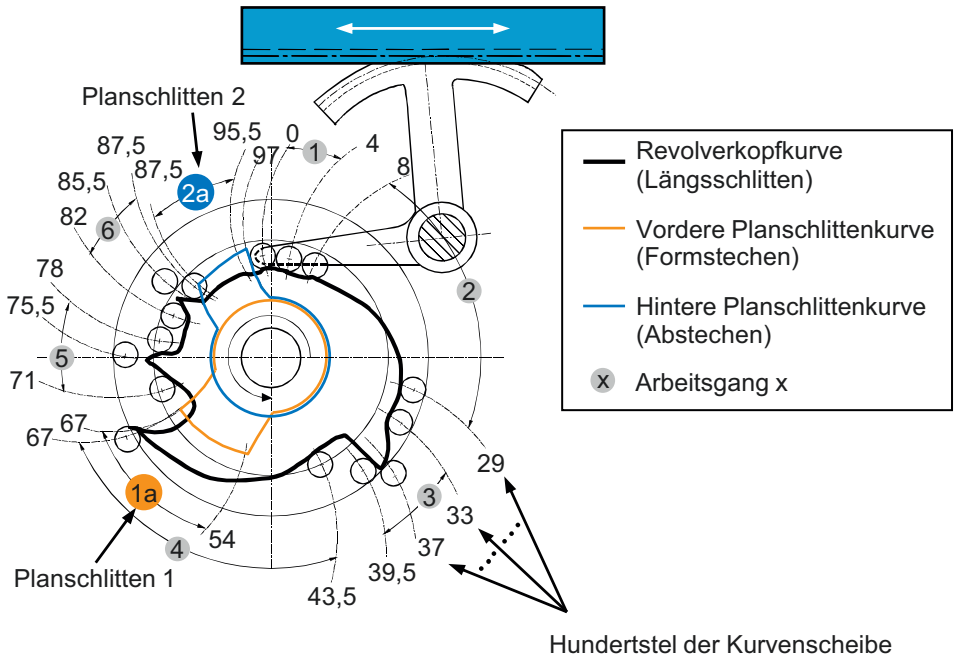


Bild 8.11 Kurvenscheiben für Längs- und Planschlitten

8

- *Berechnung der Stückzeit:*
  Die Gesamtzeit t_w für die Fertigung eines Werkstücks bzw. für eine Umdrehung der Kurvenscheibe gehört zu den Stammdaten im Kopfteil des Berechnungsblatts. Sie lässt sich aus der Gesamtanzahl der Arbeitsspindelumdrehungen U_{ges} nach den Gleichungen (8.5) und (8.6) berechnen.

$$t_w = \frac{U_{ges}}{n} \tag{8.5}$$

$$U_{ges} = U_h \cdot \frac{100}{H_h} \tag{8.6}$$

- *Konstruktion der Kurvenscheiben:*
  Für das Aufzeichnen werden üblicherweise vorgedruckte Kurvenblätter verwendet, die eine Abbildung der rohen Kurvenscheibe im Maßstab 1 : 1 enthalten. Die Einteilung in Hundertstel des Kreisscheibenumfangs wird durch Kreisbögen mit dem Radius des Abtasthebels dargestellt, Bild 8.11. Dazu wird der Punkt, welcher der vordersten Stellung des Revolverkopfes im Werkzeugfolgeplan entspricht ($a_3 = a_{min}$ in Bild 8.9), auf den Außendurchmesser der Rohscheibe gelegt. Unter Berücksichtigung des Rollenradius werden die Kurven entsprechend den im Werkzeugfolgeplan aufgezeichneten Stellungen des Revolverkopfes, den Arbeitswegen aus Spalte 1 und den errechneten Hundertstel-Teilungen in den Spalten 7 und 8 gezeichnet, Bild 8.10.

Die Gestaltung und Fertigung der Kurvenscheiben für Längs- und Planschlitten geschah früher nach Anriss der Kontur weitgehend manuell. Heute werden hierzu numerisch gesteuerte Fräsmaschinen genutzt. Mit Hilfe von Rechnerprogrammen werden sowohl die NC-Datensätze zum Steuern der Fräsmaschine als auch die zugehörigen Arbeitsplandaten für das auf dem Drehautomaten zu fertigende Werkstück automatisch generiert.

8.2 Mehrspindeldrehautomat

Bei einem Mehrspindeldrehautomat (Vier-, Sechs- oder Achtspindler) werden die Werkstücke auf verschiedenen Spindeln der Maschine gleichzeitig bearbeitet, Bild 8.12. Entsprechend der Arbeitsfolge sind die Werkzeugsätze auf die einzelnen Spindelpositionen verteilt. Somit wird das gleichzeitige Abarbeiten mehrerer Bearbeitungsschritte an den Werkstücken ermöglicht. Die Anzahl der in der Maschine maximal gleichzeitig bearbeitbarer Werkstücke entspricht der Spindelanzahl. Bei einer Aufteilung der Arbeitsgänge auf mehrere Spindelpositionen ist nach jedem Arbeitstakt ein Werkstück fertig bearbeitet, und ein neues Rohteil wird eingelegt bzw. Stangenmaterial wird zugeführt. Im Gegensatz zu Einspindeldrehautomaten, bei denen der Werkzeugrevolver nach jedem Arbeitsgang weitergeschaltet wird, werden bei Mehrspindlern die Spindeln in der Spindeltrommel mit den eingespannten Werkstücken um eine Teilung in die nächste Spindelposition weitergeschaltet. Die auf mehrere Positionen verteilten Werkzeuge verbleiben am Ort und führen nur die Vorschubbewegungen aus.

Hierzu sind alle Werkzeugschlitten für die Längsbearbeitung (Längsschlitten) auf dem Werkzeugträgerblock

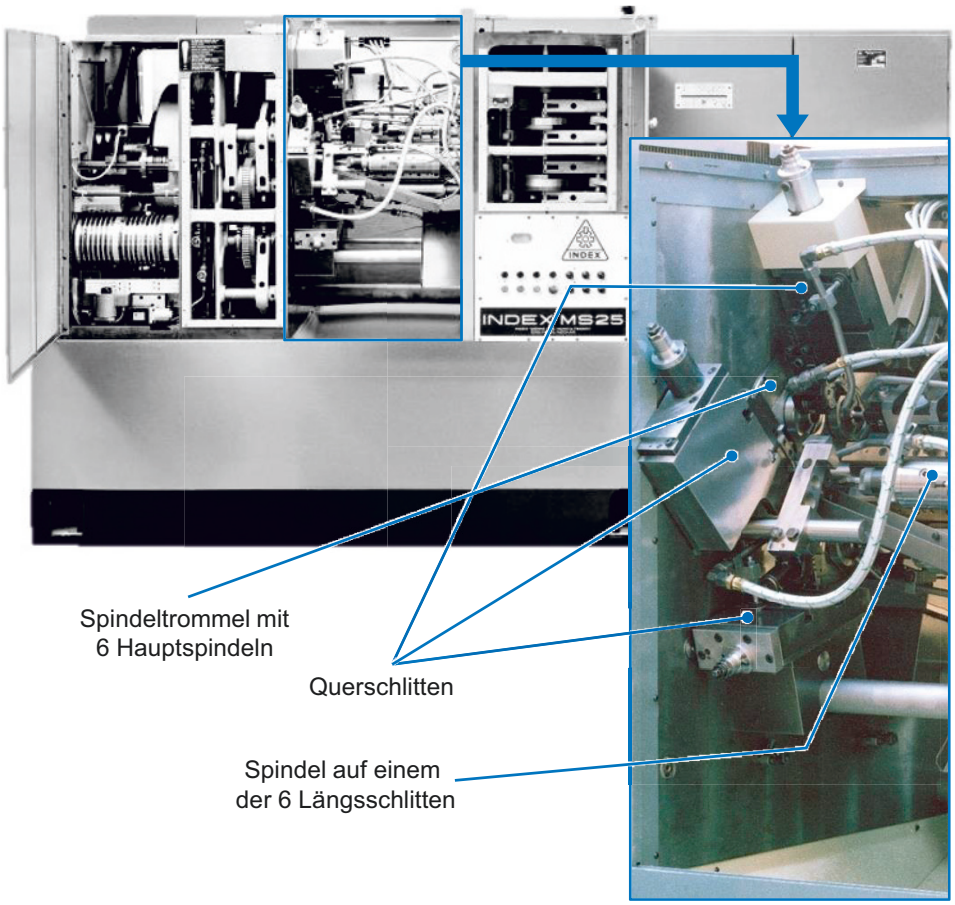


Bild 8.12 Mechanisch gesteuerter Sechsspindler. Nach INDEX-Werke

(Längsbearbeitungsblock) untergebracht, welche unabhängig voneinander über separate Kurvenscheiben anzusteuern sind. Für die Planbearbeitung sind um jede Spindelposition ein oder mehrere Werkzeugschlitten mit entsprechenden Werkzeughaltern oder Sonderwerkzeuge wie Tangential- oder Radial-Gewinderolleinrichtungen, Querbohreinrichtungen, Greifeinrichtungen, Profildreheinrichtungen, usw. angeordnet.

Sind bei einfachen Werkstücken laut Arbeitsplan weniger Arbeitstakte erforderlich als Bearbeitungsstationen vorhanden sind, lassen sich bei mehrfach gleicher Bestückung der den Spindelpositionen zugeordneten Werkzeugträgern entsprechend viele Werkstücke mit jedem Takt fertigstellen. Werden beispielsweise zur Fertigung eines Bauteils nur drei Bearbeitungsstationen benötigt, so können bei doppelter Werkzeugbestückung eines Sechsspindlers zwei Bauteile pro Arbeitstakt hergestellt werden. Dazu werden an den Spindelpositionen 1 bis 3 die gleichen Werkzeuge eingerichtet wie an den Spindelpositionen 4 bis 6, sodass jeweils zwei gleiche Fertigungsschritte parallel für die beiden Werkstücke ausgeführt werden.

Ein Beispiel zur Fertigung eines komplexen Bauteils auf einem Sechsspindler zeigt Bild 8.13. Zur Herstellung dieses Bauteils müssen folgende Fertigungsverfahren durchlaufen werden: Formdrehen und Bohren, Gewindebohren, Vierkantfräsen, lagerichtiges Querbohren, Schrägschlitzen und Abstechen. Die Fertigung des Einstelllagers wird entsprechend der vorhandenen Stationen in sechs Schritten mit insgesamt zehn Bearbeitungsoperationen vorgenommen, davon vier mit Plan- und sechs mit Längsschlitten, Tab. 8.1. Die Komplettbearbeitungszeit für das Einstelllager beträgt 2,1 Sekunden.

In Bild 8.14 ist ein Schnitt durch einen Mehrspindelautomaten (Sechsspindler) mit Getriebezügen für Spindelantrieb, Vorschubbewegungen sowie Steuerfunktionen skizziert. Man erkennt die Spindeltrommel mit der Hauptantriebswelle, die durch den Arbeitsraum und durch die Mitte der Spindeltrommel verläuft, drei Planbearbeitungsschlitten sowie die Einheiten für Stangenvorschub und Werkstückspannung. Ebenso ist der Getriebeaufbau für die Antriebs- und Steuerungsfunktionen des Automaten dargestellt. Die Längsbearbeitungsschlitten, die im Arbeitsraum um die Zentralwelle angeordnet sind, sind in Bild 8.14 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Alle Bewegungen für die Arbeitsspindeln (Haupt- und Zusatzspindeln), Vorschubschlitten und Hilfseinrichtungen werden vom zentralen Hauptantriebsmotor abgeleitet.

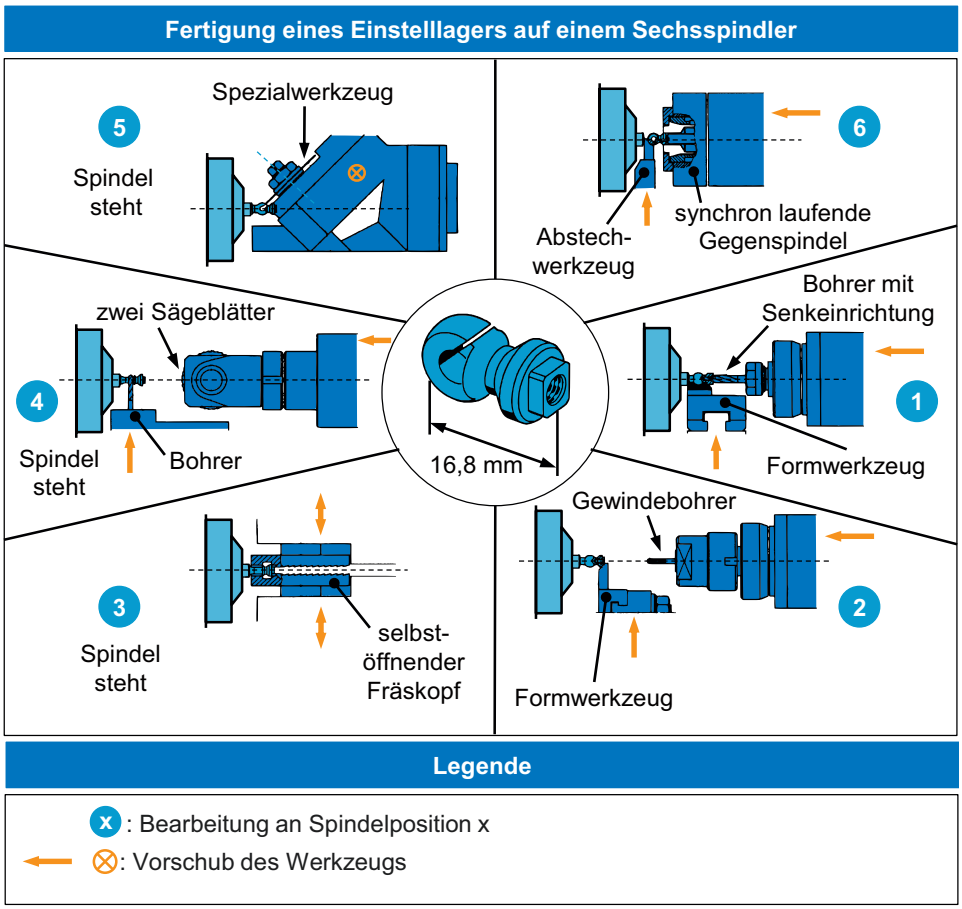


Bild 8.13 Fertigung eines Einstelllagers auf einem Sechsspindler. Nach INDEX-Werke

8

Bearbeitung an Spindelposition	aktiver Schlitten	Arbeitsgang
1	Planschlitten 1	Außenkontur mit erstem Formwerkzeug bearbeiten
1	Längsschlitten 1	Vorbohrung für Gewinde herstellen und senken
2	Planschlitten 2	Außenkontur mit zweitem Formwerkzeug bearbeiten
2	Längsschlitten 2	Gewinde bohren
3 (Spindel steht)	Planschlitten 3	Zweiseitige Planflächenbearbeitung des Lagerkopfes und des Vierkants mit einem selbstöffnenden Fräskopf
4 (Spindel steht)	Planschlitten 4	Querbohren des Lagerkopfes
4 (Spindel steht)	Längsschlitten 3	Fertigstellung des Vierkants mit zwei angetriebenen Sägeblättern auf Abstand
5 (Spindel steht)	Planschlitten 5	Herstellung des schrägen Schlitzes mit einem Spezialwerkzeug (Winkelfräskopf)
6	Längsschlitten 4	Spannen des Werkstücks in der Synchroneinrichtung
6	Planschlitten 6	Fertigdrehen der Kugel und gleichzeitiges Abstechen des Einstelllagers mit Formwerkzeug in der Gegenspindel des Schlittens 6 und anschließendes Ausstoßen

Tab. 8.1 Arbeitsgänge zur Bearbeitung des Einstelllagers

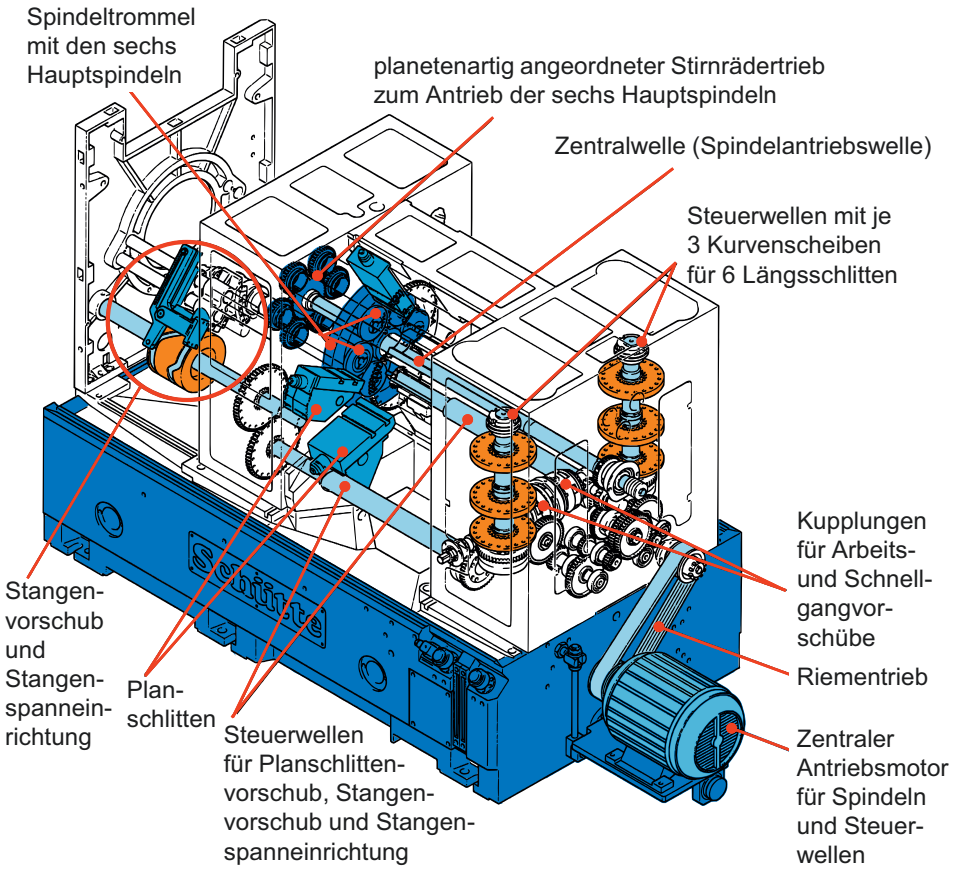


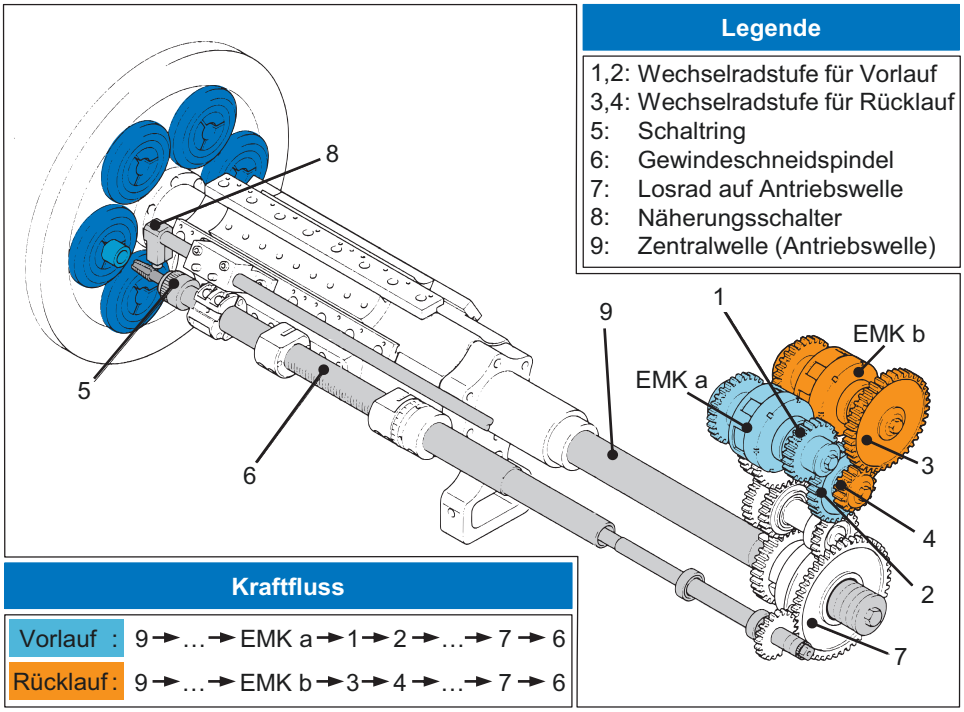
Bild 8.14 Schnitt durch einen Mehrspindelautomaten mit Getriebezügen für Spindelantrieb, Vorschubbewegungen sowie Steuerfunktionen. Nach Alfred H. Schütte

Der Antrieb der sechs Hauptspindeln erfolgt von der Riemenscheibe über aufsteckbare Wechselräder und einen planetenartig angeordneten Stirnrädertrieb auf alle sechs Hauptspindeln in der Spindeltrommel. Die beiden Steuerwellen werden von der Riemenscheibe über ein Wechselradgetriebe, Schalt- und Sicherheitskupplungen sowie Schneckenräder angetrieben. Die Steuerwellen üben die Funktionen von Haupt- und Hilfssteuerwellen aus. Sie führen pro Arbeitstakt eine volle Umdrehung aus, die sich aus einem langsam laufenden Anteil für die Arbeitsvorschubbewegungen sowie einem schnell laufenden Anteil für die Hilfsbewegungen und für den Rücklauf der Schlitten zusammensetzt. Für den Arbeitsgang ist das Wechselradgetriebe durch die Arbeitsgangkupplung eingeschaltet. Die schnell ablaufenden Hilfsfunktionen wie Materialvorschub, Spannklauenbetätigung und Spindeltrommelschaltung werden durch Schalten der Eilgangkupplung initiiert. Für den eigentlichen Arbeitsbereich stehen ca. 160°, für die Hilfsfunktionen ca. 200° der Steuerwellendrehung zur Verfügung.

Von der Zentralwelle (9) werden auch die Drehbewegungen für Zusatzspindeln auf den Längsschlitten über Wechselräder, z. B. für angetriebene Spindeln zum Schnellbohren, Reiben und Gewindeschneiden, abgeleitet, ◘ Bild 8.15. Die Funktionsweise wird hier am Beispiel einer Gewindeschneidspindel erläutert. Die nötigen Drehzahldifferenzen zwischen der Hauptspindel und der Gewindeschneidspindel (6) werden von dem dargestellten Getriebezug erzeugt. Dabei sind zum Gewindeschneiden für Vor- und Rücklauf des Werkzeugs zwei Elektromagnetkupplungen (EMK) auf den Achsen der Zahnräder (1) und (3) über den Näherungsschalter (8) schaltbar. Die Drehung der Zentralwelle (9) wird dabei über diverse Zahnräder an die beiden Elektromagnetkupplungen und von dort über weitere Zahnräder an die Gewindeschneidspindel (6) übertragen. Durch die Wechselräder (1) und (2) wird dabei der Vorlauf mit EMK a, und durch die Wechselräder (3) und (4) der Rücklauf mit EMK b eingeschaltet. Beim Schneidvorgang eines Rechtsgewindes (Vorlauf) dreht die Gewindeschneidspindel entsprechend der Steigung des zu erzeugenden Gewindes langsamer als die Hauptspindel, beim Rücklauf schneller. Der Antrieb der Gewindeschneidspindel erfolgt über ein auf der Zentralwelle (9) sitzendes Losrad (7), welches mehrere Gewindeschneideinrichtungen antreiben kann. Der Kraftfluss von der Zentralwelle (9) zur Gewindeschneidspindel (6) ist in ◘ Bild 8.15 unten links dargestellt.

In ◘ Bild 8.16 ist die Stangenvorschub- und Spanneinrichtung entsprechend dem Ausschnitt von ◘ Bild 8.14 im Detail dargestellt. Diese Einrichtung ist nur an den Spindelpositionen vorgesehen, wo das Abstechen der fertigen Werkstücke erfolgt und der Materialvorschub erforderlich ist.

Zeichnung



Legende

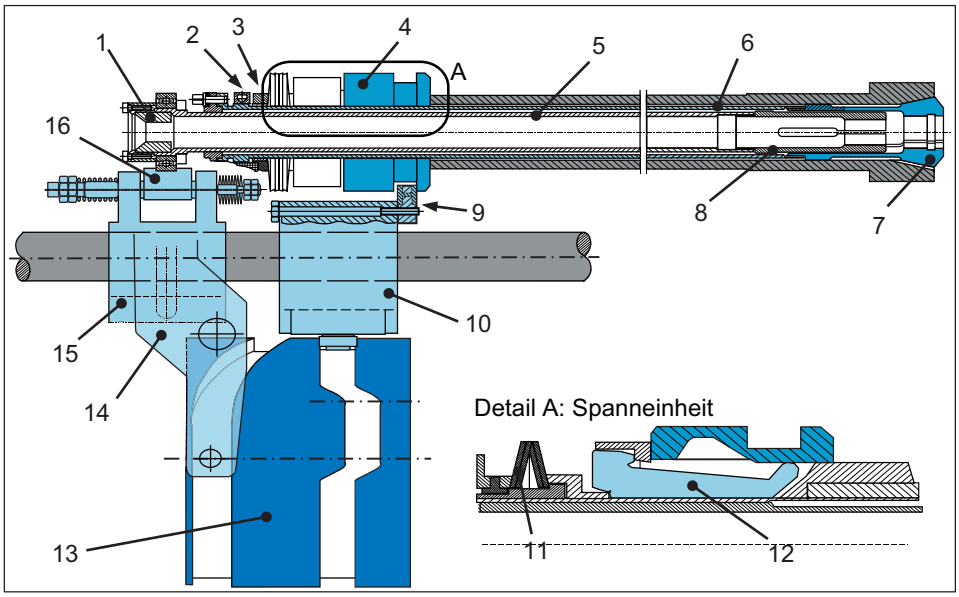
1,2: Wechselradstufe für Vorlauf
3,4: Wechselradstufe für Rücklauf
5: Schaltring
6: Gewindeschneidspindel
7: Losrad auf Antriebswelle
8: Näherungsschalter
9: Zentralwelle (Antriebswelle)

Kraftfluss

Vorlauf : 9 → … → EMK a → 1 → 2 → … → 7 → 6
Rücklauf : 9 → … → EMK b → 3 → 4 → … → 7 → 6

Bild 8.15 Getriebezug für Zusatzspindeln auf den Längsschlitten (hier Gewindeschneiden). Nach Alfred H. Schütte

Stangenvorschub- und Spanneinheit



Legende

1: Führungsring
2: Rastenmutter
3: Spannmutter
4: Spannmuffe
5: Vorschubrohr
6: Spannrohr (Linksgewinde)
7: Spannzange (Linksgewinde)
8: Vorschubzange (Rechtsgewinde)
9: Spannbacke
10: Spannschieber
11: Tellerfederpaket
12: Spannhebel
13: Kurventrommel
14: Vorschubkulisse
15: Vorschubschieber
16: Vorschubklappe

Bild 8.16 Stangenvorschub- und Spanneinheit. Nach Alfred H. Schütte

Werden bei doppelter Werkzeugbestückung zwei Bauteile pro Arbeitstakt gefertigt, ist die Materialvorschubeinrichtung ebenfalls doppelt vorhanden, da pro Arbeitstakt zwei Werkstücke benötigt werden.

Die betreffenden Spindeln schwenken durch die Schaltbewegung der Spindeltrommel mit der Spannmuffe (4) in die Spannbacke (9) bzw. mit dem Lager auf dem Führungsring (1) in die Vorschubklappe (16) ein. Nachdem ein Teil abgestochen ist, wird der Stangenanschlag zur Längenbestimmung des Rohteils im Arbeitsraum eingeschwenkt. Danach werden die Spannmuffe (4) und die Spannbacke (9) über den Spannschieber (10), der in die Kurve der Kurventrommel (13) eingreift, in Richtung der Spannzangen (7) gedrückt.

Durch diese Bewegung greift der Spannhebel (12) in die Spannmuffe, die Spannung des Tellerfederpakets (11) und die dadurch erzeugte Vorspannung zwischen Spindel und Spannzange (7) verringert sich und die Spannzange wird aus dem Spannkonus herausgeschoben. Da die Spannzange federnd ausgelegt ist, öffnet sie sich von selbst und gibt das Stangenmaterial frei. Über die Rasten- und Spannmutter ((2) und (3)) kann die genaue Position der Spannzange sowie die durch das Tellerfederpaket erzeugte Vorspannung eingestellt werden.

Über die zweite Kurve der Kurventrommel wird die Vorschubzange (8), also das innere Rohr, beim Stangenvorschub nach rechts verschoben. Sie ist hier in ihrer vorderen Endstellung abgebildet. Durch die federnde Anpresskraft der Vorschubzange wird das zugeführte Stangenmaterial umfasst und über Reibschluss bis zum Stangenanschlag vorgeschoben. Die Bewegung der Vorschubkulisse (14) wird dabei über den Vorschubschieber (15) und die Vorschubklappe (16) auf die Vorschubzange übertragen. Anschließend wird die Spannzange wieder gespannt, der Stangenanschlag aus dem Arbeitsraum geschwenkt und die Vorschubzange in Grundstellung zurückgefahren. Dabei gleitet die federnd angepresste Vorschubzange (8) auf dem Stangenmaterial um die im nächsten Zyklus wieder erforderliche Werkstückvorschublänge zurück. Während der Bearbeitung liegt die Stange im Führungsring (1) und der Spannzange auf.

Zum Weiterschalten der Spindeltrommel wird der in Bild 8.17 gezeigte Maltesertrieb eingesetzt. Dabei ist auf der mit der Steuerwelle umlaufenden Kurbel ein Planetenrad angeordnet, welches auf dem fest stehenden Stirnrad abrollt. Der auf dem Planetenrad exzentrisch angeordnete Bolzen läuft tangential in eine Nut des Malteserkreuzes ein und aus, die Kurbel dreht sich im Gegenuhrzeigersinn um 120° und das Malteserkreuz wird um 90° weitergedreht. Der Bolzen bewegt sich dabei entlang der skizzierten tripodenförmigen Bahn K. Diese Bewegung vermindert durch den reduzierten Ruck die dynamische Anregung bei Weiterschaltung der Spindeltrommel um 50 % im Vergleich zu einem konventionellen Maltesertrieb. Damit die bewegte träge Masse nicht

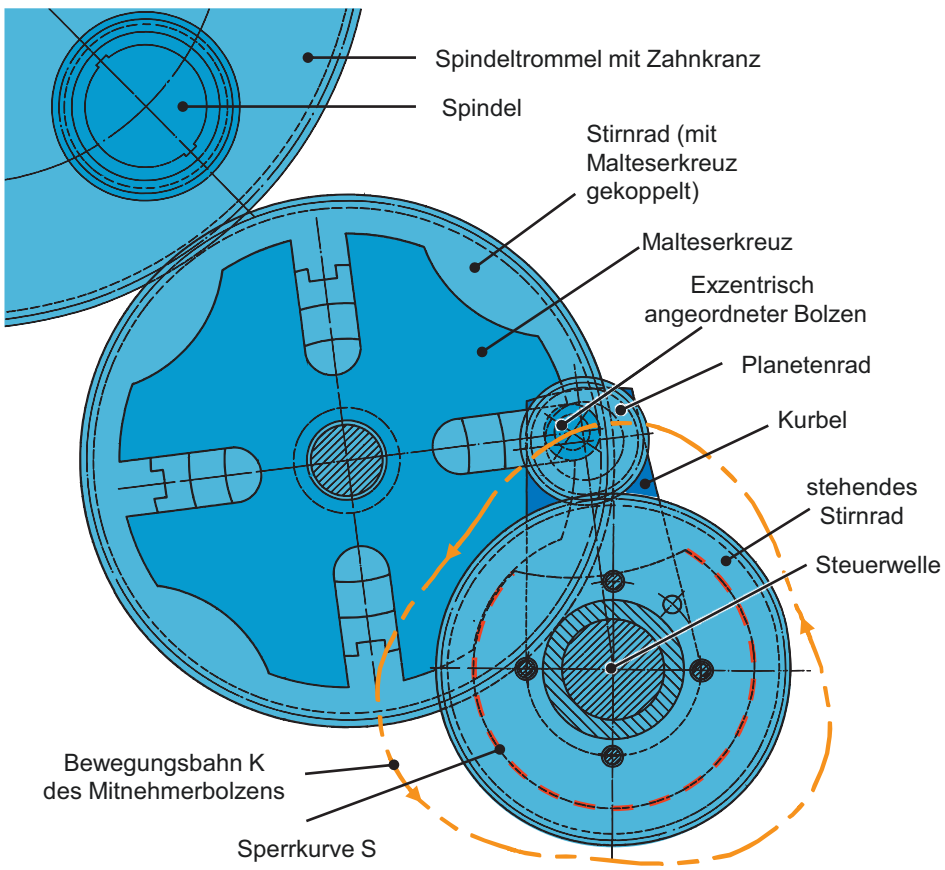


Bild 8.17 Schema der Spindeltrommelschaltung mit einem modifizierten Maltesertrieb. Nach Alfred H. Schütte

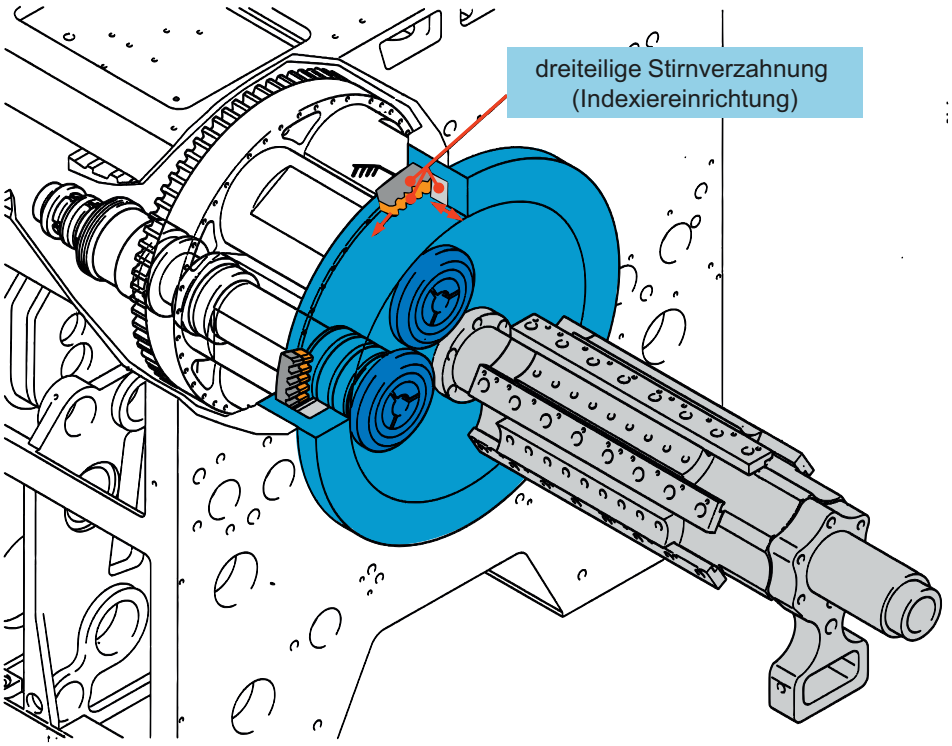


Bild 8.18 Spindeltrommelverriegelung mittels einer dreiteiligen Stirnverzahnung. Nach Alfred H. Schütte

allein über den Bolzen abgebremst wird, gibt es die sogenannte Sperrkurve S, die von dem konzentrischen Bereich der Kurbel gebildet wird. Nach dem Auslaufen des Bolzens aus einer Nut wird die Bewegung des Malteserkreuzes durch die Sperrkurve sanft abgefangen und sperrt anschließend die Drehung des Malteserkreuzes während des Arbeitsgangs, bis der Bolzen beim nächsten Umlauf wieder tangential in die nächste Nut einläuft. Durch das entsprechend gewählte Übersetzungsverhältnis $z = 2/3$ zwischen dem mit dem Malteserkreuz gekoppelten Stirnrad und der Verzahnung der Spindeltrommel wird die Spindeltrommel bei der 90°-Drehung des Malteserkreuzes um eine Spindelteilung (360°/6 = 60°) weitergeschaltet. Eine ausführliche Beschreibung zu Getrieben mit aussetzenden Bewegungen ist in [LICH53] zu finden.

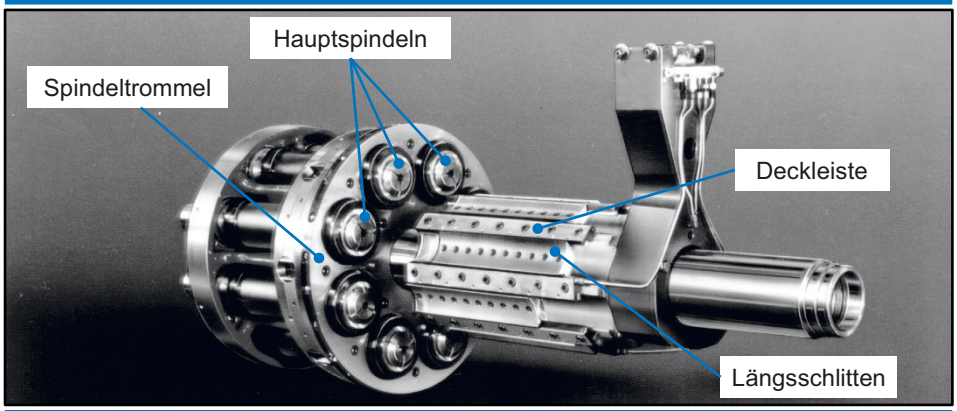
Auf der Spindeltrommel befindet sich die Indexiereinrichtung in Form einer dreiteiligen Stirnverzahnung, die die Spindeln nach der Weiterschaltung durch den Maltesertrieb genau in der nächsten Bearbeitungsposition fixiert, Bild 8.18. Der breite, stirnverzahnte Ring wird zur Positionierung in die beiden schmalen Ringe gedrückt und legt diese genau und spielfrei zueinander fest. Zur Weiterschaltung der Spindeltrommel wird der breite stirnverzahnte und durch eine Vielzahl von Federn angedrückte Ring durch einen Hebelmechanismus gegen die Federkraft axial aus der Verzahnung herausgehoben. Der innere schmale Ring, der an der Spindeltrommel befestigt ist, kann sich nun relativ zum äußeren am Spindelkasten befestigten Ring verdrehen. Ist die Spindeltrommel um eine Spindelteilung weitergedreht, bewegt sich der axial verschiebbare Ring zurück und positioniert die beiden schmalen Ringe wieder spielfrei zueinander.

Die sechs Schlitten für die Längsbearbeitung sind auf einem zentralen Block, wie in Bild 8.19 dargestellt, angeordnet und gleiten in Zylindersegmenten, deren Achsen mit denen der Drehspindeln genau fluchten. Deckleisten am Block verhindern eine Verdrehung der Schlitten. Der zentrale Block wird mit einem Haltearm am Antriebskasten oder am Längsbalken fixiert. Zur Montage der Werkzeughalter und Sondereinrichtungen sind in den Längsschlitten Gewindebohrungen vorgesehen.

In Bild 8.20 ist ein auf dem Längsschlitten (2) montierter Längsschlittenantrieb dargestellt, der mit einem Werkzeug das Werkstück in der Spindel (1) bearbeitet. Die Drehbewegung der Kurvenscheibe (15) wird von der Kurvenrolle (14) des Kulissenhebels (12) auf die Druckstange (11) und weiter auf das Schubrohr (8) übertragen. Die Kurvenscheibe besitzt eine Außen- und Innenkurve zur beidseitigen Führung der Kurvenrolle, sodass sowohl Arbeits- als auch Rückzugsbewegungen übertragen werden. Begrenzt wird der Hub durch ein Anschlagstück (10) am Schubrohr und eine Anschlagschraube (9) im Maschinenständer. Die Arbeitslage des Werkzeuges wird über die beiden Klemmringe (5) und (7) grob eingestellt und über die Verstellschraube (6) ähnlich einer Mikrometerschraube fein justiert. Die Vorschubbewegung wird über die Schubstange (4) weiter auf den Klemmring (3) übertragen, der zum Einwechseln verschiedener Werkzeuge dient. Die Hublänge wird über die Lage des Koppelpunktes der Druckstange (11) in der Kulissennut (13) eingestellt und

Bild 8.19 Ansicht des Längsbearbeitungsblocks eines Mehrspindlers mit acht unabhängigen Längsschlitten. Nach Alfred H. Schütte

Ansicht des Längsbearbeitungsblocks eines Mehrspindlers mit acht unabhängigen Längsschlitten



Schnitt durch den Längsbearbeitungsblock

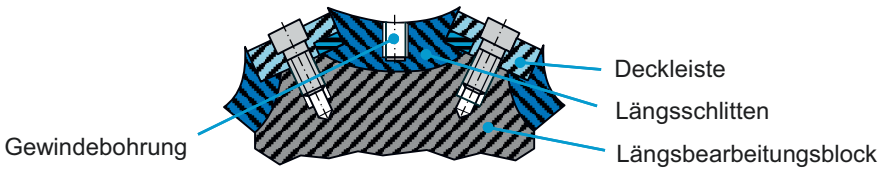
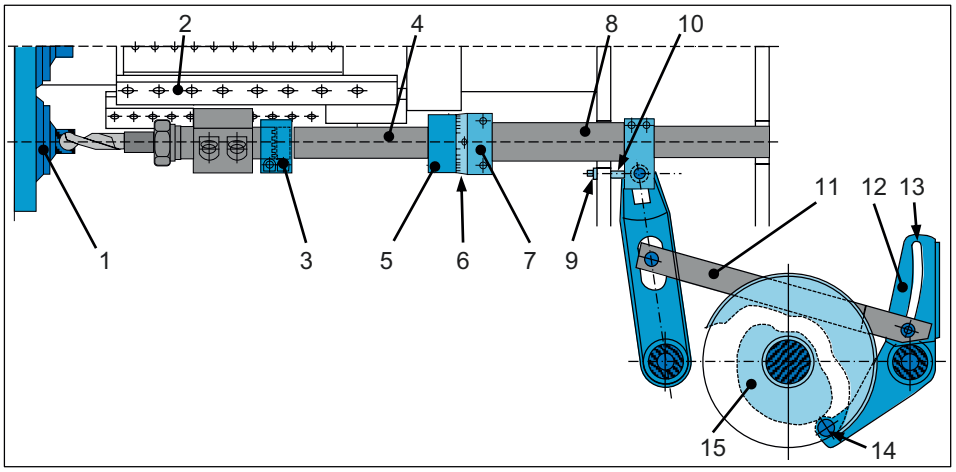


Bild 8.20 Schematische Darstellung des Längsschlittenantriebs. Nach Alfred H. Schütte

Schematische Darstellung des Längsschlittenantriebs



Legende

1: Drehspindel
2: Längsschlitten
3: Klemmring
4: Schubstange
5: Klemmring (Grobeinstellung)
6: Verstellschraube mit Skala (Feineinstellung)
7: Klemmring
8: Schubrohr
9: Anschlagschraube
10: Anschlagstück
11: Druckstange
12: Kulissenhebel
13: Kulissennut
14: Kurvenrolle
15: Kurvenscheibe mit Arbeits- und Rückzugskurve

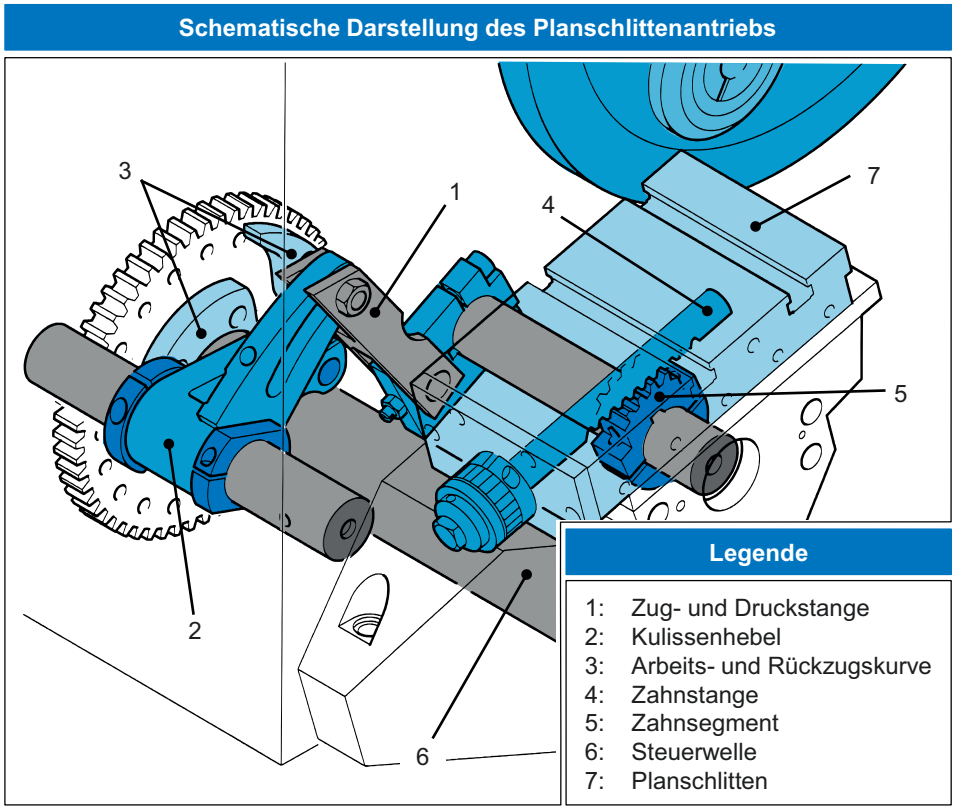


Bild 8.21 Schematische Darstellung des Planschlittenantriebs. Nach Alfred H. Schütte

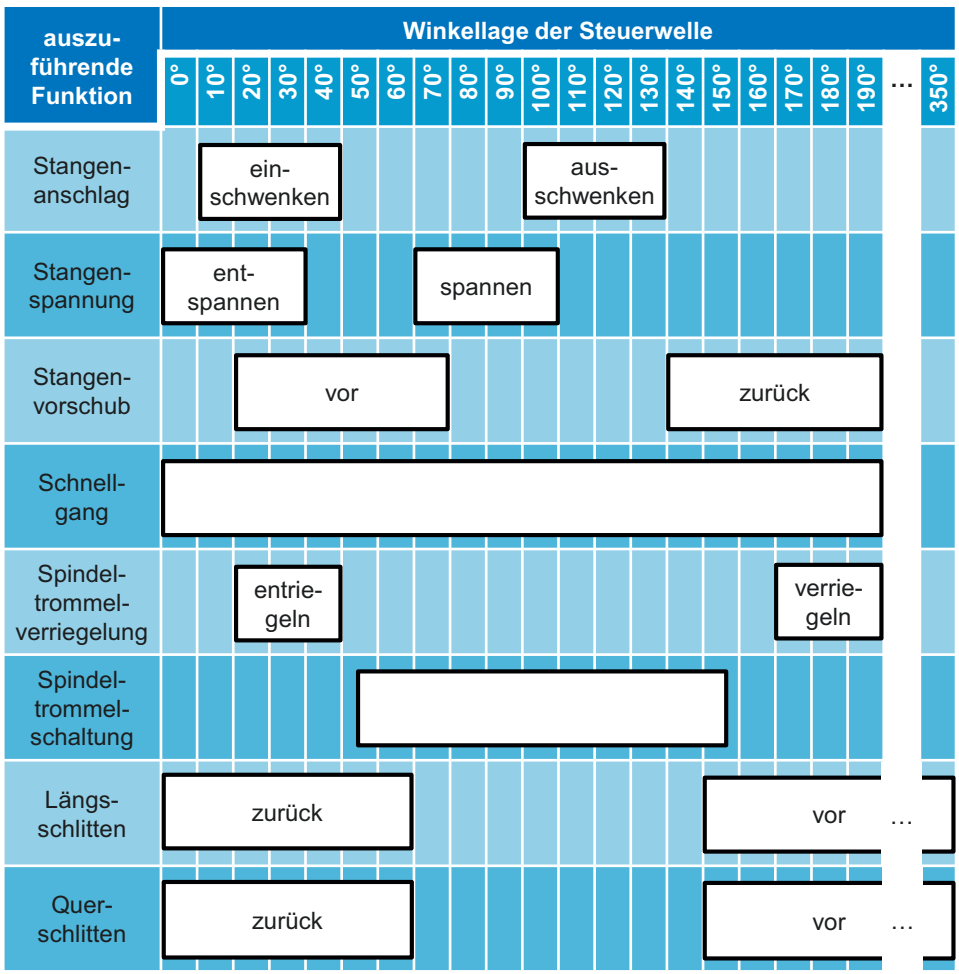


Bild 8.22 Arbeitsablaufdiagramm eines mechanisch gesteuerten Mehrspindlers. Nach Alfred H. Schütte

legt dadurch die Vorschublänge des Längsschlittens fest. Bild 8.21 zeigt den Antrieb für den Planschlitten. Die Bewegungen des Planschlittens (7) werden von der Steuerwelle (6) wie bei den Längsschlitten über die Arbeits- und Rückzugskurve der Kurvenscheibe (3), den Kulissenhebel (2), die Zug- und Druckstange (1), das Zahnsegment (5) und die Zahnstange (4) übertragen. Die Vorschublänge lässt sich wie bei den Längsschlitten für jeden Schlitten über die einstellbaren Kulissenhebel variieren.

Wegen der Einstellbarkeit des Hubes an den Übertragungshebeln ergibt sich für eine Kurvenscheibe ein breites Anwendungsfeld und umfangreiche Ein- und Umrichtzeiten entfallen. Die Vorschubgeschwindigkeit des Schlittens ergibt sich aus der Winkelgeschwindigkeit der Scheibe, d. h. den Steuerwellen und der Steigung der Kurven. Die größte Vorschubkraft wird durch das maximale Drehmoment der Steuerwellen und die maximalen Übertragungskräfte des Kurvenscheibenantriebs sowie durch das Übertragungsverhältnis der Hebel begrenzt. Ein in Bild 8.22 dargestelltes Arbeitsablaufdiagramm veranschaulicht die zeitliche Zuordnung der zu steuernden Funktionen bei einem Mehrspindler. Eine Teildrehung der Steuerwelle von 0° bis 200° im Schnellgang dient dabei der Steuerung aller Nebenfunktionen, bei denen kein unmittelbarer Fortschritt bezüglich der Bearbeitung erzielt wird.

Während dieser Teildrehung werden Funktionen wie Stangenvorschub und -spannung, Weiterschaltung der Spindeltrommel, usw. durchgeführt. Die Bearbeitung selbst wird während einer langsamen Teildrehung der Steuerwelle von 200° bis 360° durchgeführt.

8.3 Weiterentwicklung des mechanisch gesteuerten Mehrspindlers

Eine Weiterentwicklung mechanisch gesteuerter Mehrspindler basiert auf dem Einsatz eines drehzahlsteuerbaren Hauptantriebsmotors für die Spindeln und eines zusätzlichen Servomotors, der die Steuerwellen antreibt, die Funktionen wie Vorschübe, Stangenzuführung, Werkstückspannung, usw. ausführe, Bild 8.23. Der Vorteil dieses Prinzips ist die variable Einstellung der Spindeldrehzahl und der Vorschubgeschwindigkeit. In einer weiter ausgebauten Variante wird für jede Spindel ein eigener Antriebsmotor eingesetzt, mit dem die Drehzahl zur optimalen Bearbeitung an jeder Spindel separat und unabhängig voneinander eingestellt wird.

Eine zusätzliche Entwicklung mechanisch gesteuerter Mehrspindler stellt die Verwendung eines elektronischen Nockenschaltwerks dar. Dabei werden verschiedene Schaltfunktionen, wie Spindelantrieb EIN/AUS, Trommelverriegelung und -weiterschaltung, Werkstückspannung, Stangenvorschub usw., nicht mehr durch eine bzw. mehrere Steuerwellen, sondern direkt von der Maschinensteuerung und diversen Servomotoren ausgeführt. In Abhängigkeit von der

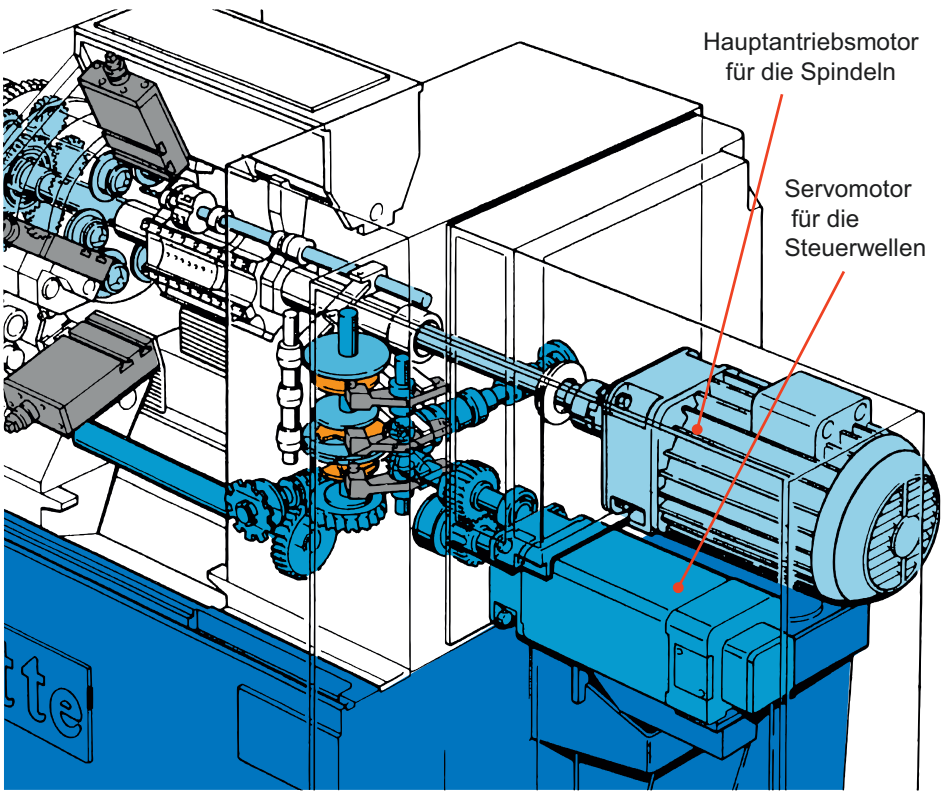


Bild 8.23 Mechanisch gesteuerter Mehrspindler mit Hauptantriebs- und Servomotor für den Steuerwellenantrieb. Nach Alfred H. Schütte

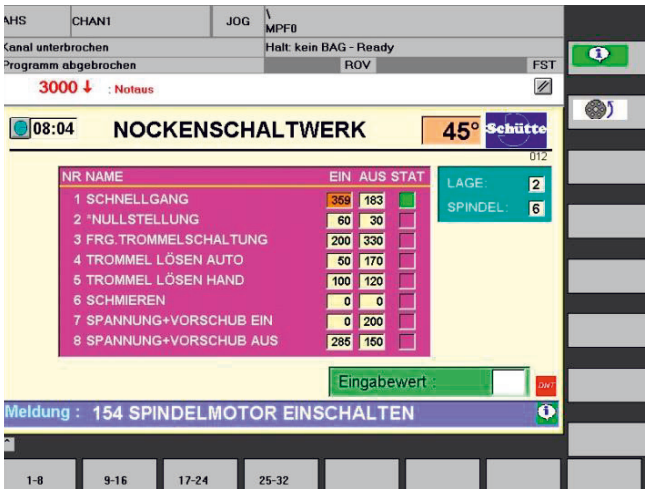


Bild 8.24 Darstellung eines Nockenschaltwerks auf der NC-Steuerung eines Mehrspindeldrehautomaten. Quelle: Alfred H. Schütte

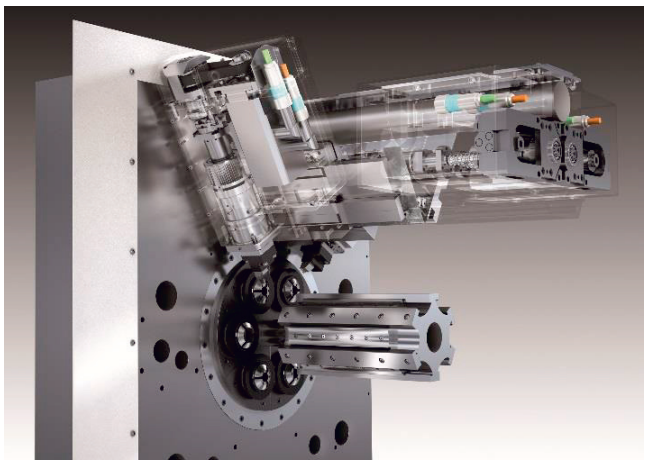


Bild 8.25 Arbeitsraum eines Mehrspindlers mit einem zusätzlichen, NC-gesteuerten Kreuzschlitten. Quelle: Alfred H. Schütte

Stellung der Steuerwellen (Messung über Drehgeber) und damit in Abhängigkeit vom Fertigungsfortschritt werden diese Teilfunktionen gestartet, Bild 8.24. Somit lassen sich die Initiierungszeitpunkte abhängig vom Antrieb der Steuerwellen stufenlos variieren und optimal einstellen.

Ein weiterer Fortschritt im Bereich der mechanisch gesteuerten Mehrspindeldrehautomaten basiert auf dem Einsatz von NC-gesteuerten Werkzeugschlitten für die Planbearbeitung. Diese Technik verbindet die hohe Geschwindigkeit einer mechanisch gesteuerten Maschine mit der Flexibilität NC-gesteuerter Schlitten, z. B. die Herstellung komplizierter Außen- und Innenkonturen und die Minimierung der Umrüstzeit (Bild 8.25).

Heutzutage enthalten die meisten Mehrspindler nicht mehr rein mechanisch, sondern auch NC-gesteuerte Funktionen. Die Anzahl der mechanisch gesteuerten Funktionen

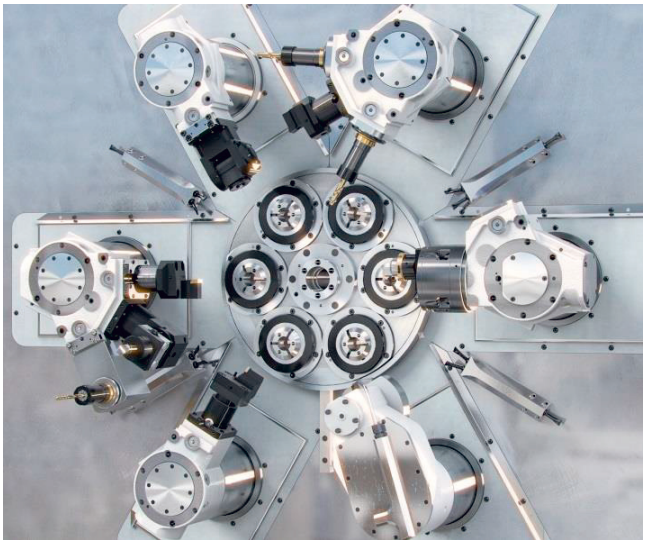


Bild 8.26 Arbeitsraum eines Mehrspindeldrehautomaten mit ausschließlich NC-gesteuerten Funktionen. Quelle: Alfred H. Schütte

hat mit der Zeit immer mehr abgenommen. Oft werden bei diesen Maschinen nur noch Nebenfunktionen mechanisch gesteuert. Eine genaue Trennung zwischen mechanisch- und NC-gesteuerten Mehrspindlern ist deshalb nicht mehr möglich, da sie beide Steuerungskonzepte vereinen (Mischformen). Diese Mischformen werden heute zwar noch gebaut, aber nicht mehr weiterentwickelt. Heutzutage basieren neue Entwicklungen bei Mehrspindlern ausnahmslos auf NC-gesteuerten Maschinenkonzepten, Bild 8.26.

8.4 Elektronische Königswelle

Die Fähigkeiten, Werkzeuge auf komplexen Bahnen führen zu können und mehrere – teilweise synchronisierte – Bewegungsachsen dynamisch zu steuern, sind in vielen Maschinen entscheidende Bausteine zur Erfüllung der applikationsspezifischen Bearbeitungsaufgabe. Die klassische, mechanische Lösung solcher Antriebsaufgaben – besonders bei zyklisch arbeitenden Maschinen – ist die Verwendung eines einzelnen Motors mit zentraler Antriebswelle, der Königswelle. Sie übernimmt den Antrieb der übrigen Bewegungsachsen und die Synchronisation der Einzelbewegungen, z. B. mithilfe von Kurvenscheiben oder Kegelrädern. Eine vergleichbare Aufgabe erfüllen die in Bild 8.27 dargestellten Nockenwellen.

Motiviert durch die Anforderung der Gestaltung flexiblerer Maschinen werden im Maschinenbau jedoch zunehmend mechanische durch elektrische Konzepte ergänzt und ersetzt. Für die Antriebsstruktur bedeutet dies meist den Wechsel von einem gemeinsamen Motor zu einem Servoantrieb pro Bewegungsachse. Mit der elektronischen Königswelle wird

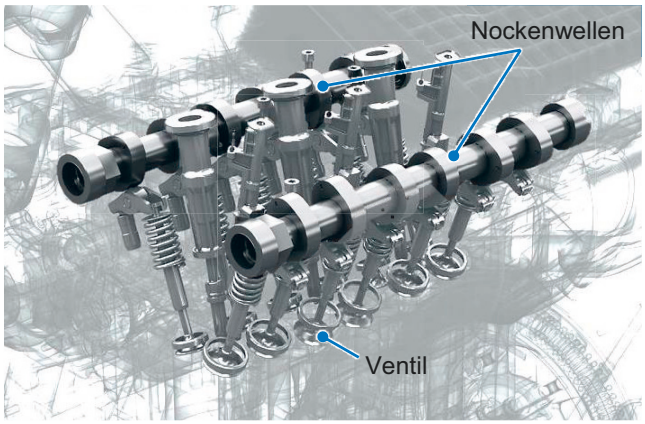


Bild 8.27 Beispiel einer mechanischen Konstruktion mit Nockenwellen. Quelle: MAHLE

Maschinenentwicklern die Möglichkeit geboten, bei der Neugestaltung des Antriebskonzepts auf herkömmliche Engineering-Methoden zurückzugreifen.

8.4.1 Funktionsweise

Die Funktionen der mechanischen Königswelle, also Antriebssteuerung und Synchronisation, werden im elektrischen Antriebskonzept durch die Motion-Control-Software (vgl. ▶ Kap. 10.5), die dort implementierten, einzelnen Gleichlaufsteuerungen und Servomotoren erfüllt, Bild 8.28.

Die Bewegungsaufgaben, die aus der Verwendung einer Königswelle im mechanischen Antriebskonzept resultieren, werden der Motion-Control-Funktion „Winkelgleichlauf" zugeordnet, Bild 8.10. Beim Winkelgleichlauf besteht gegenüber dem Geschwindigkeitsgleichlauf die Möglichkeit, dass die Bewegung der Leitachse sich kontinuierlich auf Schwankungen der Folgebewegungen anpassen kann, was die mechanische Kopplung mittels Königswelle besser widerspiegelt [WEID08]. Die Motion-Control-Software beinhaltet die virtuelle Königswelle und generiert aus dieser den Leitwert mit dem die Folgeachsen im Synchronverbund verknüpft werden.

In den Gleichlaufsteuerungen der Folgeachsen werden aus dem Leitwert die Lagesollwerte für die Lageregler der Folgeantriebe abgeleitet und an diese weitergeleitet. So entsteht ein hierarchischer Zusammenhang zwischen der Bewegung der Leitachse (Master genannt) und der Folgeachsen (Slaves). Der funktionelle Aufbau einer Gleichlaufsteuerung ist im Folgenden detailliert beschrieben, Bild 8.30 [WEID08]:

- Im ersten Schritt wird festgelegt, woraus der Leitwert generiert wird. Dabei kann prinzipiell der Leitwert eines realen Masters oder einer virtuellen Master-Achse verwendet werden. Im Falle der elektronischen Königswelle wird der Leitwert von einer virtuellen Leitachse generiert. Der Leitwert gibt dann in der Regel die Winkelstellung der Leitachse an.
- In einem zweiten Schritt wird der Leitwert für die weitere Verwendung aufbereitet, indem er auf den Achszyklus (entspricht bei einer Königswelle einer Umdrehung) normiert wird. Außerdem verarbeitet die Leitwertaufbereitung ggf. die Ergebnisse des Referenzierens zum mechanischen System, was beim Gleichlauf zyklisch erfolgt. Das Referenzieren entfällt jedoch bei der elektronischen Königswelle in vielen Fällen, da die Folgeachsen häufig mit Absolutwertgebern ausgestattet sind. Eine dritte Aufgabe der Leitwertaufbereitung ist die Addition eines möglichen Versatzes zwischen Leitwert und dem mechanischen System. Dieser Versatz kann vom Bediener manuell eingestellt werden, um das System nachträglich optimal einzustellen und kleinere Fehler zu korrigieren.

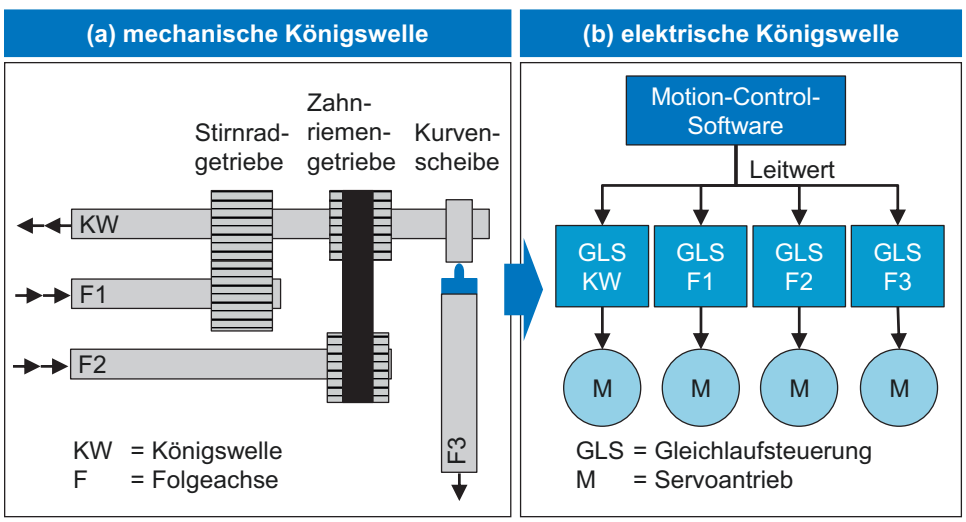


Bild 8.28 Vergleich mechanische (a) und elektrische (b) Königswelle

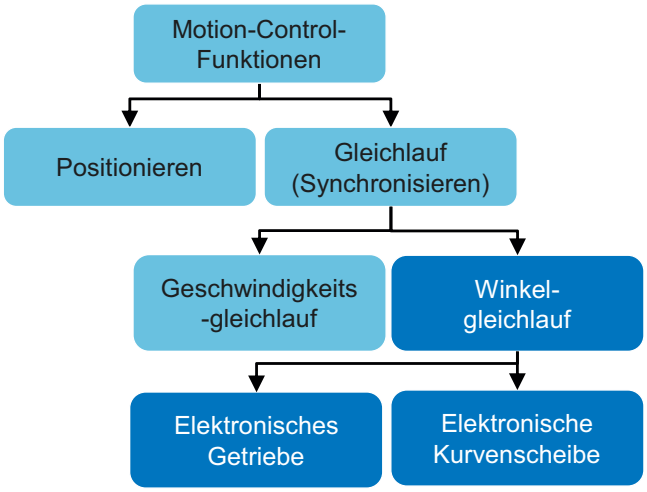


Bild 8.29 Motion-Control-Funktionen. Nach SIEMENS

- Anschließend folgt eine Kuppeleinheit, die die Funktionen Einkuppeln und Auskuppeln ausführen kann. Sie stellt damit sicher, dass die Bearbeitungsvorgänge unterbrochen werden können z. B. bei Vorliegen eines fehlerhaften Produkts. Dabei werden die sicheren Ein- und Auskuppelstellungen der Folgeachse beachtet.
- In der vierten Stufe wird der Lagesollwert für den Lageregler der Folgeachse ermittelt. Die Sollwerterzeugung bildet damit das Kernstück zum Ersatz eines mechanischen Getriebes oder einer mechanischen Kurvenscheibe. Hier können der Steuerung die mathematischen Zusammenhänge zwischen Lagesollwert der Folgeachse und Leitwert der virtuellen Leitachse vorgegeben werden. Je nach Ausführung wird entweder ein elektronisches Getriebe, bei einem festen Übersetzungsverhältnis, oder eine elektronische Kurvenscheibe für ungleich-

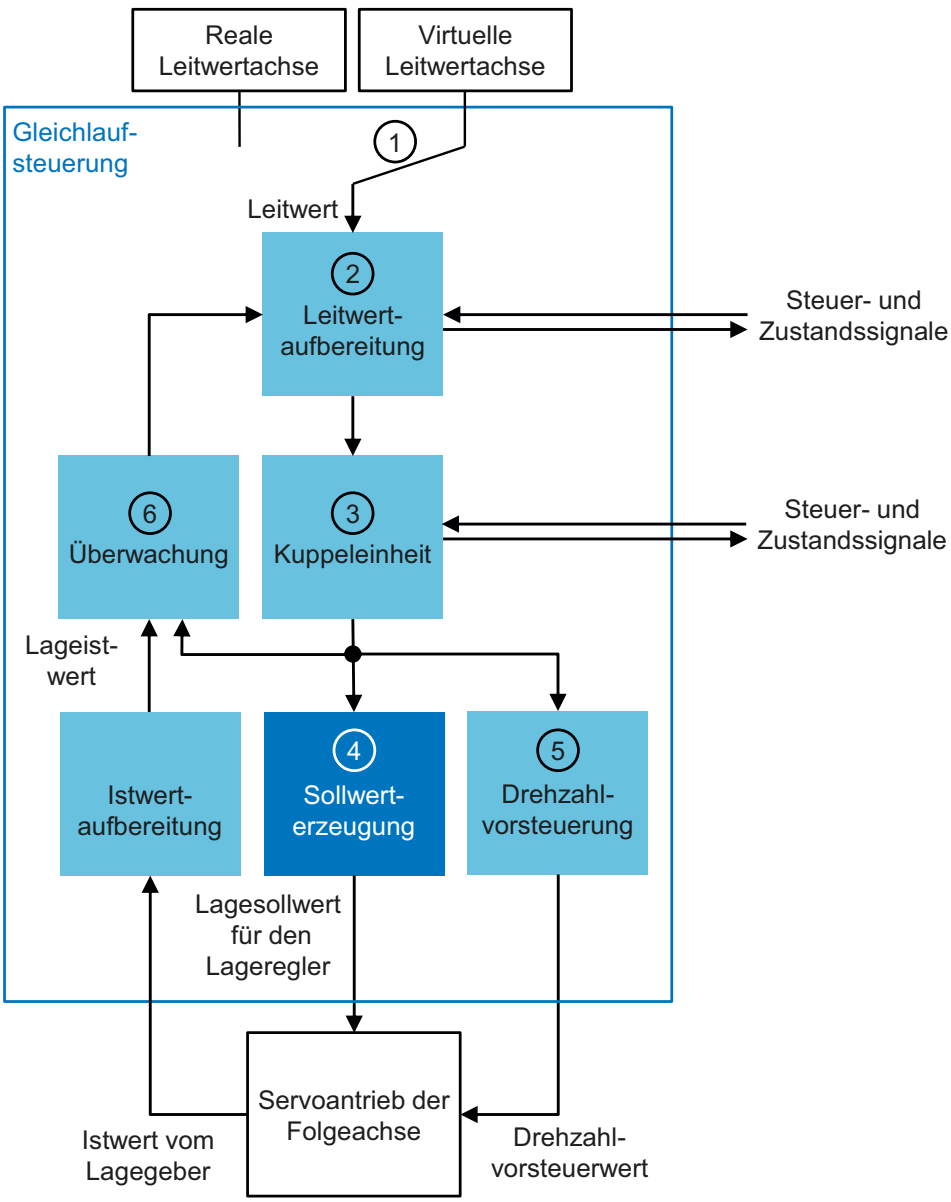


Bild 8.30 Funktionale Bestandteile einer Gleichlaufsteuerung. Nach SIEMENS

förmige Bewegungsabläufe realisiert (vgl. ▶ Kap. 10.5, ◘ Bild 10.46 elektronische Kurvenscheibe). Bei letzterem wird an dieser Stelle statt eines mathematischen Zusammenhangs meist eine Tabelle in der Gleichlaufsteuerung hinterlegt, die die Zusammenhänge zwischen Leitwert und Lagesollwert festlegt. Die Stützwerte der Tabelle können z. B. durch einen Kurvenscheiben-Editor erstellt werden (vgl. ▶ Kap. 10.5, ◘ Bild 10.44). Dieser ermöglicht es dem Anwender, die Maschinendaten und Kurvenscheibengeometrie in den Editor zu übertragen, stellt sie dem Anwender dabei graphisch und numerisch bereit und hinterlegt die Kurventabelle in der Gleichlaufsteuerung. Dort können stets mehrere Kurventabellen für einen eventuellen Produktwechsel netzausfallsicher gespeichert werden [EIDA97]. Für die Leitwerte zwischen den Stützpunkten ist es notwendig, dass interpoliert wird. In der Regel erfolgt die Interpolation innerhalb der Funktionseinheit der Sollwerterzeugung mit Hilfe von linearen Funktionen oder Spline-Funktionen. Das Ergebnis ist ein zwei dimensionaler Graph, der das Bewegungsprofil der Folgeachse in Abhängigkeit zum aufbereiteten Leitwert wiedergibt und aus welchem der Lagesollwert im Verhältnis zum aufbereiteten Leitwert ermittelt wird.

- Der fünfte Bestandteil der Gleichlaufsteuerung ist die Berechnung des Drehzahl-Vorsteuerwerts. Bei elektronischen Königswellen wird der Vorsteuerwert jedoch auch häufig direkt von der virtuellen Leitachse bereitgestellt und ebenfalls an die Gleichlaufsteuerung der Folgeachse übertragen. In diesem Fall entfällt diese Funktionseinheit.

Um den Synchronlauf der Folgeachse zum Leitwert sicherzustellen, wird die Bewegung der Folgeachse überwacht, Funktionseinheit 6 in ◘ Bild 8.30. Eine zu große Abweichung des Lageistwertes vom Lagesollwert resultiert in einem signifikanten Schleppfehler und deutet auf eine Überlastung des mechanischen Antriebsstrangs hin. Ist die Folgeachse eine Linearachse, werden außerdem die Endlagen überwacht. Werden diese überschritten, ist zu überprüfen, ob die Achse unzulässige Schwingungen ausführt. Diese können aus zu hoher Last oder einer falschen Einstellung des Reglers entstehen. Ist dies nicht der Fall, sind Fehler in der Istwerterfassung oder der Referenzpunktermittlung zu erwarten.

8.4.2 Anwendung

Der Einsatz einer virtuellen Königswelle und der entsprechenden Software bringt neben einer engen Anlehnung an den schon bekannten mechanischen Aufbau weitere Vorteile [LOHS94; EIDA97]:

- höhere Dynamik,
- höhere Flexibilität der Anlage in Projektierung, Konstruktion und Betrieb,
- geringere Anlagenkosten aufgrund eines einfacheren mechanischen Aufbaus,
- Produktivitätssteigerungen um bis zu 30 bis 40 % [BACH98] und ggf. höhere Qualität des Endprodukts,
- Minimierung der Rüstzeiten, weil nur die Maschinendaten im Editor geändert werden müssen,
- komplexere Maschinenkonzepte werden ermöglicht,
- einfache Überwachung der Endlagen, was zu einer schnelleren Fehleridentifikation führt,
- einfache Integration von Sicherheitsfunktionen.

Neben diesen Vorteilen gilt es, die Nachteile der Verwendung einer virtuellen Königswelle gegenüber einem mechanischen Konzept zu lösen [LOHS94; EIDA97]:

- Sicherheit bei Stromausfall muss gewährleistet werden.
- Höheres Risiko für Lagefehler.
- Akzeptanz und Know-How der Technik müssen beim Betreiber der Maschine vorhanden sein, da die Qualität und Produktivität der Anlagen in einem hohen Maß von den Reglereinstellungen abhängt.
- Grenzen durch die Auflösung der Messsysteme, die Dynamik der Servomotoren und die Geschwindigkeit der Hardware.

Abkürzungsverzeichnis

NC	Numerical Control – numerisch gesteuert
EMK	Elektromagnetkupplung

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
F_i	mm/U	Vorschubwert
H_h	–	Anzahl Hundertstel Kurvenscheibe für Hauptzeit
H_{hi}	–	Anzahl Hundertstel Kurvenscheibe für Hauptzeitanteile
H_n	–	Anzahl Hundertstel Kurvenscheibe für Nebenzeit
K	–	Bewegungskurve
S	–	Sperrkurve
U_{ges}	–	Gesamtzahl Arbeitsspindelumdrehungen pro Werkstück
U_h	–	Umdrehungen für Hauptzeit
U_{hi}	–	Umdrehungen für einzelne Arbeitsgänge der Hauptzeit

Kleinbuchstaben

d_{max}	mm	Größter Durchmesser
f	mm/U	Vorschub
l_i	mm	Einzelne Arbeitswege
n	min^{-1}	Spindeldrehzahl
t_h	min	Hauptzeit
t_w	min	Gesamtzahl Werkstückfertigung
v	mm/min	Schnittgeschwindigkeit
z	1	Übersetzungsverhältnis

Literaturverzeichnis

[BACH98] Bachmann, G.: Virtuelle Königswelle bietet mehr Flexibilität. In: Konstruktion, 1998, Nr. 50/1, S. 28

[EIDA97] Eidam, J.: Beurteilung und Simulation des Betriebsverhaltens von lagegeregelten elektrischen Direktantrieben als „Elektronische Kurvenscheibe". Diss. Leibniz Universität Hannover, 1997

[HEIS14] Heisel, U.: Handbuch Spanen. (Reihe: Ed. Handbuch der Fertigungstechnik). München: Hanser, 2014

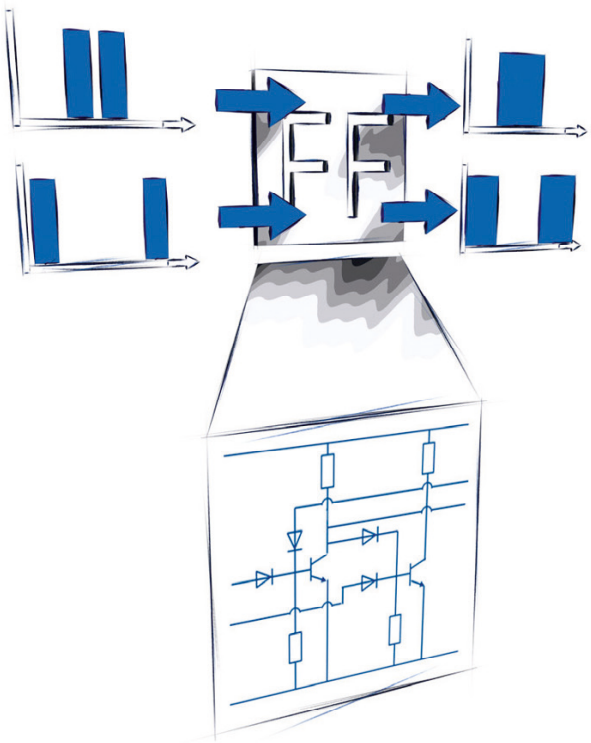
[LICH53] Lichtwitz, O.: Getriebe für aussetzende Bewegung. Berlin: Springer, 1953

[LOHS94] Lohse, G.: Konstruktion von Kurvengetrieben. Grundlagen für die erfolgreiche Entwicklung ungleichförmig übersetzender Getriebe. (Reihe: Kontakt & Studium. Bd. 454: Maschinenbau). Renningen-Malmsheim: expert, 1994

[WECK13] Weck, M.; Brecher, C.: Maschinenarten und Anwendungsbereiche. (Reihe: VDI-Buch). 6. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer Vieweg, 2013

[WEID08] Weidauer, J.: Elektrische Antriebstechnik. Grundlagen, Auslegung, Anwendungen, Lösungen. Erlangen: Publicis Corporate Publ., 2008

Kapitel 9



Grundlagen der Informationsverarbeitung

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M. Sc., Jerome Flender M. Sc., Christoph Pallasch M. Sc. und Simon Storms M. Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.


Turning Data into Productivity
Advanced Analytics for CNC Manufacturing
info@mt-analytics.de
ANALYTICS

Grundlagen der Informationsverarbeitung



9.1 Grundlagen – 330
9.1.1 Zahlensysteme – 330
9.1.2 Datencodes – 332
9.1.3 Boole'sche Algebra – 334
9.1.4 Karnaugh-Veitch-Diagramm – 337

9.2 Bausteine – 339
9.2.1 Realisierung der Grundfunktionen – 339
9.2.2 Erweiterte Funktionen – 342
9.2.3 Integrierte Schaltkreise – 352
9.2.4 Bedien- und Anzeigeelemente – 354
9.2.5 Rechner – 354

9.3 Kommunikation in der Automatisierungstechnik – 356
9.3.1 Anforderungen an die Kommunikationstechnik – 356
9.3.2 OSI-Referenzmodell – 357
9.3.3 Busarchitekturen und -zugriffsverfahren – 359
9.3.4 Bus-Systeme – 360
9.3.5 Industrial Ethernet – 361
9.3.6 Wireless Communication – 362
9.3.7 Near Field Communication – 363
9.3.8 Middleware-Protokolle – 364

Abkürzungsverzeichnis – 365

Literaturverzeichnis – 365

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_9

Mit der zunehmenden Automatisierung von Fertigungsprozessen ergeben sich auch höhere Anforderungen an die Informationsverarbeitung. Die Entwicklung der elektronischen Steuerungstechnik hat sich dabei auf unterschiedlichen Ebenen vollzogen. Zum einen wirkte sich dies im maschinen- bzw. prozessnahen Bereich durch leistungsfähige, miniaturisierte Steuerungskomponenten aus, zum anderen eröffnete die Entwicklung leistungsfähiger Datenverarbeitungsanlagen die Möglichkeit, die Steuerung der Fertigungsprozesse in den gesamten Informationsfluss eines Betriebes einzugliedern. Zum Informationsfluss höher integrierter Fertigungssysteme zählt die Übertragung der Steuerdaten an die Bearbeitungs- und Transporteinheiten. Von dort werden Betriebsdaten aufgenommen, gesammelt und ausgewertet, um den Fertigungsablauf zu überwachen und gemäß vorgegebener Strategien zu steuern.

Allen Geräten zur digitalen Informationsverarbeitung ist gemeinsam, dass die zu verarbeitenden Daten in einer bestimmten Form definiert werden müssen. Die Darstellungsform der Daten orientiert sich an der Funktionsweise der Geräte, die auf den elektrischen Zuständen „Ein“ und „Aus“ basiert. Solche Größen, die nur zwei Werte oder Zustände annehmen können, werden binäre Größen genannt.

Binäre Informationen können in Logiknetzwerken verarbeitet werden. Die Logiknetzwerke sind aus Schaltelementen aufgebaut, die logische Funktionen (Verknüpfungs- oder Grundfunktionen nach DIN 19226) realisieren. In den folgenden Abschnitten wird unter anderem die Umwandlung von Informationsdaten in unterschiedliche Darstellungsformen und ihre Verarbeitung in Logiknetzwerken gezeigt [BAIL74; BORU89; DWOR86; FLEG93; KOCH77; KORE81; BUES94]. Anschließend wird die in der Automatisierung eingesetzte Kommunikationstechnik beschrieben, die vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an die Integration von Arbeitsabläufen sowie organisatorischer Flexibilität und Unabhängigkeit von Standorten für produzierende Unternehmen einen hohen Stellenwert hat [BUES94].

9.1 Grundlagen

9.1.1 Zahlensysteme

Das allgemein gebräuchliche Zahlensystem ist das Dezimalsystem. Aufgrund praktischer Anforderungen sind bei Steuersystemen jedoch andere Zahlensysteme besser geeignet.

In jedem Zahlensystem lässt sich eine Zahl als Summe von Potenzen einer Basiszahl darstellen, deren allgemeine Form im oberen Teil von Gleichung (9.1) angegeben ist.

$$Z = b_n \cdot B^n + b_{n-1} \cdot B^{n-1} + \ldots + b_1 \cdot B^1 + b_0 \cdot B^1 + b_{-1} \cdot B^{-1} + \ldots + b_m \cdot B^m$$

Kurzform:

$$Z = \sum_{i=m}^{n} b_i B^i \quad 0 \le b_i \le B \qquad \begin{array}{l} B: \text{Basis} \\ b_i: \text{ Ziffer der i-ten Stelle} \end{array} \tag{9.1}$$

Der Wert einer Stelle innerhalb einer mehrstelligen Zahl bestimmt sich aus dem Produkt der Ziffer mit der Wertigkeit der Ziffernstelle. Die Wertigkeit ist eine ganzzahlige Potenz zu der Basis, nach der das Zahlensystem benannt ist. Der zugehörige Exponent entspricht dem Ziffernstellenabstand vom Komma aus gerechnet. Die erste Stelle links vom Komma ist die Stelle Null. Von dieser wird nach links steigend und nach rechts fallend gezählt. Wertigkeiten im Hexadezimalsystem sind z. B.:

$0{,}01_{16} = 16^{-2}$
$0{,}1_{16} = 16^{-1}$
$1_{16} = 16^0$
$10_{16} = 16^1$
$100_{16} = 16^2$

Eine besondere Bedeutung besitzt das Dualsystem, da Dualzahlen leicht in Logiknetzwerken verarbeitet werden können. Im Dualsystem beträgt die Basis 2, die unterscheidbaren Ziffern lauten 0 und l. Da die Darstellung großer Zahlen jedoch zu einer sehr großen Stellenanzahl führt, sind in der Digitalrechentechnik noch das Oktal(8)- und das Hexadezimal(l6)-System gebräuchlich. Zahlen aus diesen Zahlensystemen lassen sich sehr leicht in Dualzahlen umwandeln und gleichzeitig übersichtlich darstellen. ◘ Bild 9.1 zeigt eine Gegenüberstellung der gebräuchlichsten Zahlensysteme. Die unterscheidbaren Ziffern lauten im Dezimalsystem 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, im Oktalsystem 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und im Hexadezimalsystem 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F.

Will man Dezimalzahlen durch Logiknetzwerke verarbeiten, müssen diese in Dualzahlen umgewandelt werden. Ferner zeigt sich die besondere Bedeutung des Dualsystems, wenn Dezimalzahlen in Oktal- oder Hexadezimalzahlen umgewandelt werden sollen, da es dort als Zwischenstufe dient.

Eine Dezimalzahl wird zur Umwandlung in einen ganzzahligen und einen gebrochenen Teil aufgespaltet. Beide Teile werden mithilfe einer ganzzahligen Division und Modulooperation in die entsprechenden Teile der Dualzahl umgewandelt, ◘ Bild 9.2. Zur Unterscheidung der Zahlendarstellung in unterschiedlichen Systemen wird die Basis als Index mit angegeben.

Die weitere Umwandlung der Dualzahl in eine Oktalzahl geschieht folgendermaßen: Vom Komma der Dualzahl ausgehend werden nach beiden Seiten je drei Ziffernstellen abgetrennt. Verbleibende Ziffern ergänzt man

Bild 9.1 Zahlensysteme

Potenzschreibweise

$$Z = b_n \cdot B^n + b_{n-1} \cdot B^{n-1} + \ldots b_1 \cdot B^1 + b_0 \cdot B^0 + b_{-1} \cdot B^{-1} + \ldots b_m B^m$$

Kurzform

$$Z = \sum_{i=m}^{n} b_i B^i \quad 0 \le b_i \le B$$

B: Basis

b_i: Ziffer der i-ten Stelle

dezimal			dual							oktal			hexadezimal	
10^2	10^1	10^0	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	8^2	8^1	8^0	16^1	16^0
		0							0			0		0
		1							1			1		1
		2						1	0			2		2
		3						1	1			3		3
		4					1	0	0			4		4
		5					1	0	1			5		5
		6					1	1	0			6		6
		7					1	1	1			7		7
		8				1	0	0	0		1	0		8
		9				1	0	0	1		1	1		9
	1	0				1	0	1	0		1	2		*A*
	1	1				1	0	1	1		1	3		*B*
	1	2				1	1	0	0		1	4		*C*
	1	3				1	1	0	1		1	5		*D*
	1	4				1	1	1	0		1	6		*E*
	1	5				1	1	1	1		1	7		*F*
	1	6			1	0	0	0	0		2	0	1	0
	1	7			1	0	0	0	1		2	1	1	1
		...							...			...		...
	2	7			1	1	0	1	1		3	3	1	*B*
		...							...			...		...
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	4	4	6	4

durch Nullen auf drei Stellen. Jeder dieser Blöcke wird nach der Bild 9.1 in eine Oktalziffer umgewandelt, die insgesamt eine Oktalzahl darstellen. Eine Konvertierung in eine Dezimalzahl erfolgt unter Verwendung der Potenzschreibweise.

Die Umwandlung von Dualzahlen in Hexadezimalzahlen und umgekehrt geschieht analog zur Umwandlung in Oktalzahlen, nur dass hier die Ziffernblöcke vier anstatt drei Stellen umfassen.

Die zentrale Stellung des Dualsystems begründet sich darin, dass sich Dualzahlen mit digital arbeitenden Bausteinen addieren lassen. Alle weiteren arithmetischen Operationen (z. B. Subtraktion, Multiplikation) sind auf die Addition zurückführbar. Dies bedeutet, dass mit Dualzahlen in weitem Umfang maschinell gerechnet werden kann.

Bild 9.3 zeigt, wie die vier Grundrechenarten mit Dualzahlen ausgeführt werden. Zur Darstellung negativer Dualzahlen wird das sogenannte Zweierkomplement gebildet, mit

Aufspalten der Dezimalzahl

$Z_{10} = 13{,}6875 = 13 + 0{,}6875$

Umrechnung der Dezimalzahl in eine Dualzahl

13	$:2=6$	Rest 1	Dualzahl 1101
6	$:2=3$	Rest 0	
3	$:2=1$	Rest 1	
1	$:2=0$	Rest 1	
0,6875	$\cdot 2=1{,}375$	$=0{,}375+1$	Dualer Rest 0,1011
0,375	$\cdot 2=0{,}75$	$=0{,}75+0$	
0,75	$\cdot 2=1{,}5$	$=0{,}5+1$	
0,5	$\cdot 2=1{,}0$	$=0+1$	
0	$\cdot 2=0$		

$Z_2 = 1101{,}1011$

Umrechnung Dualzahl in Hexadezimalzahl

$Z_2 = 1101,\ 1011$
$Z_{16} = D\ ,\ B$

Umrechnung Dualzahl in Oktalzahl

$Z_2 = 001\ \ 101,\ \ 101\ \ 100$
$Z_8 = 1\ \ 5,\ \ 5\ \ 4$

Umrechnungsvorschrift für Dezimalzahlen

$$Z_{10} = \sum_{i=m}^{n} b_i \cdot B^i$$

B: Basis des Zahlensystems
b_i: Ziffer mit Wertigkeit i; $0 < b_i < B$
$n+1$: Anzahl der Vorkommastellen
m: Anzahl der Nachkommastellen

Bild 9.2 Umwandlung von Zahlen für die Darstellung in verschiedenen Zahlensystemen

Addition

Binär	Dezimal
$110 + 001 = 111$	$6 + 1 = 7$

Multiplikation

Binär	Dezimal
$001 \cdot 010 = 0\ 011\ 0 = 0100$	$3 \cdot 2 = 6$

Subtraktion

Binär	Dezimal
$0\ 011 + 1\ 110 = 10\ 001$	$3 + (-2) = 1$

Zweierkomplement
Vorzeichenbit
Überlauf

Bildung des Zweierkomplements

$2_{10} = 010_2$ — Komplementieren
101 — +1
110 — Komplementieren
$-2_{10} = 1110_2$

Division

Binär	Dezimal
$111 \div 010 = 11$ Rest 1	$7 \div 2 = 3{,}5$

Bild 9.3 Arithmetik mit Dualzahlen

dem die Subtraktion in eine Addition überführt werden kann. Der dabei entstehende Überlauf (linke Stelle) bleibt ohne Betracht.

Das Zweierkomplement wird, wie im Bild 9.3 rechts dargestellt, gebildet: Alle Stellen der Dualzahl werden komplementiert und auf die so gebildete Dualzahl eine „1" addiert. Die Stellenzahl wird so groß gewählt, dass bei der positiven Dualzahl in der ersten Stelle eine „0" steht. Durch die Bildung des Zweierkomplements wird die erste Stelle mit einer „l" besetzt, wodurch die Dualzahl als negativ gekennzeichnet wird.

Bis auf diese Ausnahme kann mit Dualzahlen wie mit Dezimalzahlen gerechnet werden. Die Division zweier ganzer Dualzahlen (Integerzahl) kann auf eine gebrochene Dualzahl (Realzahl) führen. Gebrochene Dualzahlen lassen sich in zwei Arten darstellen: als Festkommazahl (FixPoint-Zahl) und als Gleitkommazahl (Floating-Point-Zahl). Im Gegensatz zur Festkommadarstellung eignet sich die Gleitkommadastellung auch zur Verarbeitung von Zahlen unterschiedlicher Größenordnung (z. B. Multiplikation einer großen Zahl mit einer kleinen Zahl). Das Rechnen mit Gleitkommazahlen ist jedoch aufwendiger, da jede Zahl in eine Mantisse (Faktor) und einen Exponenten zur Basis zwei unterteilt ist.

9.1.2 Datencodes

Damit Daten in digitale Geräte eingegeben und dort verarbeitet werden können, muss man die Informationen in geeigneter Weise darstellen. Man spricht von der Codierung der Daten.

Für die stellenweise Darstellung von Dezimalzahlen als Binärzahlen eignen sich BCD (binär codierte Dezimalziffern)-Codes. Diese Codes verbinden den gewohnten dezimalen Zahlenaufbau mit der binären Schreibweise.

Zur Darstellung einer Dezimalziffer werden vierstellige Binärzahlen (Tetraden) benötigt. Tetraden bieten $2^4 = 16$ mögliche Binärkombinationen, von denen man jedoch nur zehn benötigt. Die einzelnen Dezimalziffern werden je nach

Bild 9.4 Tetradencodes und 8-Bit-ASCII-Code

Tetraden	8421-BCD-Code	4-Bit-Binär-Code	Gray-BCD-Code	4-Bit-Gray-Code
0000	0	0	0	0
0001	1	1		F
0010	2	2	9	9
0011	3	3		E
0100	4	4	1	1
0101	5	5	2	2
0110	6	6	8	8
0111	7	7	3	3
1000	8	8		B
1001	9	9		C
1010		A		A
1011		B		D
1100		C	6	6
1101		D	5	5
1110		E	7	7
1111		F	4	4

8-Bit ASCII (Bit 7: Parity-Bit)								
Bits 654 3210	000 0	001 1	010 2	011 3	100 4	101 5	110 6	111 7
0000 0	NULL	DC0		0	@	P	´	p
0001 1	SOM	DC1	!	1	A	Q	a	q
0010 2	EOA	DC2	"	2	B	R	b	r
0011 3	EOM	DC3	#	3	C	S	c	s
0100 4	EOT	DC4	$	4	D	T	d	t
0101 5	WRU	ERR		5	E	U	e	u
0110 6	RU	SYNC	&	6	F	V	f	v
0111 7	BELL	LEM	'	7	G	W	g	w
1000 8	FE	S0	(	8	H	X	h	x
1001 9	HTAB	S1	)	9	I	Y	i	y
1010 A	LF	S2	*	:	J	Z	j	z
1011 B	VTAB	S3	+	;	K	[	k	
1100 C	FF	S4	,	<	L	/	l	ACK
1101 D	CR	S5	-	=	M	]	m	UC
1110 E	SO	S6	.	>	N	↑	n	ESC
1111 F	SI	S7	/	?	O	←	o	DEL

technischer Anforderung den einzelnen Tetraden zugeordnet. Die vier gebräuchlichsten Codes zeigt Bild 9.4.

Im 8421-BCD-Code wird die Dezimalziffer als gleichwertige Dualzahl dargestellt. Beim 8421-Hexadezimal-Code werden alle 16 Möglichkeiten einer Tetrade ausgenutzt.

Der Gray-Code ordnet die Dezimalziffern den Tetraden in der Art zu, dass sich die Tetraden von einer Dezimalziffer zur nächsten nur in einer Stelle ändern. Das ist gleichermaßen für die Darstellung von Hexadezimalziffern möglich. Vom Aufbau her sind beliebig viele Zuordnungen zu finden, die dem Bildungsgesetz des Gray-Codes gehorchen. Im Bild 9.4 wird ein geschlossener Gray-Code gezeigt. Bei einem geschlossenen Gray-Code entsteht beim Übergang von der höchstwertigen Ziffer „9“ oder „F“ zur „0“ ebenfalls nur eine Änderung in der Tetrade. Der Gray-Code wird z. B. bei der Codierung von absoluten Wegmaßstäben benutzt, um beim Übergang von einem Wert zum nächsten nur eine Informationsänderung in einer Stelle zu erhalten. Damit hat dieser Code den Vorteil, dass eine Verschmutzung bzw. Beschädigung der Skala aufgrund der Störung des Musters erkannt und damit Lesefehler vermieden werden können.

Ebenso wie die Ziffern können auch Buchstaben, Satzzeichen und Sonderzeichen codiert und damit in Logiknetzwerken verarbeitet werden. Hierbei sind etwa 50 bis 60 Zeichen darzustellen. Um einen derartigen Zeichenumfang zu definieren, benötigt man sechsstellige Binärkombinationen ($2^6 = 64$; DIN 66024). Inzwischen hat sich in der allgemeinen Datenverarbeitung insbesondere auch im PC-Bereich der ASCII- Code durchgesetzt, der aus 8 Bits besteht und mit dem 128 Zeichen (Buchstaben, Zahlen und Sonderzeichen) unterschieden werden können. Das 7. Bit dient dabei als Parity-Bit. Dieser Code im Bild 9.4 rechts dargestellt.

Der zunehmend internationale Datenaustausch erfordert die Codierung von nationalen Sonderzeichen (z. B. Umlauten). Die Codierung aller weltweit gebräuchlichen Sonderzeichen benötigt weitaus mehr Zeichen, als der ASCII-Code beinhaltet. Die International Standards Organization (ISO) ordnete daher fast jedem Zeichen und jedem Symbol in jeder Sprache eine Zahl von 0 bis 65.535 (2^{16}–1) zu. Dieser Zeichensatz wird als Unicode [FREY97] bezeichnet und mittels 16 Bits codiert.

	Postulat 1		Postulat 2	
1	$X = 0$, wenn $X \neq 1$		2	$\bar{0} = 1$
1‘	$X = 1$, wenn $X \neq 0$		2‘	$\bar{1} = 0$
	Postulat 3	**Postulat 4**	**Postulat 5**	
AND	$0 \cdot 0 = 0$	$1 \cdot 1 = 1$	$0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$	
OR	$0 + 0 = 0$	$1 + 1 = 1$	$0 + 1 = 1 + 0 = 1$	

Bild 9.5 Fundamentale Rechenoperationen der Boole’schen Algebra

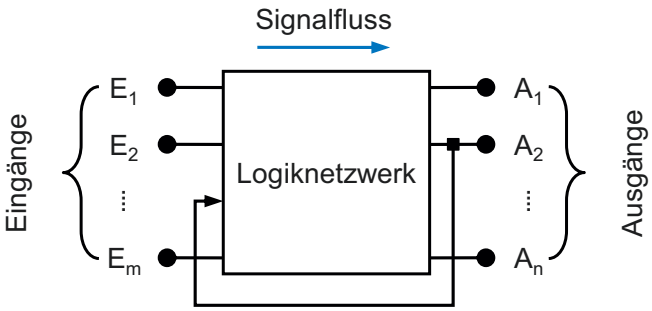


Bild 9.6 Logiknetzwerk in allgemeiner Darstellung

9.1.3 Boole’sche Algebra

Binäre Informationen können in digital arbeitenden Geräten, sogenannten Logiknetzwerken, verarbeitet werden. Sie enthalten Schaltelemente, die logische Funktionen realisieren. Die wichtigsten sind die AND- und die OR-Funktion, die im Folgenden näher betrachtet werden. Logiknetzwerke verknüpfen die Zustände der Eingangsgrößen (Signale an den Eingängen) zu Ausgangsgrößen (Signale an den Ausgängen). Im Bild 9.6 ist ein Logiknetzwerk in allgemeiner Darstellung gezeigt. Dort ist auch zu sehen, dass zur Erzeugung spezieller Funktionen Ausgänge auf Eingänge geschaltet werden können.

Typisches Merkmal der Logiknetzwerke ist, dass die Ein- und Ausgangszustände und die interne Arbeitsweise zweiwertig (binär) sind. Die möglichen Zustände der auftretenden Signale werden wie folgt definiert:

- „1“: Signal ist vorhanden (Spannung liegt an, Strom fließt, Druck vorhanden).
- „0“: Signal ist nicht vorhanden (Spannung, Strom oder Druck gleich Null).

Die logische Funktion eines Logiknetzwerks kann mathematisch mit Hilfe der Boole’schen Algebra beschrieben und vereinfacht werden. Sie stellt alle Vorschriften bereit, um mit logischen Größen zu rechnen.

Die fundamentalen Rechenoperationen der Boole’schen Algebra sind in fünf Postulaten enthalten (vgl. Bild 9.5). Postulat 1 definiert den binären Charakter der logischen Zustandsvariablen X. Postulat 2 beschreibt die Komplementbildung (Negation) und sagt aus, dass der Zustand „0“ das Gegenstück zum Zustand „1“ ist und umgekehrt. Als Symbol für die Negation dient ein Querstrich über der Variablen.

Die Postulate 3 bis 5 definieren die Resultate aller mit zwei Eingangsvariablen möglichen Kombinationen für die AND- und die OR-Verknüpfungen, für deren mathematische Schreibweise Symbole genormt sind.

Im Folgenden werden die internationalen Symbole für die Darstellung benutzt (DIN 66000), siehe auch Bild 9.7.

In Bild 9.7 sind die fünf wichtigsten Grundfunktionen von Logiknetzwerken angegeben. Für jede Funktion sind neben der Boole’schen Schreibweise noch die Wertetabelle und das Schaltzeichen dargestellt. Alle drei Darstellungsweisen besitzen die gleiche Aussage.

Die Wertetabelle umfasst alle möglichen Variationen der Eingangszustände und ordnet diesen die zugehörigen Ausgangszustände zu. Jede Zeile der Wertetabelle ist eine Verknüpfung der dargestellten Zustände der Eingangsvariablen – hier A und B – zum angegebenen Zustand der Ausgangsvariablen F.

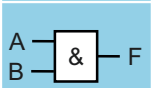
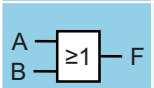
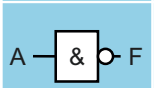
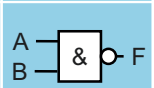
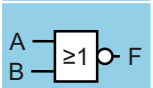
Schreibweise (DIN 66000)	AND $A \cdot B = F$	OR $A + B = F$	NOT $\bar{A} = F$	*NAND* $\overline{A \cdot B} = F$	*NOR* $\overline{A + B} = F$
Wertetabelle	A B | F 0 0 | 0 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1	A B | F 0 0 | 0 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 1	A $\bar{A}$ | F 0 1 | 1 1 0 | 0	A B | F 0 0 | 1 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 | 0	A B | F 0 0 | 1 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 0
Schaltzeichen					

Bild 9.7 Grundfunktionen und Schaltzeichen

Für n Variablen ergeben sich 2^n Zeilen für die Wertetabelle. Das bedeutet, dass die Wertetabelle für zwei Eingangsvariablen vier Zeilen umfasst und die Ausgangsvariable durch eine vierstellige Kombination der Zustände „0“ und „1“ beschrieben werden kann.

Die Variation mit Wiederholung dieser vierstelligen Zahlenkombination für die Ausgangsvariablen führt zu 16 unterscheidbaren Ausdrücken. Diese sind in Bild 9.8 dargestellt. Die obere Tabelle zeigt die Kombinationen der Eingangszustände sowie deren Verknüpfung zu den 16 möglichen Ausgangsfunktionen. Die untere Tabelle erläutert diese Verknüpfungen. Vier der dargestellten Verknüpfungen sind die bereits genannten AND-, OR-, NAND- und NOR-Funktionen (F_2, F_8, F_{15} und F_9). Außer diesen sind noch die Namen derjenigen Verknüpfungen angegeben, die als Funktionsbausteine erhältlich sind: XOR (Antivalenz, Exklusiv-OR) und XNOR (Äquivalenz).

In der dritten Spalte der Auflistung werden die Boole'schen Ausdrücke für die Funktionen F_1 bis F_{16} angegeben. Jede dieser Funktionen kann als Gleichung geschrieben werden, sie lautet z. B. für F_7:

$$F_7 = \overline{A} \cdot B + A \cdot \overline{B} \tag{9.2}$$

Diese Darstellung einer logischen Funktion wird Boole'sche Gleichung genannt. Eine Boole'sche Gleichung enthält alle Eingangsvariablen, aus denen durch logische Verknüpfung die Zustände der Ausgangsvariablen abgeleitet werden. Jedoch werden nur diejenigen Verknüpfungen der Eingangszustände aufgenommen, für die die Ausgangsvariable den Wert „1“ annimmt. Boole'sche Gleichungen sind nur aus OR-verknüpften AND-Funktionen unter Einbeziehung der Negierfunktion aufgebaut.

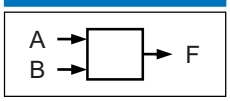
Sie lassen sich vorteilhaft aus der verbalen Formulierung logischer Bedingungen erstellen. Der Betriebszustand einer Bearbeitungsmaschine kann z. B. folgendermaßen über die

Bild 9.8 Mögliche Verknüpfungen mit zwei Eingangsvariablen A und B

Eing.		mögliche Ausgangsfunktionen F_i															
A	B	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{14}	F_{15}	F_{16}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Ausgangs-funktion	Aussage	Boolscher Ausdruck F_i	Name der Verknüpfung
F_1	nie	0	
F_2	A und B	$A \cdot B$	AND
F_3	A und nicht B	$A \cdot \overline{B}$	
F_4	gleich A	A	
F_5	B und nicht A	$\overline{A} \cdot B$	
F_6	gleich B	B	
F_7	A ungleich B	$\overline{A} \cdot B + A \cdot \overline{B}$	XOR
F_8	mindestens eines	$A + B$	OR
F_9	weder A noch B	$\overline{A} \cdot \overline{B} = \overline{A + B}$	NOR
F_{10}	A gleich B	$\overline{A} \cdot \overline{B} + A \cdot B$	XNOR
F_{11}	nicht B	$\overline{B}$	
F_{12}	A oder nicht B	$A + \overline{B}$	
F_{13}	nicht A	$\overline{A}$	
F_{14}	B oder nicht A	$\overline{A} + B$	
F_{15}	eines nicht	$\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$	NAND
F_{16}	immer	1	

Verknüpfung



	Theorem		Fortsetzung
1	$X+1=1$	2	$X+0=X$
1‘	$X\cdot 0=0$	2‘	$X\cdot 1=X$
3	$X+X=X$	4	$\overline{(X)}=\overline{X}$
3‘	$X\cdot X=X$	4‘	$\overline{\overline{(X)}}=X$
5	$X+Y=Y+X$	6	$X+\overline{X}=1$
5‘	$X\cdot Y=Y\cdot X$	6‘	$X\cdot\overline{X}=0$
7	$X+XY=X$	8	$(X+\overline{Y})Y=XY$
7‘	$X(X+Y)=X$	8‘	$X\overline{Y}+Y=X+Y$

	Fortsetzung	Benennung
9	$X+Y+Z=(X+Y)+Z=X+(Y+Z)$	Assoziative Gesetze
9‘	$XYZ=(XY)Z=X(YZ)$	
10	$XY+XZ=X(Y+Z)$	Distributive Gesetze
10‘	$(X+Y)(X+Z)=X+YZ$	
11	$(X+Y)(Y+Z)(Z+\overline{X})=(X+Y)(Z+\overline{X})$	
11‘	$XY+YZ+Z\overline{X}=XY+\overline{X}Z$	
12	$(X+Y)(\overline{X}+Z)=XZ+\overline{X}Y$	
13	$\overline{(X+Y+Z+\ldots)}=\overline{X}\cdot\overline{Y}\cdot\overline{Z}\cdot\ldots$	De Morgan
13‘	$\overline{X\cdot Y\cdot Z\cdot\ldots}=\overline{X}+\overline{Y}+\overline{Z}+\ldots$	

Bild 9.9 Theoreme der Booleschen Algebra

Zustände der Maschinenfunktionen A, B und C definiert werden:

Die Maschine befindet sich im Betriebszustand F, wenn:

- Funktion A und Funktion B den Zustand „1“ haben, oder
- Funktion B den Zustand „1“ und Funktion C den Zustand „0“ hat.

Die Boole’sche Gleichung lautet dann:

$$F = A\cdot B + B\cdot\overline{C} \tag{9.4}$$

Logische Ausdrücke, die in Form Boole’scher Gleichungen gegeben sind, lassen sich in vielen Fällen vereinfachen, insbesondere dann, wenn die Funktionen drei oder mehr Eingangsvariablen enthalten. Für diese Vereinfachung werden die im Bild 9.9 gezeigten Theoreme der Boole’schen Algebra benötigt. Die Vereinfachung ist dann sinnvoll, wenn die logische Schaltung durch diskrete Elemente (Relais, Gatter) realisiert wird. Auf diese Weise lässt sich die Zahl der Bauelemente entsprechend reduzieren.

Die Boole’sche Gleichung einer logischen Funktion lässt sich nicht in allen Fällen – vor allem nicht bei komplexen logischen Bedingungen – direkt aus der verbalen Formulierung ableiten. Um alle Eingangszustände gezielt zu berücksichtigen und zu überprüfen, setzt man eine „Wertetabelle“ als Hilfsmittel ein. In dieser werden zeilenweise alle Kombinationen der Zustände der Eingangsvariablen angeordnet. Bei jeweils nur zwei möglichen Zuständen pro Eingang umfasst die Tabelle für n Eingangsvariablen 2^n Zeilen. In einer Spalte für die Ausgangsvariable wird der Zustand eingetragen, der durch die Kombination der Eingangssignale gebildet werden soll. In der Wertetabelle sind also neben den logischen Bedingungen für den Wert „1“ der Ausgangsvariablen auch die für den Wert „0“ angegeben.

Im Bild 9.10 ist an einem Beispiel dargestellt, wie aus der Wertetabelle der Boole’sche Ausdruck für eine logische Funktion ermittelt und anschließend mit Hilfe der Theoreme vereinfacht werden kann. Betrachtet wird zunächst nur die Ausgangsvariable F_1. Ihr Zustand ist in diesem Fall eine Funktion von drei Eingangsvariablen A, B und C. Die Wertetabelle hat daher $2^3=8$ Zeilen. Sie gibt an, bei welchen Signalkombinationen von A, B und C das Ausgangssignal vorhanden bzw. nicht vorhanden ist. Um den Boole’schen Ausdruck für die Funktion der Variablen F_1 zu erhalten,

Eingänge			Ausgänge	
A	B	C	F_1	F_2
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0
0	1	0	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	0

Vollständige disjunktive Normalform für F_1

$$F_1 = \overline{A}BC + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$$

Bildung der vereinfachten disjunktiven Normalform:

$F_1 = \overline{A}BC + A\overline{B}\overline{C} + A\overline{B}C + AB\overline{C} + ABC$	Theorem:
$= \overline{A}BC + A(\overline{B}\overline{C} + \overline{B}C + B\overline{C} + BC)$	(10)
$= \overline{A}BC + A\left[\overline{B}(\overline{C}+C) + B(\overline{C}+C)\right]$	(10)
$= \overline{A}BC + A(\overline{B}\cdot 1 + B\cdot 1)$	(6)
$= \overline{A}BC + A(\overline{B}+B)$	(2‘)
$= \overline{A}BC + A$	
$F_1 = BC + A$	(8‘)
$F_2 = \overline{A}(\overline{C}+B)$	

Bild 9.10 Wertetabelle und disjunktive Normalform

schreibt man die Eingangsvariablenzustände aller Zeilen mit dem Ausgangszustand „1“ als AND-Funktionen und verknüpft diese Ausdrücke (Zeilen) durch logische OR-Funktionen (Disjunktionen). Dieser Boole'sche Ausdruck wird „vollständige disjunktive Normalform“ genannt. Durch Anwendung der Theoreme lässt sich dieser Ausdruck auf die „vereinfachte disjunktive Normalform“ minimieren. Sollte die Funktion F_1 durch ein Logiknetzwerk realisiert werden, so kann hierdurch – wie oben erwähnt – der Aufwand an Verknüpfungsgliedern durch die Minimierung erheblich verringert werden.

Enthält die Wertetabelle mehr Zeilen mit dem Zustand „1“ für die Ausgangsvariable als Zeilen mit dem Zustand „0“, müssen folglich auch deutlich mehr Terme aufgestellt werden, um den Boole'schen Ausdruck aufzustellen. In diesem Fall kann anders vorgegangen werden: man leitet einen Boole'schen Ausdruck in disjunktiver Normalform her, der nur auf Basis der Zeilen besteht, deren Ausgangsvariable „0“ ist. Anschließend negiert man den kompletten Ausdruck und enthält den endgültigen Boole'schen Ausdruck. Die zweite Ausgangskombination F_2 ist ohne weitere Herleitung direkt als Ergebnis dargestellt.

9.1.4 Karnaugh-Veitch-Diagramm

Eine andere Möglichkeit, Boole'sche Ausdrücke zu minimieren, besteht in der Anwendung des sogenannten Karnaugh-Veitch-Diagramms (KV-Diagramms), einem grafischen Minimierungsverfahren, dessen Vorteil vor allem darin liegt, dass die vielfach sehr aufwendige Anwendung der Theoreme entfallen kann.

Ein KV-Diagramm besteht aus schachbrettartig angeordneten Feldern. Wie die Wertetabelle für n Eingangsvariablen 2^n Zeilen umfasst, so enthält das KV-Diagramm 2^n Felder. Bild 9.11 und Bild 9.12 zeigen KV-Diagramme für zwei und drei Eingangsvariablen. Durch Verdopplung der Feldanzahl kann das Diagramm für jeweils eine Eingangsvariable mehr eingerichtet werden. Die Anzahl der Eingangsvariablen ist theoretisch unbegrenzt. Für die Anwendung sind jedoch KV-Diagramme mit mehr als fünf Eingangsvariablen zu unübersichtlich.

Die Eingangsvariablen werden so über den Rand der Matrix verteilt, dass alle Felder durch verschiedene Kombinationen aller Eingangsvariablen belegt werden, d. h. jede der Eingangsvariablen überdeckt die Hälfte der 2^n Felder direkt und die andere Hälfte mit ihrem negierten Wert. Zum besseren Verständnis sind die Zeilennummern der Wertetabelle in die zugehörigen Felder des KV-Diagramms eingetragen. Jedes Feld des KV-Diagramms entspricht somit einer Zeile der Wertetabelle.

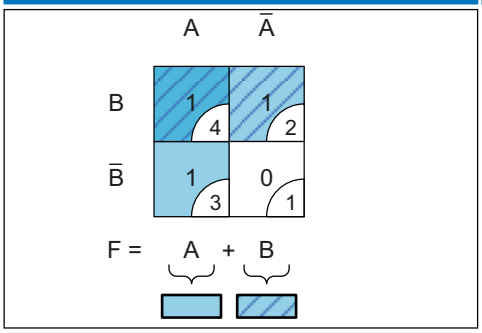
Die Zuordnung der Eingangsvariablen zu den Zeilen und Spalten des Diagramms kann man nun durch geschicktes Zusammenfassen komprimieren. Die in Zeilen bzw. Spalten benachbarten Felder eines KV-Diagramms unterscheiden sich jeweils nur durch eine Variable. Dies gilt auch, wenn das KV-Diagramm bei der praktischen Anwendung mehrfach aneinandergereiht wird, was nach allen Richtungen hin möglich ist. Bild 9.13 zeigt eine Ausführung des KV-Diagramms für vier Eingangsvariablen.

Als Beispiel für die Anwendung des KV-Diagramms soll die grafische Minimierung der Funktion aus Bild 9.10 gezeigt werden. In Bild 9.12 ist rechts die Wertetabelle angegeben. Links ist das zugehörige KV-Diagramm für die drei Eingangsvariablen A, B und C dargestellt. Als erstes werden die Zustände der Ausgangsvariablen F_1 („0“ bzw. „1“) aus jeder Zeile der Wertetabelle in das entsprechende Feld übertragen. Damit umfasst das KV-Diagramm dieselbe Information wie die Wertetabelle.

Zur Minimierung werden möglichst viele benachbarte Felder mit dem Inhalt „1“ zu rechteckigen Blöcken vereinigt, die 2, 4, 8 …, d. h. 2^m ($m = 1, 2, \ldots, n-1$) Felder umfassen können. Der Ort eines jeden einzelnen Feldes ist durch die Kombination von jeweils n Variablen definiert. Umfasst ein Block z. B. die Hälfte aller Felder des KV-Diagramms (mit gleichem Informationsinhalt), so kann er durch eine einzige Variable beschrieben werden. Kann man zwei benachbarte Felder mit gleichem Informationsinhalt (1 oder X = „Don't care“) zu einem Block zusammenfassen, so sind zur Feldlagebeschreibung nur noch $n-1$ Kombinationen erforderlich; bei vier Feldern zu einem Block nur noch $n-2$ Variablen usw.

Bild 9.11 Karnaugh-Veitch-Diagramm für zwei Eingangsvariablen *A* und *B* (am Beispiel der ODER-Funktion)

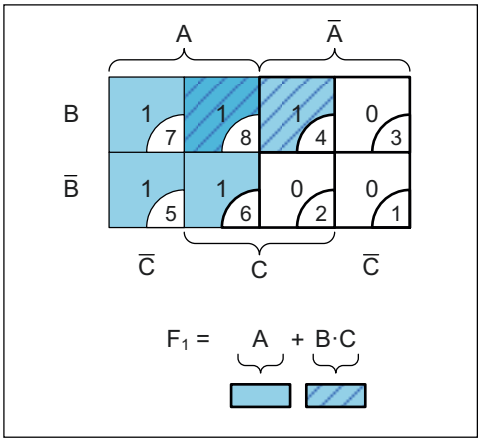
Karnaugh-Veitch-Diagramm



Wertetabelle

Nr.	A	B	F=A+B
1	0	0	0
2	0	1	1
3	1	0	1
4	1	1	1

Karnaugh-Veitch-Diagramm

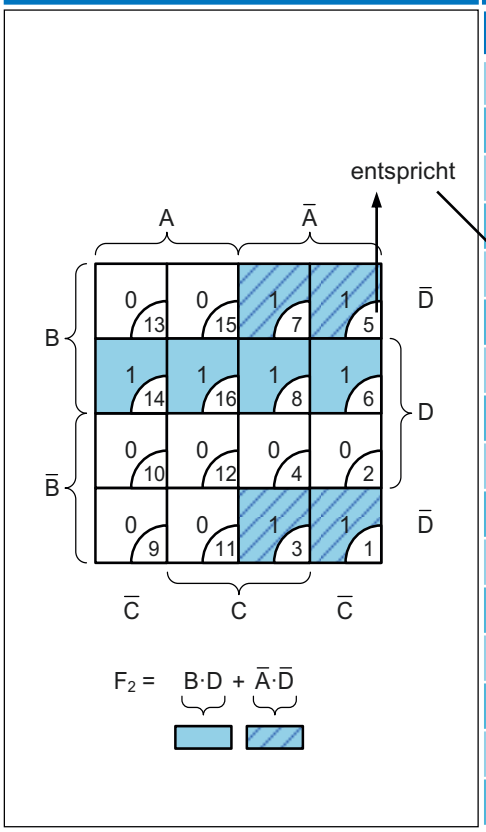


Wertetabelle

Nr.	A	B	C	F_1
1	0	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	1
5	1	0	0	1
6	1	0	1	1
7	1	1	0	1
8	1	1	1	1

Bild 9.12 Karnaugh-Veitch-Diagramm für drei Eingangsvariablen *A*, *B* und *C* (am Beispiel der Funktion F_1)

Karnaugh-Veitch-Diagramm



Wertetabelle

Nr.	A	B	C	D	F_2
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	1
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	1
6	0	1	0	1	1
7	0	1	1	0	1
8	0	1	1	1	1
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	1	0
11	1	0	1	0	0
12	1	0	1	1	0
13	1	1	0	0	0
14	1	1	0	1	1
15	1	1	1	0	0
16	1	1	1	1	1

Bild 9.13 Karnaugh-Veitch-Diagramm für vier Eingangsvariablen (am Beispiel der Funktion F_2)

Um mit dem KV-Diagramm zur minimierten logischen Funktion zu gelangen, müssen zwei Grundregeln beachtet werden. Zum einen lassen sich bei der Blockbildung Felder mehrfach in verschiedene Blöcke einbeziehen. Überlappende Blöcke sind erlaubt und zur Minimierung sogar erwünscht. Zum anderen muss berücksichtigt werden, dass „zusammenhängende Blöcke“ nicht notwendigerweise innerhalb eines Diagramms aneinander angrenzen. So bilden die vier außenliegenden Felder 1, 3, 5 und 7 des Diagramms z. B. einen zusammenhängenden Block. Gemäß Bild 9.13 lassen sich diese Felder durch $\overline{AD}$ zusammenfassen. Entsprechendes gilt für die äußeren Spalten und die vier Eckfelder des KV-Diagramms. Unter Berücksichtigung dieser Sonderfälle kann mit dem KV-Diagramm die minimierte logische Gleichung ermittelt werden. Die Gesamtlösung entsteht durch die OR-Verknüpfung aller entstandenen Blöcke sowie der evtl. verbleibenden Einzelfelder. Man erhält die minimierte logische Funktion für die Ausgangsvariable.

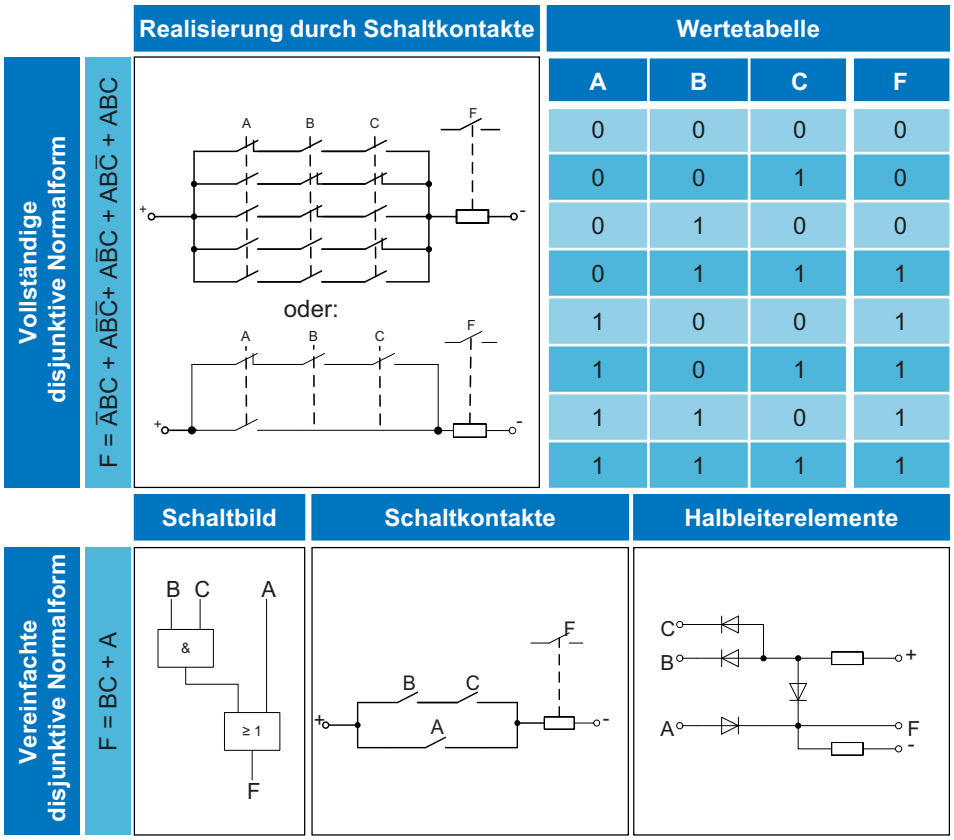


Bild 9.14 Logische Schaltung in unterschiedlicher technischer Realisierung

Wird für die beiden Beispiele in Bild 9.11 mit Hilfe des KV-Diagramms für die Ausgangsvariable F die minimierte Beschreibung bestimmt, so kann zunächst ein Block gebildet werden, der die linke Hälfte der Felder umfasst. Dies bedeutet, dass dieser Block allein durch die Variable A beschrieben wird.

Ein Feld im unteren Beispiel (Bild 9.12, obere Zeile, drittes Feld von links) ist noch nicht berücksichtigt worden. Dieses ($F_1 = A + B \cdot C$) lässt sich mit seinem Nachbarfeld, das bereits bei der vorherigen Blockbildung benutzt wurde, zu einem weiteren Block zusammenfassen. Diese beiden Felder werden durch die AND-Verknüpfung der Variablen B und C beschrieben, sodass in diesem Fall eine Beschreibung mit BC ausreicht.

Damit sind alle Felder mit einer „1“ des KV-Diagramms aus Bild 9.12 berücksichtigt und die logische Funktion für F_1 lautet:

$$F_1 = A + B \cdot C \tag{9.4}$$

Um noch einmal die Bedeutung der Minimierung logischer Gleichungen zu zeigen, ist in Bild 9.14 die Verknüpfung für die Ausgangsvariable F_1 aus Bild 9.10 als logische Schaltung mit unterschiedlichen Bauelementen realisiert. Bild 9.14 zeigt rechts die Wertetabelle und links die vollständige disjunktive Normalform, wie sie direkt aus der Wertetabelle entnommen werden kann. Die direkte Realisierung dieser Gleichung durch Schaltkontakte sowie die Vereinfachung durch Zusammenlegung paralleler Schaltkontakte sind links neben der Wertetabelle abgebildet. Die vereinfachte disjunktive Normalform mit dem zugehörigen Schaltbild und den entsprechenden Realisierungsformen durch Schaltkontakte und Halbleiterelemente ist in der unteren Bildhälfte dargestellt.

An der Schaltung, die mit Schaltkontakten aufgebaut wurde, lässt sich die erzielte Minimierung am deutlichsten zeigen. Ohne Minimierung würden, statt der tatsächlich benötigten drei Schließer, zehn Schließer und fünf Öffner, d. h. insgesamt 15 Schaltkontakte, benötigt (bzw. 10 Schalter nach dem Entfernen offensichtlich redundanter Kontakte), um die Funktion F_1 nach der Wertetabelle zu erhalten.

9.2 Bausteine

9.2.1 Realisierung der Grundfunktionen

Die Schaltzeichen für die logischen Funktionen gestatten die Erstellung von Schaltplänen für Logiknetzwerke unabhängig von der Art der technischen Realisierung der Grundfunktionen. Die Grundfunktionen sind je nach verwendeter Technik als Bausteine erhältlich und können entsprechend den

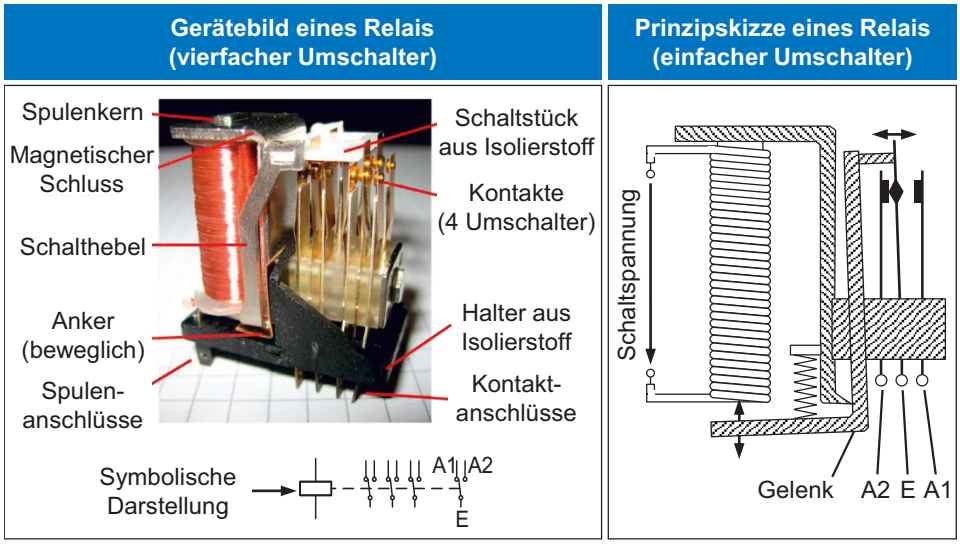


Bild 9.15 GeräteBild und Funktion eines Relais

9

Schaltplänen zu komplexen Logiknetzwerken zusammengeschaltet werden. Je nach Einsatzgebiet sind Logiknetzwerke in unterschiedlichen Techniken realisierbar.

Die einfachste Art der Realisierung logischer Funktionen geschieht unter Verwendung von Schaltkontakten, die binäre Signale bei geeigneter Verschaltung durch die Zustände „Spannung vorhanden" und „Spannung nicht vorhanden" darstellen. Bei Schaltkontakten wird zwischen Arbeits- und Ruhekontakten unterschieden. Die Ruhekontakte, also die im Ruhezustand geschlossenen Kontakte, stellen die Invertierung dar und werden durch einen Querstrich über der Variablenbezeichnung gekennzeichnet.

Werden die Schaltkontakte durch eine Magnetspule betätigt, spricht man von einem Relais. Relais ermöglichen es, einen oder mehrere Kontakte durch einen elektrischen Steuerstrom über größere Entfernungen und an unzugänglichen Stellen zu betätigen. Bei entsprechender Auslegung können durch einen kleinen Erregerstrom in der Magnetspule weit größere Ströme mit den Kontakten geschaltet werden (Leistungsverstärkung). Bild 9.15 zeigt das Gerätebild eines Relais zusammen mit einer Prinzipskizze. An der Magnetspule sitzt der bewegliche Anker. Fließt der Erregerstrom durch die Spule, wird ein Magnetfeld erzeugt und der Anker angezogen. Über einen Schalthebel wird diese Bewegung auf die Schaltkontakte übertragen. Das in Bild 9.15 gezeigte Relais (Foto) hat vier Umschaltkontakte, d. h. es werden gleichzeitig vier Kontakte geöffnet und vier Kontakte geschlossen. Durch Verschaltung von Relais ist es möglich, Logiknetzwerke beliebigen Umfangs aufzubauen.

Relais werden heute aufgrund der Verfügbarkeit kleinerer, schnellerer und preiswerterer elektronischer Bauelemente für Logikschaltungen nur noch selten eingesetzt. Relais zur Schaltung von Geräten mit höherer Leistung (Motoren, Heizspulen usw.) nennt man Schütze. Sie können einen thermischen Überlastschutz haben, d. h. das Schütz fällt ab, sobald die eingestellte Grenzleistung überschritten wird.

Logikschaltungen in Halbleitertechnik wurden erst mit der Entwicklung von Festkörper-Verstärker-Elementen, den

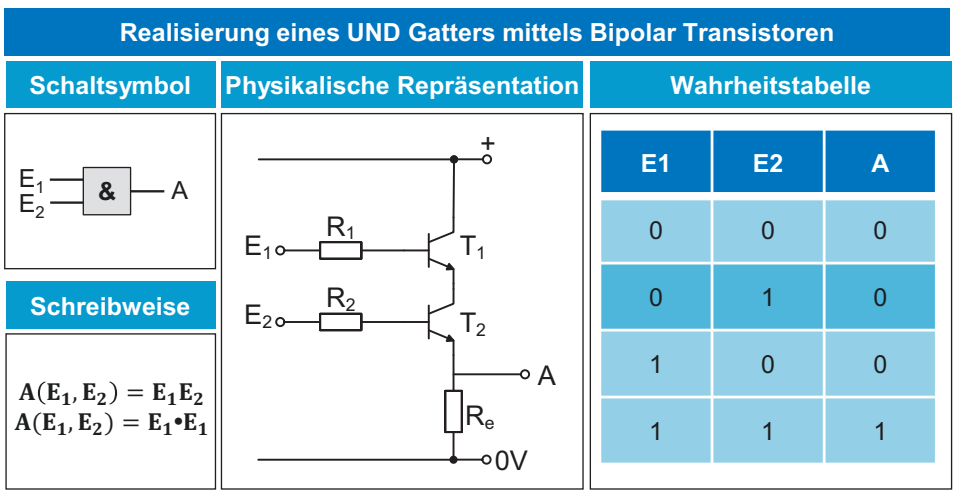


Bild 9.16 UND-Gatter realisiert mit Bipolar Transistoren

Transistoren (= transfer resistor, Übertragungswiderstand), realisierbar. Wie ein Relais ermöglicht auch ein Transistor das Schalten von Strömen mit Hilfe wesentlich kleinerer Steuerströme [DURC83]. Transistoren sind zwar analoge Bauelemente, d. h. sie können Spannungen und Ströme stufenlos verstärken; bei geeigneter Verschaltung mehrerer Transistoren kann jedoch ein nahezu digitales Verhalten erzielt werden. Solche Transistorschaltungen eignen sich hervorragend für den Einsatz in logischen Netzwerken. Beispielsweise lassen sich unter geeigneter Verschaltung im einfachsten Falle die logischen Gatter UND, ODER und NICHT realisieren, mit denen sich alle weiteren logischen Schaltungen realisieren lassen.

Bild 9.16 zeigt ein einfaches UND Gatter. Bei diesem Gatter sind zwei Transistoren in Reihe geschaltet und der Ausgang für das Digitalsignal ist als Spannungsabfall über den Emitter Widerstand R_e realisiert. Solange keiner oder nur einer der beiden Transistoren T_1 bzw. T_2 geschaltet ist, durch Einprägung eines Basisstromes, fließt kein Strom durch den Emitter Widerstand und es lässt sich folglich auch kein Spannungsabfall feststellen. Der Ausgang A liegt auf Masse und damit praktisch auf 0 V bzw. auf logisch falsch. Durch jeweils Anlegen einer Spannung an beiden Eingängen E_1 und E_2, sorgt der damit entstehende Basisstrom, dass beide Transistoren durchgeschaltet werden. Es fließt folglich ein Strom durch den Emitter Widerstand und am Ausgang A lässt sich ein Spannungsabfall in nahezu der Höhe der Versorgungsspannung verzeichnen. Am Ausgang liegt letztlich logisch wahr an.

Analog zu diesem Funktionsprinzip lassen sich die beiden anderen Gatter als eine prinzipielle Veranschaulichung der Möglichkeiten zur Realisierung digitaler bzw. logischer Schaltungen erklären. Es existieren hierüber hinaus noch weitere Techniken.

Einige Techniken der Verschaltung von Transistoren und anderen Bauelementen zu logischen Grundfunktionen sind z. B. DTL (Diode-Transistor-Logik) und TTL (Transistor-Transistor-Logik) für bipolare Schaltungen sowie MOS-FET (Metal Oxid Semiconductor-Field Effect Transistor, NMOS, PMOS) und CMOS (Complementary MOS) für unipolare Schaltungen. Der Unterschied zwischen bipolar und unipolar liegt darin, dass bei bipolaren Elementen Elektronen und Löcher am Ladungstransport beteiligt sind, wohingegen bei unipolaren (Feldeffekt-) Bauelementen nur eine Ladungsträgerart für die Stromleitung verantwortlich ist. Bild 9.17 zeigt NOT- und NAND-Elemente in den unterschiedlichen Schaltungstechniken.

Bei der Dioden-Transistor-Logik, dargestellt im oberen mittleren Teil von Bild 9.17, arbeitet der Transistor T_1 als Spannungsschalter, d. h. er wird im leitenden Zustand übersteuert. Diesem vorangeschaltet sind ein Dioden-AND-Glied (D_1, D_2, D_3, R_1) sowie ein Dioden-OR-Glied (D_5, R_3). Am Ausgang F_1 des Dioden-AND-Gliedes liegen genau dann 0 V, wenn einer der Eingänge E_1, E_2, E_3 auf 0 V liegt, da in diesem Fall die entsprechende Diode D_1, D_2 oder D_3 leitet, während die anderen beiden Dioden weiterhin sperren. Die Diode D_4 erhöht die Sperrsicherheit, sodass zwar ein vernachlässigbar kleiner Strom durch D_4 fließen kann, jedoch kein Durchschalten des Transistors T_1 hervorrufen kann. An F_1 liegt somit das Signal $F_1 = E_1 \cdot E_2 \cdot E_3$ an. Das Ausgangssignal F wird durch Invertierung von F_1 mit Hilfe des Transistors erzeugt. Bei der Transistor-Transistor-Logik, dargestellt

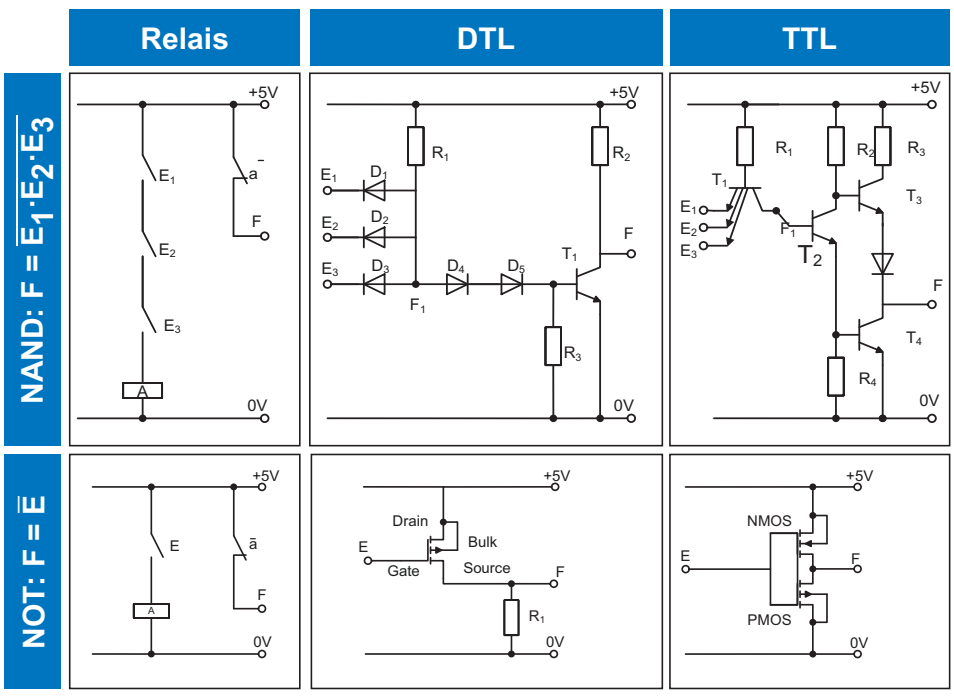


Bild 9.17 Schaltungstechniken zur Realisierung von NOT- und NAND-Gliedern

im oberen rechten Teil von Bild 9.17, wird anstelle der Dioden D_1 bis D_4 ein Multiemittertransistor (T_1) mit vergleichbarer Funktion eingesetzt. Der Transistor schaltet und zieht die Basis von T_2 auf 0 V, sobald mindestens einer der Emitter auf 0 V liegt. Damit ist auch hier das Signal am Punkt $F_1 = E_1 \cdot E_2 \cdot E_3$. Während T_2 die Diode D_5 ersetzt, dienen T_3 und T_4 als wechselseitig schaltende Transistoren zur Realisierung eines höheren Ausgangsstroms.

Ein MOS-FET besteht aus einem Halbleiterkanal (Source-Drain), dessen Leitfähigkeit durch eine zwischen den Anschlüssen Gate und Bulk (Halbleitersubstrat) angelegte Spannung nahezu leistungslos gesteuert werden kann. Man unterscheidet selbstleitende (d. h. leitend bei nicht angelegter Spannung) und selbstsperrende (d. h. nur leitend bei angelegter Spannung) sowie N- und P-Kanal-Typen (Polarität der Steuerspannung; durch Dotierung vorgegeben). MOS-FETs können zwar im Gegensatz zu Relais nur geringe Ströme schalten, dies jedoch bei äußerst hohen Schaltgeschwindigkeiten. CMOS bestehen aus je einem P-Kanal- und einem N-Kanal-Transistor, die so verschaltet sind, dass der Schaltungsausgang entweder mit der Versorgungsspannung oder mit der Masse leitend verbunden wird.

9.2.2 Erweiterte Funktionen

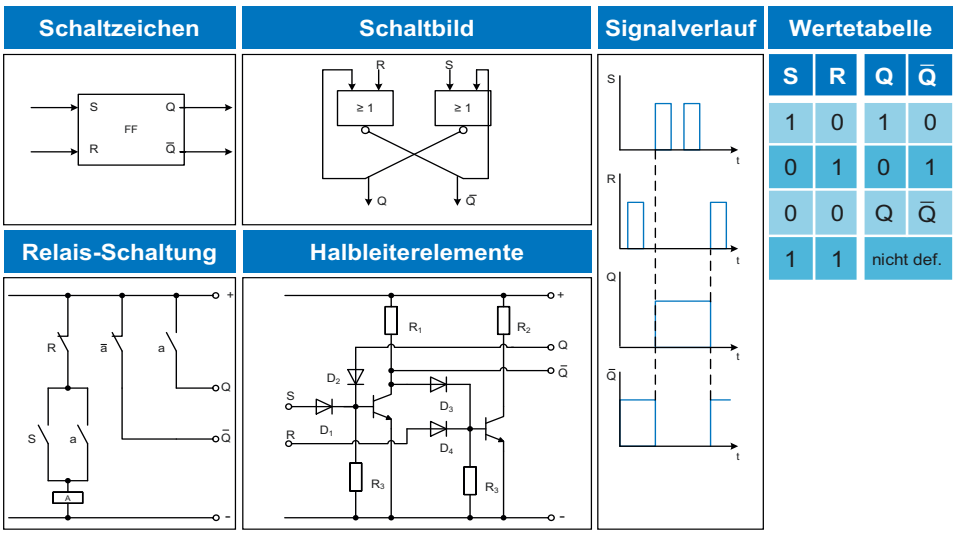
In der Steuerungstechnik können Aufgaben häufig nicht direkt durch die Grundfunktionen gelöst werden. Sie werden in Form von speziellen Schaltungen als Funktionsbausteine hergestellt [DURC83; WOLF77].

9.2.2.1 Flip-Flop

Das Flip-Flop (bistabiler Multivibrator) ist ein Bauelement, das zum Speichern eines binären Signals dient. Aus dem Schaltzeichen in Bild 9.18 ist zu ersehen, dass das Flip-Flop über je zwei Ein- und Ausgänge verfügt.

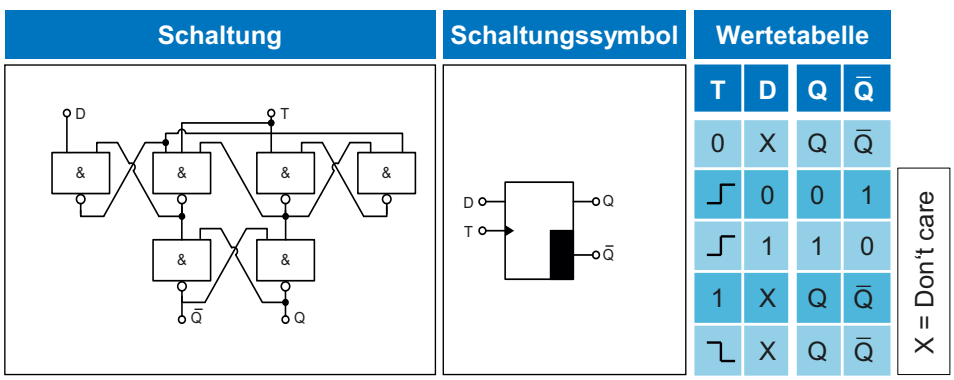
Legt man ein Signal an den Setzeingang S, so wird – nach der Wertetabelle – der direkte Ausgang Q gesetzt und so lange gehalten, bis das Flip-Flop über den Rücksetzeingang R zurückgesetzt wird, unabhängig vom zwischenzeitlichen Zustand des Eingangs S. Der Ausgang $\overline{Q}$ hat jederzeit den komplementären, d. h. entgegengesetzten Signalzustand zum Ausgang Q. Aufgrund seiner Eingangsbezeichnungen hat diese Schaltung auch den Namen R-S-Flip-Flop.

Das Schaltbild in Bild 9.8 zeigt, wie ein Flip-Flop aus zwei NOR-Funktionsgliedern aufgebaut werden kann. Der Ausgang des einen Logikelements ist jeweils auf einen Ein-



S	R	Q	$\overline{Q}$
1	0	1	0
0	1	0	1
0	0	Q	$\overline{Q}$
1	1	nicht def.	

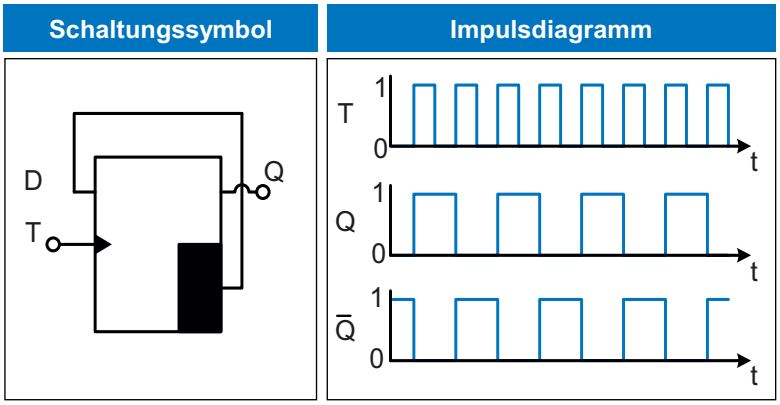
Bild 9.18 Flip-Flop-Speicher in unterschiedlicher technischer Realisierung



T	D	Q	$\overline{Q}$
0	X	Q	$\overline{Q}$
⎍	0	0	1
⎍	1	1	0
1	X	Q	$\overline{Q}$
⎎	X	Q	$\overline{Q}$

Bild 9.19 D-Flip-Flop

Bild 9.20 1 : 2-Untersetzer



gang des anderen Logikelements geschaltet, wodurch das Speicherverhalten entsteht.

9.2.2.3 Flankengetriggerte Flip-Flops

Oft werden in der Schaltungstechnik Speicherelemente benötigt, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ihre Eingangsinformation übernehmen und abspeichern. Als Beispiel für ein solches Element soll hier ein positiv flankengetriggertes D-Flip-Flop, Bild 9.19, erläutert werden.

Wechselt der Eingang T (Takt) seinen Zustand von 0 nach l (positive Flanke), wird die am Eingang D (Daten) anliegende Information auf den Ausgang übertragen. Für alle anderen Zustände des Takteingangs T (negative Flanke und statische Zustände 0 und 1) behält der Ausgang Q bzw. $\overline{Q}$ seinen logischen Wert bei, unabhängig von Änderungen am Eingang D, vgl. Wertetabelle in Bild 9.19.

1 : 2-Untersetzer

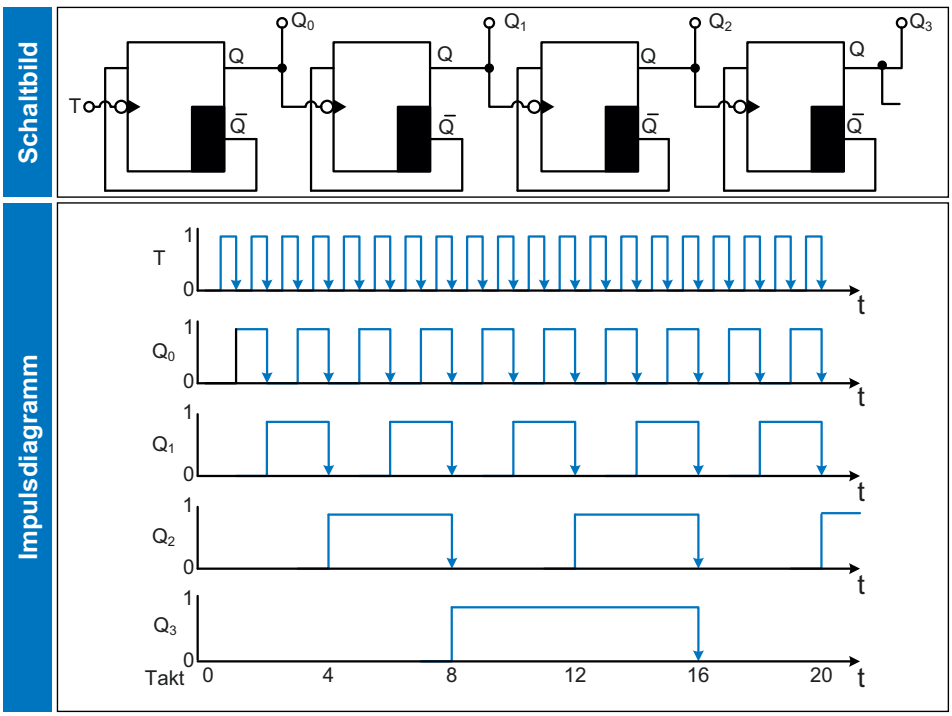
Das D-Flip-Flop dient als Grundlage für viele taktgesteuerte Schaltungen. Eine häufige Anwendung ist der 1 : 2-Untersetzer, den man durch Rückführung des invertierten Ausgangs Q auf den D-Eingang erhält, Bild 9.20.

Das Impulsdiagramm zeigt, dass der Ausgang bei jeder positiven Taktflanke gesetzt bzw. rückgesetzt wird. Die Frequenz des Eingangstaktes wird also im Verhältnis 1 : 2 geteilt.

9.2.2.4 Binärzähler

Koppelt man mehrere rückflankengesteuerte Flip-Flops, Bild 9.21, so wird jedes Flip-Flop vom vorhergehenden getaktet, das erste vom zu zählenden Eingangstakt selbst. Jede Stufe halbiert an ihrem Ausgang die Frequenz der Eingangstakte, wie das Impulsdiagramm zeigt. An den Ausgängen Q_0 bis Q_3 kann man die Anzahl der Eingangstakte als

Bild 9.21 Binärzähler, rückflankengesteuert



Dualzahl ablesen. Mit $n = 4$ Stufen lassen sich $2^4 = 16$ unterscheidbare Dualzahlen realisieren, die den Dezimalzahlen 0 bis 15 entsprechen.

Über zusätzliche statische Setz- und Rücksetzeingänge können die Zählerstufen definiert auf „0“ oder „1“ gesetzt werden, sodass der Zählvorgang bei einem vorwählbaren Anfangswert beginnen kann. Durch Vergrößern der Stufenanzahl lässt sich der Zählumfang beliebig erweitern.

Bei Benutzung der komplementären Ausgänge Q_0 bis Q_3 zur Zählanzeige kann die Anordnung mit der gleichen Zählkapazität als Abwärtszähler eingesetzt werden.

Die Funktionsweise informationsverarbeitender Geräte, die auf der Basis von Mikroprozessoren oder PCs aufgebaut sind, kann durch Programmierung (Software) festgelegt werden. Dementsprechend ist es möglich, einen Zähler durch Softwarefunktionen nachzubilden. Meist können die hardwaremäßig aufgebauten Zähler eine höhere Taktfrequenz verarbeiten, sodass diese bevorzugt eingesetzt werden. Das Gleiche gilt für Arithmetikbausteine.

9.2.2.5 Halbaddierer

Außer den Speicher- und Zählbausteinen werden in Steuerungen auch Bausteine benötigt, mit denen sich Rechenoperationen ausführen lassen. Bild 9.22 zeigt eine Schaltung, die dem Addieren von zwei einstelligen Dualzahlen dient. Die Wertetabelle gibt an, wie dies geschieht und wann ein Übertrag zur nächst höheren Ziffernstelle entsteht. Das Schaltbild wurde nach der disjunktiven Normalform, ▶ Kap. 3, aufgebaut. Dieses Logiknetzwerk eignet sich nur zur Addition einer binären Ziffernstelle. Bei mehrstelligen Dualzahlen muss der Übertrag von der niederwertigeren Stelle berücksichtigt werden.

9.2.2.6 Volladdierer und Addierwerke

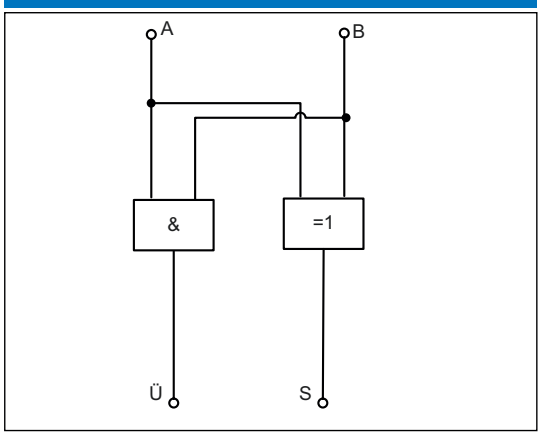
Die Volladdierer dienen dem Addieren der n-ten Stelle A_n und B_n zweier Dualzahlen A und B unter Berücksichtigung des Übertrags $\ddot{U}_{n-1}$ von der niederwertigeren Stelle. Die Wertetabelle in Bild 9.23 zeigt die Verknüpfung der Eingänge A_n, B_n und $\ddot{U}_{n-1}$ zu den Ausgängen S_n und $\ddot{U}_n$.

Der Volladdierer ist aus zwei Halbaddierern aufgebaut. Der erste Halbaddierer summiert die Ziffernstellen A_n und B_n, während der zweite den Übertrag $\ddot{U}_{n-1}$ berücksichtigt.

Durch Kombination eines Halbaddierers mit n Volladdierern lässt sich ein sogenanntes Addierwerk zur Addition zweier $(n+1)$-Bit großen Binärzahlen realisieren (Bild 9.24). Dabei summiert der Halbaddierer die beiden niederwertigeren Stellen der beiden Zahlen miteinander und führt das Ergebnis als Übertrag in den Eingang $\ddot{U}_{n-1}$ des darauf folgenden Volladdierers weiter. Ein solches Addierwerk wird Ripple-Carry-Addierer genannt, da die Summe der niederwertigeren Stelle zur Addition der nächsten höherwertigeren Stelle durchgeschoben wird. Die Addition zweier Binärzahlen durch einen Ripple-Carry-Addierer ist abgeschlossen, wenn der Übertrag der höchstwertigen Stelle in die Addition des höchstwertigen Volladdierers mit eingeflossen ist. Durch eine ungünstige Kombination zweier Binärzahlen kann es allerdings vorkommen, dass die Summe der niederwertigen Stelle die Summe der nachfolgenden Teiladditionen beeinflusst und die Berechnung des Gesamtergebnisses der Addition verzögert, da bei jeder Teiladdition der Übertrag $\ddot{U}_{n-1}$ nochmals berücksichtigt werden muss.

Da in Rechnerarchitekturen Berechnungen deterministisch ablaufen müssen um Korrektheit zu garantieren, ist der Einsatz von Ripple-Carry-Addierern jedoch ungeeignet, da die Dauer einer Addition maßgeblich von der Konstellation der Ziffern der Binärzahlen abhängig ist. Einen deterministischen Ansatz verfolgt dabei der sogenannte Serienaddierer in Bild 9.25. Ein Serienaddierer besteht prinzipiell aus drei n-Bit langen Schieberegistern, einem Volladdierer und einem 1-Bit-Speicher realisiert als positiv flankengetriggertes D-Flip-Flop. Ein Schieberegister ist ein n-Bit langer Speicher dessen Inhalt Bit für Bit wahlweise nach links oder rechts geschoben werden kann. Zwei Schieberegister werden zum

Schaltbild



Wertetabelle

A	B	S	Ü
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

Disjunktive Normalform

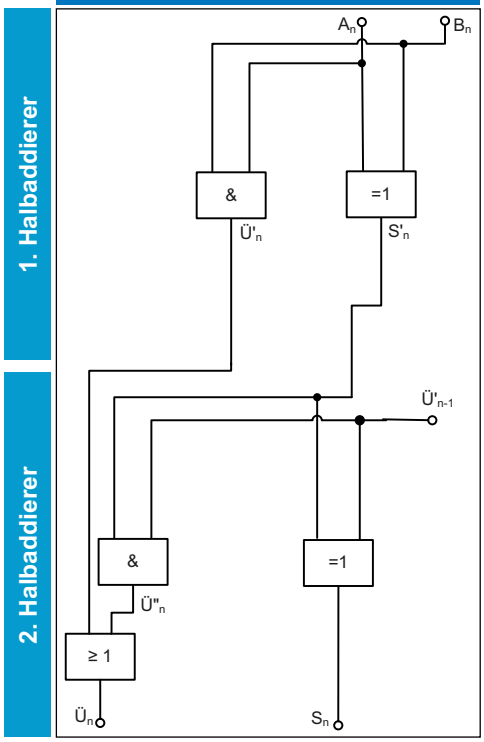
$$S = A \cdot \overline{B} + \overline{A} \cdot B$$

$$\ddot{U} = A \cdot B$$

Bild 9.22 Entwicklung eines einfachen Addierers (Halbaddierer)

Bild 9.23 Aus zwei Halbaddierern aufgebauter Volladdierer

Schaltbild



Wertetabelle

A_n	B_n	$Ü_{n-1}$	S_n	$Ü_n$
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	1	1

Formeln

$S'_n = A_n \cdot \overline{B_n} + \overline{A_n} \cdot B_n$ $\qquad Ü'_n = A_n \cdot B_n$

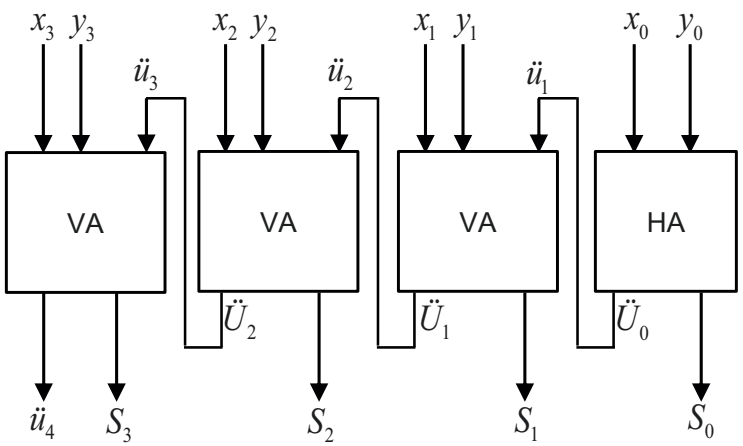
$S_n = \overline{Ü_{n-1}} \cdot S'_n + Ü_{n-1} \cdot \overline{S'_n}$

$Ü''_n = S'_n \cdot Ü_{n-1}$

$Ü_n = Ü'_n + Ü''_n$

Bild 9.24 PrinzipschaltBild eines Ripple-Carry-Addierwerks

Ripple-Carry-Addierwerk (RCA)



Worst-Case einer Addition mittels RCA

x	0	1	1	1	1
y	0	0	0	0	1
$Ü_4 S$	1	0	0	0	0

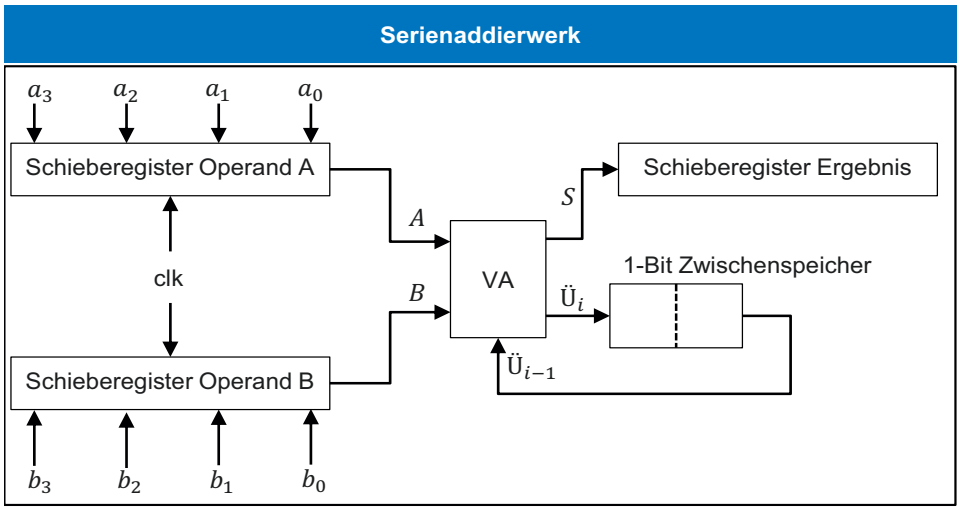


Bild 9.25 PrinzipschaltBild eines Serienaddierwerks

9

Laden der zwei Binärzahlen als Operandenregister verwendet und das spätere Ergebnis der Addition wird in ein drittes Schieberegister gespeichert.

Vor Beginn der eigentlichen Addition werden die Operandenregister mit den entsprechenden Operanden geladen, das Ergebnisregister ist geleert (enthält den Wert 0) und das D-Flip-Flop enthält den Wert 0. Der Serienaddierer führt nun jeweils eine getaktete 1-Bit-Addition vom niederwertigen bis zum höchstwertigen Bit aus. Bei jedem Takt wird die Summe der Addition in das Ergebnisregister geschoben, der Inhalt der beiden Operandenregister um eine Stelle nach rechts geschoben und der Übertrag im D-Flip-Flop zwischengespeichert. Bei der nächsten Addition im nächsten Takt fließt der aktuelle Wert im D-Flip-Flop als Übertrag $\ddot{U}_{n-1}$ in die Addition mit ein. Dieser Vorgang wird nun solange ausgeführt bis alle Bits beider Operanden verarbeitet worden sind. Da der gesamte Vorgang mittels einer Taktung deterministisch ist, liegt ein Ergebnis bei Addition

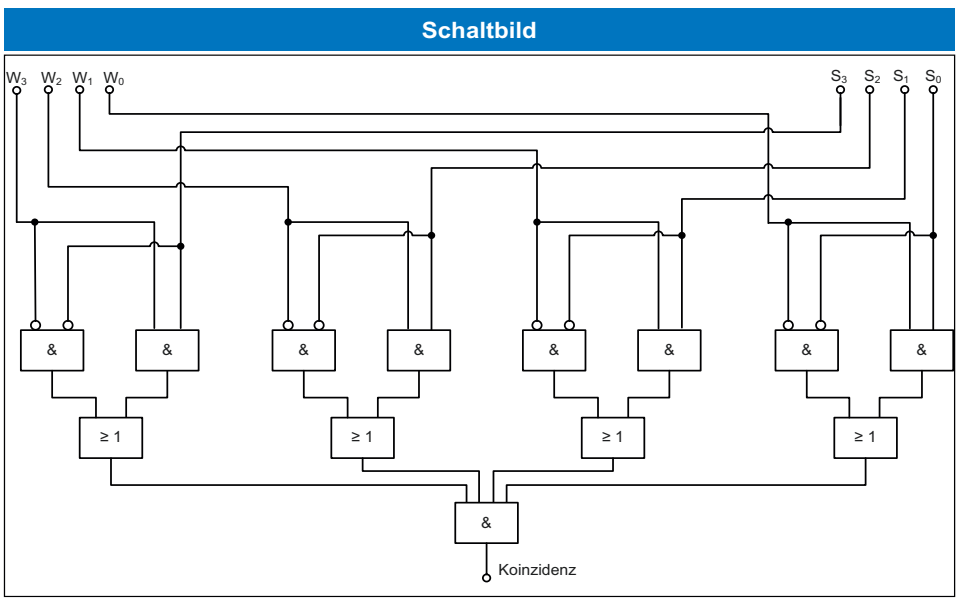
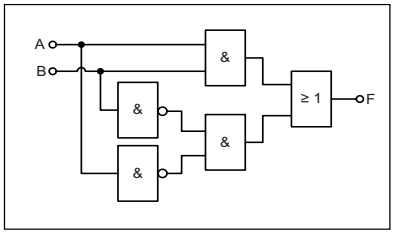


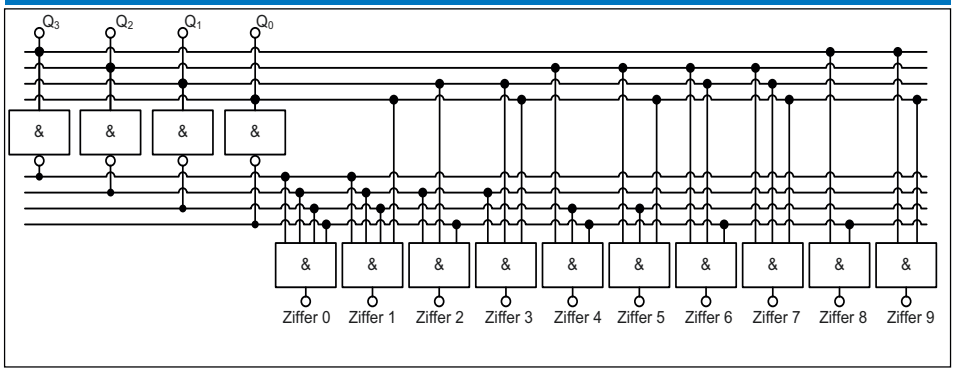
Bild 9.26 Binärer Vergleich von Soll- und Istwert



Wertetabelle		
A	B	F
1	1	1
0	1	0
1	0	0
0	0	1

Bild 9.27 Decodierung von Dezimalziffern aus dem 8 4 2 1-Code

Schaltbild



Wertetabelle

Q_3	Q_2	Q_1	Q_0	Ziffer
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	0	0	0	8
1	0	0	1	9

zweier n-Bit großen Binärzahlen nach n+1 Schritten vor – ein Takt für das Laden der Operanden und n Takte für die eigentliche Addition.

9.2.2.7 Vergleicher

Bei der Verarbeitung von Informationen ist es oftmals notwendig, die Zahlenwerte zweier Signale zu vergleichen. Bild 9.26 zeigt im unteren Teil das Schaltbild und die Wertetabelle für die logische Funktion „Äquivalenz“ (EXNOR). Das Ausgangssignal F hat den Zustand „1“, wenn die Eingangssignale A und B gleichzeitig den Zustand „1“ oder den Zustand „0“ aufweisen, d. h. die Signale äquivalent (gleichwertig) sind.

Werden mehrere dieser Schaltungen gekoppelt, so erhält man einen Vergleicher, mit dem mehrstellige Zahlen (z. B. Soll- und Istwert einer Wegposition) auf Äquivalenz geprüft werden können.

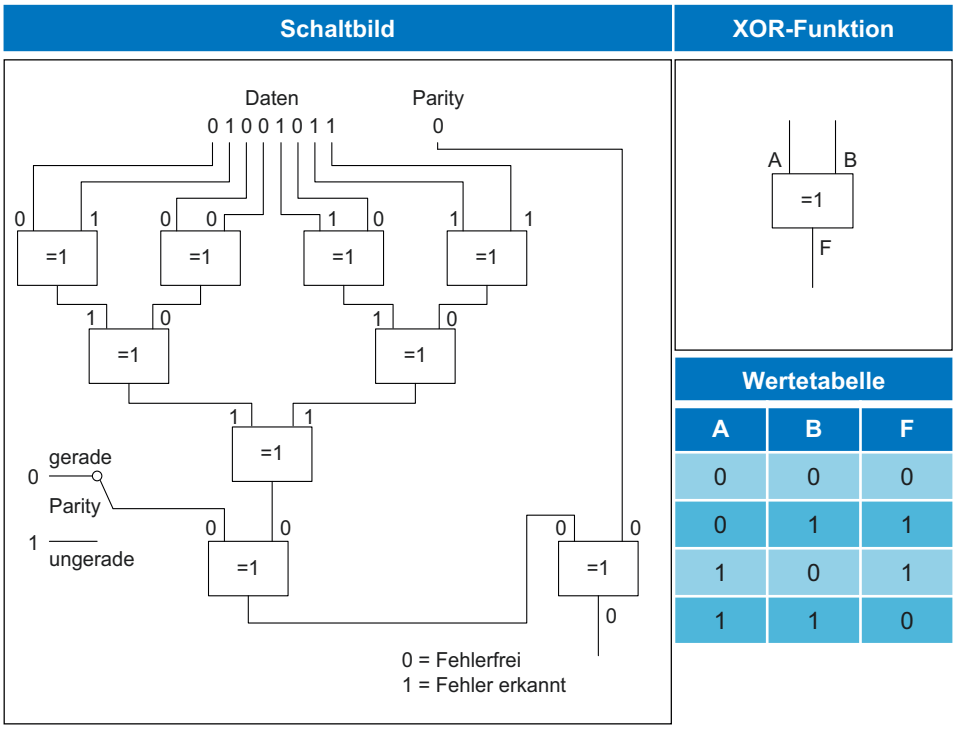
Im oberen Teil von Bild 9.26 ist ein Vergleicher für vierstellige Dualzahlen dargestellt. Der Sollwert W und der Istwert S stimmen überein (Koinzidenzsignal „1“), wenn jede der Stellen W_i mit der Stelle S_i, $i = 0 \ldots 3$, übereinstimmt. Zum Vergleich jeder Ziffernstelle i wird ein Äquivalenzelement eingesetzt, insgesamt vier. Die Ausgänge werden durch eine logische AND-Funktion zum Koinzidenzsignal verknüpft.

9.2.2.8 Decodierer

Bei dem Binärzähler, Bild 9.21, liegt der Zählerstand als Dualzahl an den Ausgängen an. In Bild 9.27 ist ein sogenannter Decodierer gezeigt, der die vierstelligen Dualzahlen entschlüsselt und eine Dezimalanzeige ansteuern kann. Die Wertetabelle, Bild 9.27, stellt die Dezimalziffern 0 bis 9 den entsprechenden Dualzahlen gegenüber.

9.2.2.9 Parityprüfer

Zur Erhöhung der Datensicherheit ist man bestrebt, bei jeder Form der Datenübertragung, sei es zwischen unterschiedlichen Rechnern oder innerhalb eines Rechners selbst, Fehler bei der Übertragung zu erkennen. Eine sehr einfache Möglichkeit, einen Teil der Übertragungsfehler feststellen zu können, ist die zusätzliche Angabe und Prüfung eines Parity-Bits. Das Parity-Bit wird beispielsweise dann gesetzt, wenn eine gerade Anzahl Bits im Datenwort den Zustand „1“ besitzen, andernfalls ist es „0“. Nach der Übertragung kann durch



Wertetabelle

A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Bild 9.28 PrinzipschaltBild eines Parityprüfers

Testen dieser Bedingung auf einfache Weise ein Fehler festgestellt werden. Dieses Verfahren versagt jedoch in dem seltenen Fall, dass zwei Fehler gleichzeitig auftreten.

Bild 9.28 zeigt das Prinzipschaltbild eines Parityprüfers für 8 Datenbits, der auch als Baustein erhältlich ist. Der Parityprüfer besteht aus einer Zusammenschaltung von XOR-Funktionen (Exklusiv-Oder, Antivalenz). Am Ausgang eines XOR-Bausteins liegt dann eine „1“, wenn nur an einem Eingang eine „1“ anliegt.

Die exemplarische Verarbeitung eines Datenbyte (8 Bit) durch einen Parityprüfer ist in Bild 9.28 dargestellt. Durch einen Umschalter kann ausgewählt werden, ob auf eine gerade oder ungerade Anzahl von „1“-Bits je Datenwort überprüft werden soll. Das Parity-Bit ist im gezeigten Beispiel 0 (fehlerfreie Übertragung vorausgesetzt), da gerade Parity angewählt ist und bereits eine gerade Anzahl „1“-Bits im Datenwort vorhanden ist. Entsprechend liegt am Fehler-Ausgang 0 an, d. h. es wurde kein Fehler erkannt.

9.2.2.10 A/D-Wandler

Damit Messwerte von einem Prozessrechner verarbeitet werden können, müssen sie in digitaler Form vorliegen. Da viele Messwertaufnehmer jedoch analoge Signale liefern, sind Prozessrechner in der Regel auch mit Schaltungen ausgerüstet, die analoge Signale in die für den Rechner geeignete Darstellungsform umwandeln. Diese Schaltungen werden Analog/Digital-(A/D-)Wandler genannt. Neben der Auflösung dieser Schaltungen, die durch die Breite des erzeugten Ergebniswortes bestimmt wird (z. B. 14-Bit-Wandler: $2^{14} = 16384$ Schritte über dem Messbereich), ist auch die schaltungstechnische Realisierung für die Leistungsfähigkeit von Bedeutung.

Die bekanntesten Verfahren zur Umsetzung von analogen in digitale Signale sind [ECKL90]:

- Spannungs-/Frequenzumsetzung,
- Rampenverfahren,
- Wägeverfahren,
- Parallelumsetzung,
- Halbparallelumsetzung,
- Sigma-Delta-Wandler.

Ein Spannungs-/Frequenzumsetzer liefert an seinem Ausgang eine dem Eingangssignal entsprechende Frequenz. Dies wird durch Lade-/Entladevorgänge realisiert. Eine Kapazität wird durch die zu messende Spannung bzw. Messspannung so lange geladen, bis die Spannung die Schwellspannung an einem Komparator überschritten hat und dieses durchschaltet. Das Durchschalten hat neben der dadurch beginnenden Entladung des Kondensators zur Folge, dass der Ausgang des Komparators so lange auf „1“ wechselt, bis die Spannung des Kondensators die Schwellspannung unterschritten hat. Je höher die Messspannung ist, desto schneller wird der Kondensator wieder geladen und desto schneller folgen die Impulse am Ausgang des Komparators aufeinander. Da Rechner keine Frequenzen direkt verarbeiten können, sondern diese durch langdauernde Zählvorgänge auswerten müssen, wird diese Form der Umwandlung im Rechnerbereich nicht eingesetzt.

Beim Rampenverfahren unterscheidet man zwischen dem Ein-, Zwei- und Vier-Rampen-Verfahren, wobei die Vorteile der letzten beiden hauptsächlich in den erzielbaren Genauigkeiten liegen. Bild 9.29 zeigt das Schaltbild eines

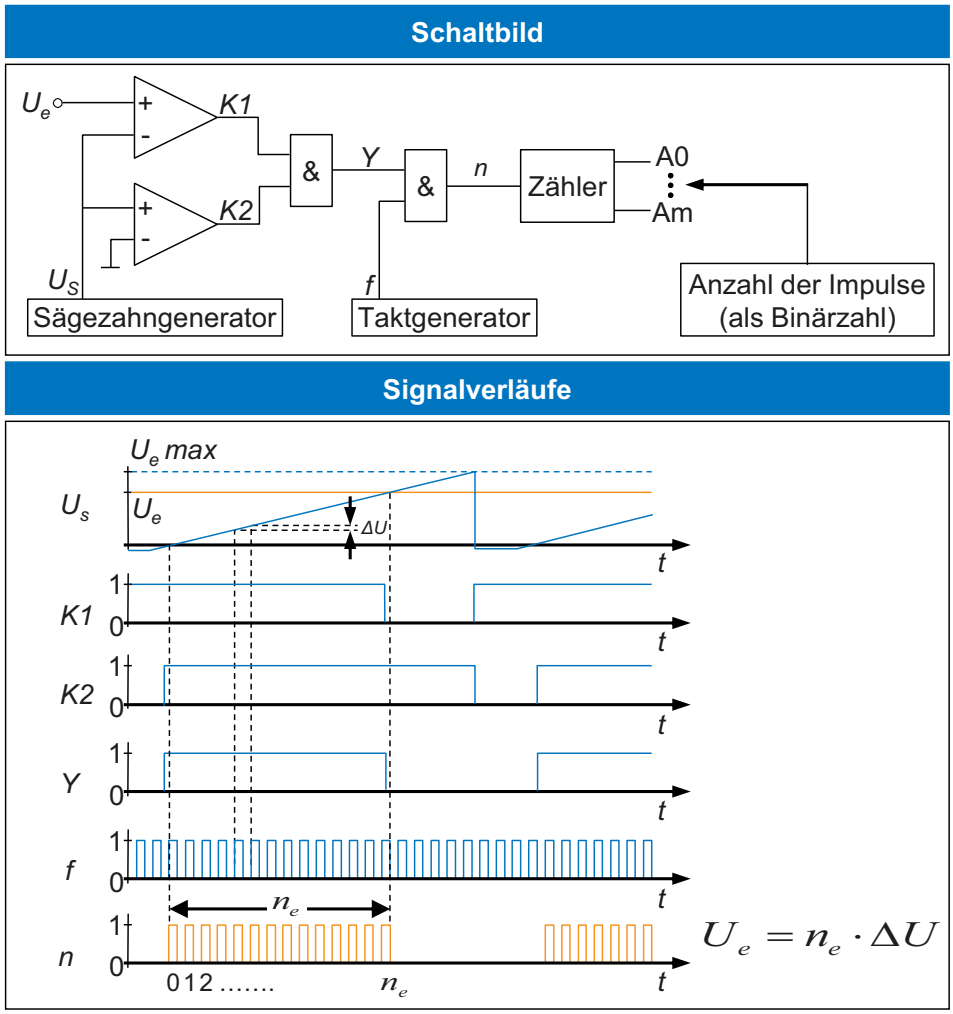


Bild 9.29 A/D-Wandler nach dem Prinzip des Ein-Rampen-Verfahrens

A/D-Wandlers nach dem Prinzip des Ein-Rampen-Verfahrens. Bei diesem Verfahren wird im Wandler die Spannung eines Sägezahngenerators kontinuierlich mit der Messspannung am Komparator *K*1 verglichen. *K*1 und das zusätzliche Vergleichsergebnis *K*2 der Sägezahnspannung mit dem Nullpotential sind an ein UND-Gatter angebunden, dessen Ausgang *Y* mit dem Taktsignal eines internen Taktgenerators über ein weiteres UND-Gatter verarbeitet wird. Je höher die Eingangsspannung ist, desto länger werden die Takte des Taktgenerators über das UND-Gatter auf den Zählereingang durchgeschleift. Damit steht am Zählerausgang nach jeder erzeugten Spannungsrampe ein zur Eingangsspannung proportionaler Digitalwert zur Verfügung.

Beim Zwei-Rampen-Verfahren wird neben der Eingangsspannung noch eine Referenzspannung aufintegriert, wodurch das Ergebnis unabhängiger von Schwankungen der Taktfrequenz und der Spannungsrampe wird. Eine weitere Verbesserung lässt sich noch durch das Vier-Rampen-Verfahren erreichen, das im Prinzip aus zwei aufeinander folgenden Zwei-Rampen-Messungen besteht.

Beim Wägeverfahren wird durch einen sukzessiven Approximationsprozess versucht, eine Spannung zu erzeugen, die gleich der Eingangsspannung ist. Dazu sind ein Vergleicher und ein Digital-Analog-Umsetzer erforderlich. Bei einem 14-Bit-A/D-Wandler nach diesem Verfahren sind genau zwölf Messschritte erforderlich, um zum Ergebnis zu gelangen. Dabei wird versucht, ausgehend von der halben maximalen Eingangsspannung durch Vergrößern der Vergleichsspannung um kleiner werdende Spannungsbeträge eine mit der Eingangsspannung identische Spannung zu erzeugen. Bei jedem Schritt wird geprüft, ob die Vergleichsspannung nach der ausgeführten Addition größer oder kleiner als die Eingangsspannung ist. Falls sie größer ist, wird die Addition zurückgenommen und mit dem nächst-kleineren Spannungsbetrag fortgefahren. Aus den durchgeführten und zurückgenommenen Additionen ergibt sich ein Bitmuster, das proportional zur Größe der Eingangsspannung ist. Dieses Verfahren ist äußerst schnell und erreicht z. B. bei einer 14-Bit-Auflösung Messzeiten von nur 3 µs pro Messung.

Die höchste Umsetzfrequenz erreichen Parallelumsetzer. Sie sind schaltungstechnisch erheblich aufwendiger als die bereits genannten Verfahren. Bei Parallelumsetzern ist für jeden möglichen Spannungszustand ein Vergleicher mit entsprechender Referenzspannung erforderlich. Damit steht

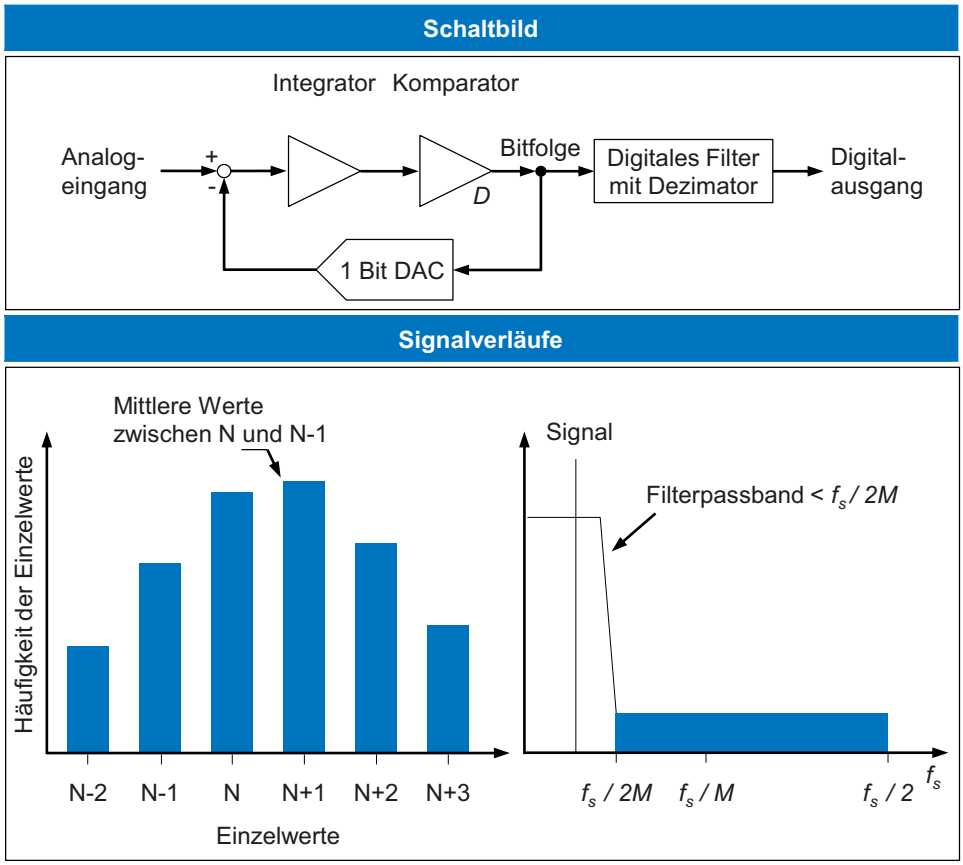


Bild 9.30 Sigma/Delta-Wandler

zwar das Messergebnis praktisch sofort nach dem Anlegen der Spannung zur Verfügung, jedoch verdoppelt sich der Aufwand mit jedem Bit zusätzlicher Auflösung (8 Bit = 2^8–1= 55 Komparatoren, 14 Bit = 16 383 Komparatoren). Um diesen Aufwand zu reduzieren, werden bei Halbparallelumsetzern für n Bits zwei Parallelumsetzer für $n/2$ Bits genutzt. In einem ersten Schritt wird das Eingangssignal über den ersten Parallelumsetzer geleitet. Das Ergebnis stellt die höchstwertigen Bits der Umsetzung dar. Ein Digital-Analog-Wandler setzt dieses Ergebnis in eine Analogspannung um, die von der Eingangsspannung subtrahiert wird. Die verbleibende Differenzspannung wird mit dem Faktor $2^{n/2}$ verstärkt und auf den zweiten Parallelumsetzer gegeben. Dessen Ergebnis stellt die niederwertigen $n/2$ Bits des Ergebnisses dar. Damit sind für einen n-Bit-Umsetzer $2 \cdot 2^{n/2}$ anstatt 2^n Komparatoren erforderlich.

Sigma-Delta-A/D-Wandler sind bereits seit den 1960er Jahren bekannt, aber erst seit den 1990er Jahren – mit der Verfügbarkeit entsprechender Halbleitertechnologie mit hoher Integrationsdichte und Geschwindigkeit – haben sie größere praktische Bedeutung erlangt. Sigma-Delta-Wandler machen sich die Methode der Überabtastung zu Nutze, um mit einfachen Komponenten eine hohe Auflösung zu erzielen. Bevor jedoch im Detail die Funktion dieser Wandler vorgestellt wird, wird das Prinzip an einem Beispiel erläutert [BLAC99].

Haupteinflussgröße für die Auflösung eines A/D-Wandlers ist das Quantisierungsrauschen. Tastet man einen Spannungspegel U mehrmals hintereinander ab, so unterscheiden sich die verschiedenen Messwerte im Rahmen dieses Quantisierungsrauschens. Die effektive Auflösung des A/D-Wandlers in Bit ist daher so definiert, dass das Quantisierungsrauschen unterhalb von 1/2 LSB (Least Significant Bit) liegt.

Wie in Bild 9.30 unten dargestellt, ergibt sich bei mehrfacher Abtastung aufgrund des Quantisierungsrauschens eine Verteilung der gemessenen Werte um den tatsächlichen Wert herum. Durch eine anschließende Mittelung kann der tatsächliche Wert aber trotz dieses Rauschens genauer bestimmt werden. Das Endergebnis ist somit genauer als die Auflösung des eingesetzten Wandlers.

Der obere Teil von Bild 9.30 zeigt, wie dieses Prinzip beim Sigma/Delta-Wandler umgesetzt ist. Im Wesentlichen besteht er aus einem Integrator, einem Komparator (entspricht 1-Bit-A/D-Wandler) und einem 1-Bit-D/A-Wandler (DAC). Das Ausgangssignal des DAC wird vom Eingangssignal abgezogen. Der verbleibende Signalanteil wird integriert und vom Komparator in ein 1-Bit Datenwort (0 oder 1) gewandelt. Das resultierende Bit gelangt über den DAC wieder zum Eingang, wo es erneut vom aktuellen Eingangssignal abgezogen wird.

Der Prozess mit der Feedbackschleife wird mit einer sehr hohen Überabtastrate durchgeführt. Die entstehende Bitfolge wird dann digital gefiltert und dezimiert, d. h. in ein

Signal höherer Bitauflösung aber niedrigerer Datenrate umgewandelt. Die Dichte der logischen Einsen im Ausgangssignal ist proportional zum Eingangssignal.

Durch die Überabtastung verteilt sich die Rauschenergie auf ein großes Frequenzspektrum, Bild 9.30 rechts. Aufgrund der anschließenden Filterung und Dezimierung liegt aber nur ein kleiner Teil des Rauschens im Nutzfrequenzband. Die Auflösung des Wandlers im Nutzfrequenzband ist somit deutlich erhöht. Dabei benötigt man im Vergleich mit anderen A/D-Wandler-Architekturen nur ein einfaches Anti-Aliasing-Filter.

Der Nachteil des Sigma-Delta Wandlers besteht in der Durchlaufverzögerung, die wesentlich größer ist, als bei anderen Wandlertypen. Im niederfrequenten Bereich (z. B. Audiotechnik) bietet er jedoch eine kostengünstige, stromsparende und hochgenaue Lösung. Aufgrund des Einschwingverhaltens des digitalen Filters eignet er sich dabei eher für kontinuierliche Messungen als für gemultiplexte Signale, da bei gemultiplexten Signalen (zwei Eingänge werden abwechselnd von einem A/D-Wandler ausgelesen) zwischen zwei Wandlungen eine Verzögerungszeit von mindestens einer Dezimationsperiode eingehalten werden muss.

9.2.2.11 D/A-Wandler

Die Umwandlung von digitalen in analoge Signale ist einerseits zur Erzeugung von Stellgrößen mit Prozessrechnern und andererseits zur Realisierung bestimmter Analog-Digital-Umsetzer erforderlich. Dabei unterscheidet man ebenfalls eine Reihe unterschiedlicher Verfahren:

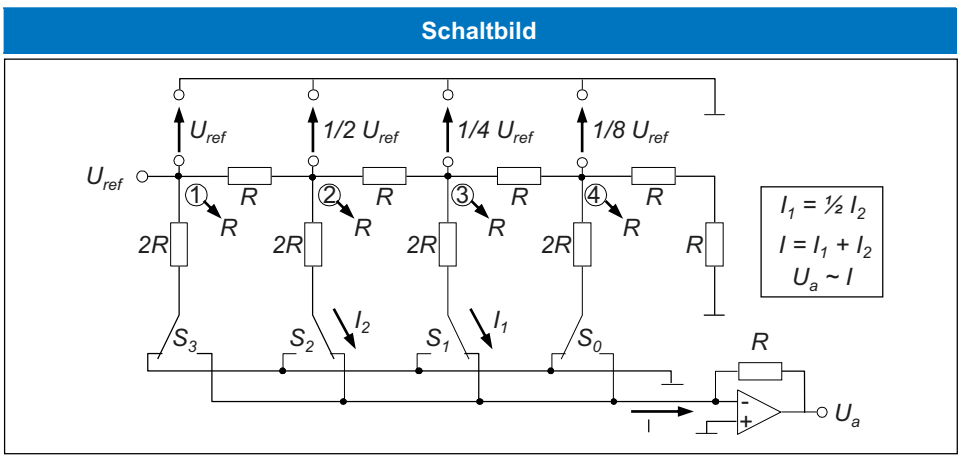
- Parallelverfahren,
- Wägeverfahren,
- R-2R-Netzwerk,
- Zählverfahren.

Auch hier erfordert das Parallelverfahren den größten schaltungstechnischen Aufwand. Über ein Widerstandsnetzwerk kann jede mögliche Ausgangsspannung über einen separaten Schalter auf den Ausgang des Wandlers gelegt werden. Welche Spannung der angelegten digitalen Information entspricht und damit welcher Schalter durchschalten soll, wird von einem sogenannten 1-aus-n-Decoder ermittelt. Ein solches digitales Netzwerk hat n Eingänge und 2^n Ausgänge, von denen nur der dem Eingangsbitmuster entsprechende geschaltet wird.

Beim Wägeverfahren ist lediglich für jedes Bit ein Schalter erforderlich. Über diesen Schalter werden entsprechend gewichtete Widerstände mit dem Ausgang verbunden. Über jeden Widerstand wird somit eine der Wertigkeit des jeweiligen Bits entsprechende Spannung auf den Ausgang gegeben. Die Summe der unterschiedlichen Spannungen entspricht dann dem angelegten Bitmuster. Realisiert man die Gewichtung der Stufen durch eine fortgesetzte Spannungsteilung, so erhält man ein R-2R-Netzwerk. Wie in Bild 9.31 dargestellt, liegt an jedem Knotenpunkt des Netzwerkes (hier 1 bis 4) eine gegenüber dem vorherigen Knotenpunkt halbierte Spannung an, da der Gesamtwiderstand des Netzwerkes von jedem Knotenpunkt aus genau R beträgt. Damit wird die Spannung von einem Knotenpunkt zum nächsten genau im Verhältnis $R/2R$ geteilt, also halbiert. Der Operationsverstärker ist so verschaltet, dass er den Strom I in eine dazu proportionale Spannung U_a umwandelt. Einen idealen Operationsverstärker vorausgesetzt, liegt der negative Eingang praktisch auf Masse-Potential, sodass unabhängig von der Stellung der Schalter S_0 bis S_4 der Strom immer gegen Masse abfließen kann. Die durch die Schalter fließenden Ströme halbieren sich also ebenso wie die Spannungen an den Knotenpunkten.

Das Zählverfahren dient der Umsetzung einer Frequenz in eine Ausgangsspannung. Dazu wird ein Schalter bei jeder steigenden Flanke am Eingang für eine bestimmte Zeit geschlossen und damit ein Kondensator langsam aufgeladen. Über die Häufigkeit dieses Ladevorgangs, also in Abhängigkeit der Eingangsfrequenz, wird die Spannung am Ausgang verändert. Höhere Schaltzahlen führen zu höheren Ausgangsspannungen. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass keine konstante Ausgangsspannung, sondern ein um den gewünschten Mittelwert oszillierender Spannungsverlauf er-

Bild 9.31 Digital/Analog-Wandler in Form eines R-2R-Standard-Netzwerkes



zielt wird. Das Unterdrücken dieser Restwelligkeit erfordert zusätzlichen schaltungstechnischen Aufwand.

9.2.3 Integrierte Schaltkreise

Halbleiterschaltungen werden in der Regel in sogenannten integrierten Schaltkreisen (IC) realisiert. Diese enthalten auf einer Fläche von nur einigen Quadratmillimetern eine Vielzahl von Bauteilen und werden für Schaltungen, die in großen Stückzahlen benötigt werden, hergestellt. Durch moderne Halbleitertechnologie können in ICs eine Vielzahl von Bauelementen auf geringstem Raum untergebracht werden. In hochintegrierten Schaltungen (VLSI = Very Large Scale Integration) werden heute hauptsächlich MOS-FETs als Schaltelemente eingesetzt.

Ein Hindernis für hohe Integrationsdichten ist die anfallende Verlustwärme. Will man Millionen von Schaltelementen auf einem Chip unterbringen, so darf jedes einzelne Element nur eine geringe Leistungsaufnahme haben. Daher erklärt sich die besondere Eignung von MOSFETs für hochintegrierte Schaltungen.

Die Anzahl der auf einem Chip herstellbaren Funktionselemente hat in den letzten Jahrzehnten drastisch zugenommen. Neben der zunehmenden Chipfläche selbst ist hierfür vor allem die Entwicklung in der Fertigungstechnologie für Silizium-Chips verantwortlich. Während 1960 kleinste Strukturen von ca. 20 µm Breite hergestellt werden konnten, werden mittlerweile Werte von 25 nm und weniger erreicht. So werden aktuelle Prozessoren in 14-bis-20-nm-Technologie gefertigt. Experten prognostizieren, dass auch Prozessoren mit Strukturbreiten von bis zu 7 nm möglich sind [STIL15]. Einzelne Prozessorkerne erreichen dazu interne Taktfrequenzen von bis zu 4 GHz.

Neben allgemein erhältlichen Prozessoren werden sogenannte eingebettete Systeme eingesetzt. Im Kontext integrierter Schaltkreise ist ein eingebettetes System grundsätzlich ein Mikrochip bestehend aus einer Ansammlung verschiedener elektrischer Baugruppen, die unterschiedliche Funktionen erfüllen und zur Gesamtfunktionalität des Systems beitragen. Häufig in diesem Kontext eingesetzte sogenannte Mikrocontroller bestehen neben einer CPU und einem RAM Speicher ebenfalls aus D/A Wandlern, Flash Speicher, ROM Speicher, Busschnittstellen, digitale Ein- sowie Ausgängen und weitere spezielle Mikrochips. Die in Mikrocontrollern eingesetzten CPUs haben eine Datenwortbreite von 8 bis 32 Bit mit einer Taktrate zwischen einem und 32 MHz (unter Verwendung von Quarzoszillatoren). Der RAM Speicher hat typische Größen im Bereich 128 Byte bis 8 Megabyte. Neben dem RAM kommen häufig ROMs zum Einsatz, um wichtige für die Auswertung von Sensorinformationen bzw. Ansteuerung von Aktoren notwendige Schritte korrekt durchzuführen.

Im Gegensatz zum flüchtigen „Random Access Memory", bleiben Daten in einem „Read-Only Memory" auch nach Abschalten der Versorgungsspannung dauerhaft gespeichert. Der Inhalt des ROMs ist fest verdrahtet und kann somit nach dem Herstellungsprozess nur noch gelesen aber nicht beschrieben werden. RAMs dagegen können dynamisch mit Daten wiederbeschrieben werden. Heutzutage werden ROMs kaum eingesetzt, da diese durch sogenannte „Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory" (kurz EEPROM) ersetzt wurden. Diese können analog zu RAMs auch wiederbeschrieben werden. Der Unterschied liegt zum einen in der Fähigkeit, Daten auch nach Abschalten der Versorgungsspannung dauerhaft zu speichern. Dies ist bei EEPROMs der Fall, während dies bei RAMs nicht möglich ist. Ein weiterer Unterschied liegt in der Schreibgeschwindigkeit. Während RAMs für hohe Schreib- und Lesezyklen ausgelegt sind, benötigen EEPROMs mehr Zeit, um Daten zu speichern.

In zunehmendem Maße werden auch anwendungsspezifische, integrierte Schaltungen bei der Entwicklung neuer Systeme und Geräte eingesetzt (sogenannte ASICs, Application Specific Integrated Circuits). Bei der IC-Herstellung werden die vom Schaltungsentwickler entworfenen, elektronischen Funktionen in geometrische Strukturen auf dem Halbleitermaterial umgesetzt. Dazu sind mehrere hochpräzise photolithographische Arbeitsschritte erforderlich. Um die Herstellungskosten zu reduzieren, werden Bauelemente (ASICs) angeboten, bei denen nicht mehr alle Herstellungsschritte nach Angaben des Kunden erfolgen, sondern z. B. nur noch die Verdrahtung der Grundelemente. Das Zusammenstellen eines IC aus fertigen Bibliothekselementen ist möglich [HAGE93; PALO13]. ASICs werden unterteilt in die Entwurfsformen *Full-Custom*, *Semi-Custom* und *programmierbare Logik* [PALO13].

Bei einem vollständig kundenspezifischen ASIC-Entwurf (*Full-Custom*) ist der gesamte Chipentwurf, die Integrationsdichte, die Verlustleistung etc. auf die jeweilige Anwendung optimiert. Aufgrund des hohen Entwicklungsaufwandes ist diese Entwurfsform mit den größten Kosten verbunden. Ein *Semi-Custom* Entwurf sieht die Verwendung von Standard-ICs vor, die für die Realisierung der Applikation kundenspezifisch verschaltet werden. ASICs des Typs *programmierbare Logik* sind hingegen vollständig standardisierte Chips. Die kundenspezifische Konfiguration erfolgt durch die Verwendung von FPGA (Field Programmable Gate Array) und PLD (Programmable Logic Device), deren interne logische Schaltkreise programmiert werden können. Die Chips dieses Typs unterscheiden sich lediglich in Ausstattung und Geschwindigkeit [PALO13].

Ein ASIC des Typs *programmierbare Logik* besteht im Prinzip aus einer Gitterstruktur, ähnlich einer zweidimensionalen Matrix mit *n* horizontalen und m vertikalen Ein- und Ausgängen. Die Felder des Gitters enthalten jeweils einen vertikalen und einen horizontalen Eingang *x* bzw. *y*, und einen vertikalen

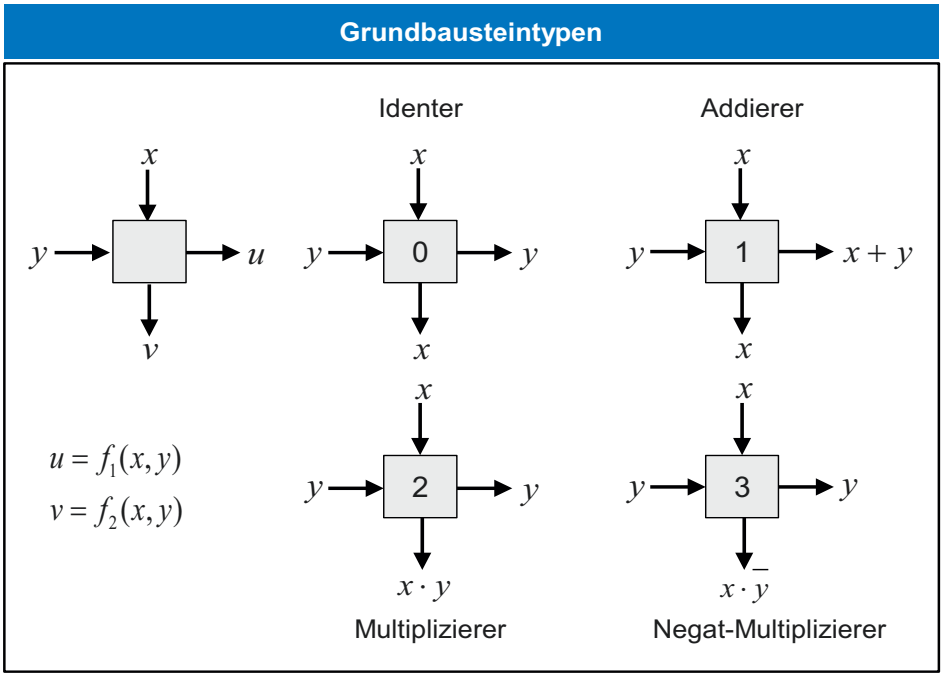


Bild 9.32 Grundbausteintypen einer programmierbaren Logik

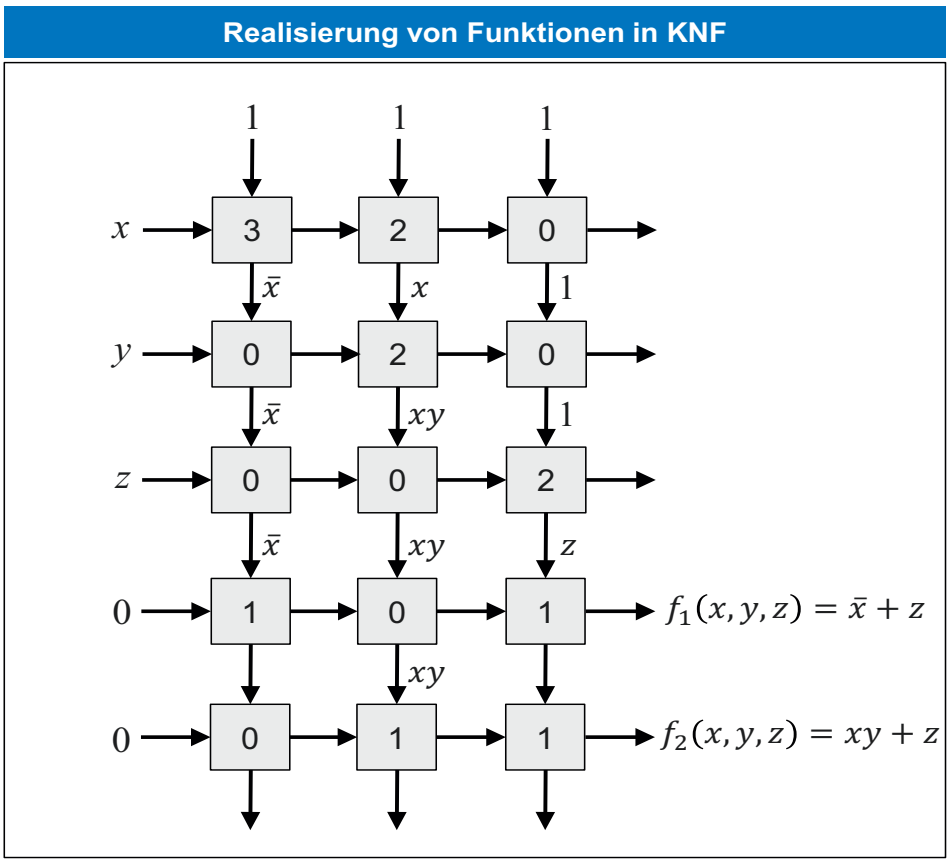


Bild 9.33 Funktionsrealisierung in programmierbaren Logiken

und einen horizontalen Eingang v bzw. u. Jedes Feld des Gitters lässt sich nun so beschreiben, dass eine Verschaltung des horizontalen mit dem vertikalen Eingang mit Hilfe von vordefinierten Schaltfunktionen in einem Gitterpunkt für jeden Ausgang realisiert wird – $u = f_1(x, y)$ bzw. $v = f_2(x, y)$.

Grundsätzlich werden ASIC des Typs programmierbare Logik unterteilt in beschreibbare und wiederbeschreibbare programmierbare Logiken. Eine sogenannte „Programmable Array Logic“ (kurz PAL) ist eine programmierbare Logik, die einmalig beschreibbar ist. Die Gitterpunkte die-

ser Logik besteht aus UND sowie ODER Gattern, wobei die UND Gatter frei programmierbar und die ODER Gatter fest verdrahtet sind. Im unbeschriebenen Zustand sind alle Verbindungen vorhanden. Die Programmierung eines solchen ASICs erfolgt nun durch gezielte Zerstörung von Verbindungen zu UND Gattern durch Überspannung. Einmal zerstörte Verbindungen können nicht wiederhergestellt werden, weshalb eine Programmierung nur einmal möglich ist.

Weiterhin ist ein sogenanntes „Programmable Logic Array“ (kurz PLA) eine programmierbare Logik, die wiederbeschreibbar ist. Die Programmierung hier erfolgt durch wahlweises Beschreiben einzelner Gitterpunkte zu festen Zuständen, sodass eine Funktion im jeweiligen Gitterpunkt mittels wohl definierten Grundbausteinen realisiert wird.

Prinzipiell werden dabei die folgenden 4 Grundbausteine zur Schaltungsrealisierung verwendet, wie in ◘ Bild 9.32 dargestellt:

1. Identer: $u = y$ $v = x$
2. Addierer: $u = x + y$ $v = x$
3. Multiplizierer: $u = y$ $v = x \cdot y$
4. Negat-Multiplizierer: $u = y$ $v = x \cdot y$

Die Bausteine sind so konzipiert, dass immer ein Eingangssignal auf einen Ausgang nach unten bzw. nach rechts geleitet wird bzw. mit dem anderen Eingangssignal zusammen verschaltet wird. Der Identer schleift beide Eingangssignale auf die entsprechenden Ausgangssignale durch. Im unbeschriebenen Zustand besteht eine programmierbare Logik grundsätzlich aus Identern. Der Addierer führt eine ODER-Operation auf beiden Eingangssignalen durch und leitet das Signal nach rechts weiter. Der Multiplizierer führt eine UND-Operation auf beiden Eingangssignalen durch und leitet das Ergebnis nach unten weiter. Der Negat-Multiplizier führt die gleiche Operation aus wie der Multiplizierer mit dem Unterschied, dass der vertikale Eingang y vor der UND-Operation negiert wird. Die Grundbausteine sind so aufgebaut, dass sich Schaltfunktionen in konjunktiver Normalform, wie in ◘ Bild 9.33, realisieren lassen. Die Anzahl der Spalten entspricht der Anzahl von Termen in allen zu realisierenden Schaltfunktionen. Die Anzahl der Zeilen entspricht der Anzahl der unterschiedlichen Variablen in allen Schaltfunktionen und der Anzahl der zu realisierenden Schaltfunktionen. An den Zeilen an deren Ausgang die Schaltfunktionen realisiert werden (Ergebniszeilen), wird jeweils der Binärwert 0 angelegt. Die Terme werden nun von oben nach unten mittels Multiplizierer und Negat-Multiplizierer gebildet. In den Ergebniszeilen werden anschließend alle Terme mittels Addierer aufsummiert.

9.2.4 Bedien- und Anzeigeelemente

Logische Verknüpfungen lassen sich in unterschiedlicher Technik (z. B. elektronisch oder elektrisch) realisieren und in Steuerungsgeräten einsetzen, vgl. ► Kap. . Die Eingangssignale der Logiknetzwerke werden von den Bedienelementen und Signalgebern erzeugt, während die Ausgangssignale Anzeigeelemente oder Antriebe (Ventile, Kupplungen, Motoren usw.) ansteuern. Nachdem früher im Werkzeugmaschinenbereich vorwiegend elektrische Steuerungen eingesetzt wurden, verfügen heutige Werkzeugmaschinen über elektronische Steuerungen. Im Folgenden werden einfache, grundlegende Bauelemente für Ein- und Ausgabegeräte in elektronischen Schaltungen beschrieben [BAIL74; FLEI85; FRIS78; HÄUS80; HILB92; TIET93; LEHM74; LEHM83].

◘ Bild 9.34 zeigt die Schaltzeichen der gebräuchlichsten Schaltglieder und Anzeigeelemente nach DIN EN 60617 [DIN97]. Die Schaltglieder können als Signalgeber eingesetzt werden. Je nach Art des Antriebs der Schalter können z. B. Druck- oder Temperaturfühler realisiert werden. Die Signalgeber können als Tast- oder Rastschalter ausgebildet sein, die sich nur in ihrer Bedienungsfunktion unterscheiden. Bei Tastschaltern bleiben die Kontakte so lange betätigt, wie die Betätigungskraft wirkt. Danach kehren die Kontakte durch Federkraft in die Ruhelage zurück. Rastschalter dagegen müssen durch eine Betätigungskraft wieder in ihre Ausgangslage zurückgestellt werden. Tast- und Rastschalter können mit mehreren Kontakten (Öffner und bzw. oder Schließer) bestückt sein.

Bei NC-Maschinen ist es zudem erforderlich, Signalwerte als digitale Zahl anzugeben und möglicherweise zusätzlich durch erläuternden Text zu ergänzen. Für diese Aufgaben wurden unterschiedliche Anzeigeelemente entwickelt.

In ◘ Bild 9.25 ist der prinzipielle Aufbau einer 7-Segment-, einer 16-Segment-, einer 5/7-Matrix- und einer LCD-Anzeige dargestellt. Weiterhin wird gezeigt, welche Segmente zur Darstellung von Buchstaben und Ziffern angesteuert werden. Durch die Kombination mehrerer Anzeigeelemente sind ganze Textzeilen darstellbar. Mit der Matrixanzeige können beliebige Zeichen und bei entsprechender Anzahl Pixel auch ganze Grafiken dargestellt werden (LCD- oder El.-Lumineszenz-Flachbildschirme).

Die Ansteuerung der einzelnen Segmente oder Punkte erfolgt über Decodierschaltungen, die ihre Information von Logiknetzwerken oder programmierbaren Geräten erhalten.

9.2.5 Rechner

Die hohe Integrationsdichte elektronischer Schaltungen führte zu einem stetigen Anwachsen digitaler Elektronik und der Entwicklung hin zu digitalen Rechnern, die prinzipiell eine Integration digitaler Elektronikkomponenten waren. Je

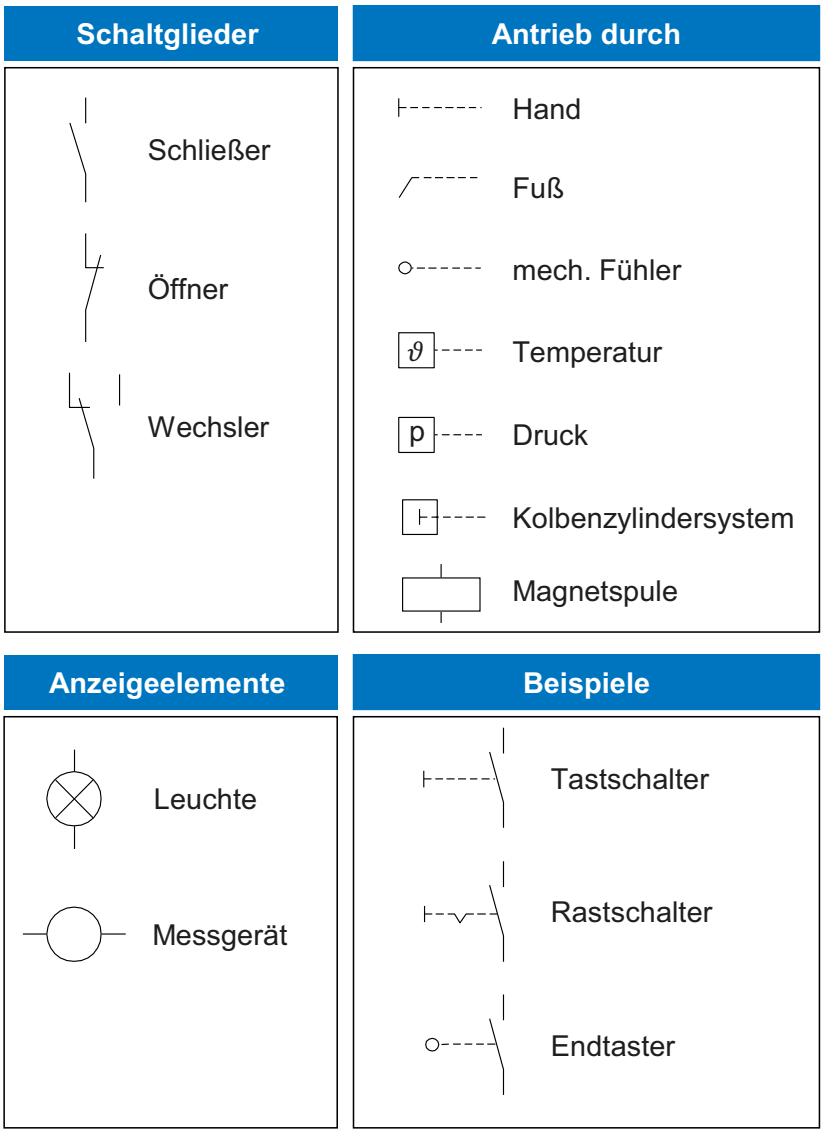


Bild 9.34 Bedien- und Anzeigeelemente

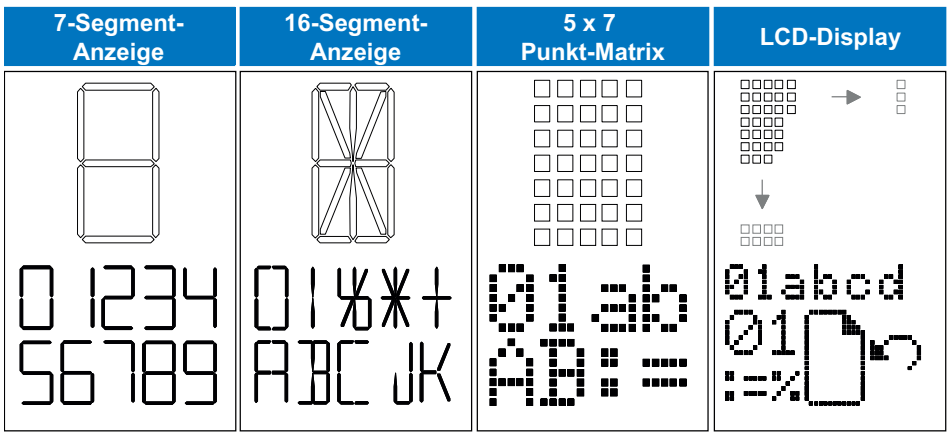


Bild 9.35 Darstellung von Ziffern und Buchstaben mit unterschiedlichen Anzeigeelementen

nach Anforderungen und Ziel ergaben sich im Laufe der Jahre verschiedene Architekturen, auf deren Basis heutige Computer und andere Rechenmaschinen aufgebaut sind. Die Architekturen unterscheiden sich im Grunde in der Art des Schaltungskonzeptes bezüglich Befehls- und Datenspeicher. Zwei wichtige und bekannte Rechnerarchitekturen sind die Harvard-Architektur und die Von-Neumann-Architektur.

Die Harvard-Architektur ist ein Schaltungskonzept, bei dem Befehlsspeicher und Datenspeicher logisch und physisch voneinander getrennt sind. Historisch hat der Name seinen Ursprung in der Entwicklung des elektromechanischen Computers Mark I, der in Kooperation zwischen IBM und Harvard-Universität entwickelt wurde. Die logische Trennung ergibt sich aus verschiedenen Adressräumen und Maschinenbefehlen, die speziell für den Zugriff auf die beiden Speicherbereiche definiert sind. Die physische Trennung ist mit zwei getrennten Speichern realisiert, die unabhängig voneinander über zwei verschiedene Datenbusse angeschlossen sind. Der Vorteil dieser Architektur liegt darin, dass Daten und Befehle gleichzeitig in einem Zyklus geladen bzw. geschrieben werden können. Durch die physikalische Trennung von Befehls- und Datenspeicher kann eine Zugriffsrechtetrennung und ein Speicherschutz einfach realisiert werden. Somit kann nicht versehentlich, bei unabsichtlichen oder absichtlichen Softwarefehlern, Programmcode überschrieben werden. Ein Nachteil an dieser Architektur ist der Einsatz zusätzlicher Elektronikkomponenten zur Realisierung.

Die Von-Neumann-Architektur ist ein Schaltungskonzept, benannt nach dem Mathematiker John von Neumann, dass das Prinzip eines universellen Rechners beschreibt, der ein variables Programm unter minimalem Einsatz von Hardware ausführen kann. Hierbei liegen Programm und Daten in einem gemeinsamen Speicher. Weiterhin beschreibt das Konzept eine systematische Aufteilung in entsprechende Funktionsgruppen mittels spezialisierter Schaltwerke, sodass eine flexible und effizientere Strukturierung von Operationen durchführbar ist. Die meisten der heutigen Computer basieren auf dem Grundprinzip dieser Architektur und wurden im Laufe der Zeit, je nach Bedarf, modifiziert.

Die wichtigsten Komponenten der Von-Neumann-Architektur sind das Rechenwerk (engl. Arithmetic Logic Unit, kurz ALU), das Steuerwerk (engl. Control Unit), der Speicher (engl. Memory) und das Eingabe-/Ausgabewerk (engl. I/O-Unit). Die Von-Neumann-Architektur zeichnet auch eine Trennung zwischen verschiedenen Speicherkategorien auf – angefangen bei den CPU-nahen Speichern, wie Register und Cache-Zwischenspeicher, die sich selbst auf der CPU befinden, über RAM-Speicher hin zu Festplatten oder optischen/elektronischen Medien. Daraus ergibt sich ein Nachteil dieser Architektur, nämlich der sogenannte „Von-Neumann-Flaschenhals“. Dieser bezeichnet die Verbindung zwischen Speicher und Prozessor, durch die die Daten und der Programmcode transportiert werden müssen.

Aufgrund der relativ hohen Taktrate des Prozessors und der dazu relativ niedrigen Taktrate des Speichers, ist der Prozessor nicht in der Lage, die Daten in der Geschwindigkeit abzuarbeiten wie vorgesehen. Dies wird jedoch durch Zwischenspeicher, sogenannte Caches, die sich direkt auf dem Prozessor befinden, kompensiert, sodass immer direkt Datenblöcke anstatt einzelne Instruktionen nachgeladen werden. Eine wichtige Komponente in der Von-Neumann-Architektur ist das Rechenwerk. Das Rechenwerk ist eine Hardwarekomponente, die die üblichen arithmetischen und logischen Operationen für den Prozessor bereitstellt. Übliche Operationen sind Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division, logische Verknüpfungen der Boole'schen Algebra und Schiebeoperationen. Dazu besitzt eine ALU ein Akkumulator-, ein Operanden- und ein Ergebnisregister. Daneben besitzt es ein Statusregister, in dem bestimmte Bits gesetzt werden, wenn bei der letzten Operation ein bestimmter Fall eingetreten ist – z. B. wenn ein Übertrag vorhanden ist, das Ergebnis null war oder ein Überlauf vorhanden ist.

In beiden Architekturen muss der Prozessor durch drei Phasen Instruktionen aus dem Speicher verarbeiten. Zunächst wird die Instruktion aus dem Speicher, in der sogenannten Fetch-Phase, geladen. In der zweiten Phase, der Decode-Phase, wird die Instruktion interpretiert. In der darauf folgenden Execute-Phase wird die Instruktion ausgeführt, und es werden weitere Daten nachgeladen bzw. die nächste Instruktion geladen. Um nun eine effizientere Verarbeitung von Befehlen zu ermöglichen, wird ein sogenannter Pipelining-Mechanismus eingesetzt, durch den noch mehr Instruktionen in kürzerer Zeit verarbeitet werden können. Hierfür wird, sobald eine Instruktion die Fetch-Phase passiert hat und in die Decode-Phase übergegangen ist, direkt die nächste Instruktion geladen und in die Fetch-Phase gesetzt. Im nächsten Zyklus befinden sich die zuerst geladene Instruktion bereits in der Execute-Phase, die zweite Instruktion in der Decode-Phase und die nächste neue Instruktion in der Fetch-Phase. Somit können, während eine Instruktion bereits in der Ausführung ist, schon zwei weitere Instruktionen vorbereitet werden, um so den Durchsatz zu erhöhen.

9.3 Kommunikation in der Automatisierungstechnik

9.3.1 Anforderungen an die Kommunikationstechnik

Auf den verschiedenen Ebenen der Automatisierungspyramide bestehen spezifische Anforderungen an die eingesetzte Kommunikationstechnik (vgl. ◘ Tab. 9.1). Auf den oberen Ebenen ist die zu übertragende Datenmenge groß. Auf Feld- bzw. Sensor-/Aktor-Ebene bestehen erhöhte Anforderungen

Tab. 9.1 Anforderungen an die Kommunikationstechnik

Ebene Automatisierungspyramide	Anwendungen	Anforderungen					
		Datenmenge pro Sekunde	Übertragungszuverlässigkeit	Antwortzeiten	Störeinflüsse	Zu überbrückende Distanz	Deterministische Übertragung
Leitebene	Internet, Büro	MBytes	Gering	Minuten	Gering	Kilometer	nein
Prozessebene	SCADA, HMI, Engineering, Diagnose	KBytes	Mäßig	Sekunden	Mäßig	Meter	nein
Steuerungsebene	SPS, Soft-SPS, Motion Control	Bytes	Erhöht	Millisekunden	Erhöht	Meter	nein
Feldebene	Dezentrale E/As, Antriebe mit veränderbaren Drehzahlen, Servoantriebe	Bits	Hoch	Mikrosekunden	Hoch	Meter	ja

hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und Sicherheit der Übertragung von Daten unter verschiedenen Störeinflüssen, wie Schmutz, Erschütterung, elektromagnetischen Wellen und Flüssigkeiten, sowie Anforderungen zur Gefahrenabwehr für Mensch, Maschine und Umwelt (vgl. ► Kap. 10.4.1). Integrationsmöglichkeiten zwischen Anwendungen der automatisierten Anlage innerhalb einzelner Ebenen der Automatisierungspyramide (horizontale Integration) und auch ebenen übergreifend (vertikale Integration) sind eine wichtige Voraussetzung für eine umfassende Informationsverfügbarkeit und Steuerbarkeit der Anlage und stellen zusätzliche Anforderungen an die eingesetzte Kommunikationstechnik. Das betrifft zum einen die eingesetzten Hardwarekomponenten wie Stecker, Kabel und Hutschienen, zum anderen müssen eingesetzte Kommunikationsprotokolle zueinander kompatibel sein. Eine breite Verfügbarkeit und übergreifende Anwendbarkeit von Diagnose und Projektierungswerkzeugen sind für die Planung und den parallelen Betrieb unterschiedlicher Kommunikationstechnologien innerhalb der zu automatisierenden Anlage zwingend notwendig. Physikalische Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Technologien müssen frühzeitig erkannt und daraus resultierende Störeffekte vermieden werden. Das gilt besonders für die Funktechnik.

9.3.2 OSI-Referenzmodell

Die Kommunikationsschnittstellen für die verschiedenen lokalen Netzwerke und Feldbusse sind in der Vergangenheit stets herstellerspezifisch ausgelegt worden und daher in der Regel weitgehend inkompatibel zueinander. Die fehlende Kompatibilität der Kommunikationsschnittstellen führt jedoch zu hohen Kosten bei der Integration von Automatisierungsgeräten in Multi-Vendor-Umgebungen. Daher wurde zwischen 1978 und 1983 unter der Bezeichnung Open Systems Interconnection (OSI) durch die ISO ein Referenzmodell für die Realisierung offener, herstellerneutraler Kommunikationsschnittstellen definiert [DAY83].

Das OSI-Referenzmodell, ISO 7498 [ISO/94], ist eine Rahmen-Richtlinie, die ein architekturales Konzept beschreibt. Mit Hilfe dieses Konzepts sollen die Aktivitäten verschiedener Normungsgremien koordiniert und auf eine gemeinsame Plattform gestellt werden, die unabhängig voneinander an der Schaffung von offenen Kommunikationsschnittstellen arbeiten. Das OSI-Referenzmodell definiert offene Systeme – d. h. für diese Art der Kommunikation kompatible Systeme – und ihr Zusammenwirken in einer OSI-Umgebung sowie ein Schichtenmodell. Zum besseren Verständnis des OSI-Referenzmodells werden diese Begriffe in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Das OSI-Schichtenmodell unterteilt die Kommunikation zwischen zwei Partnerprozessen abstrakt in sieben Ebenen, Bild 9.36. Jeder dieser Schichten sind bestimmte Aufgaben der Kommunikation zugeordnet. Sie kommunizieren untereinander über die von der OSI definierten Schnittstellen. Die konkreten Implementierungen der Schichten können unter Einhaltung der jeweiligen Schnittstellenbeschreibungen ausgetauscht werden. Das OSI-Schichtenmodell definiert somit einen Rahmen, auf dessen Grundlage Kommunikationssysteme aus Komponenten unterschiedlicher Hersteller zusammengestellt werden können. Die Schichten 1 bis 4 beinhalten gemeinsame Funktionen bzw. bieten Dienste an, die zum gesicherten Transport von Informationen zwischen Anwendungsprozessen benutzt werden. Sie werden daher gemeinsam als transportorientierte Schichten bezeichnet. Im Gegensatz hierzu werden die Schichten 5 bis 7 wegen der von ihnen für die Anwendungsprozesse zur Verfügung gestellten

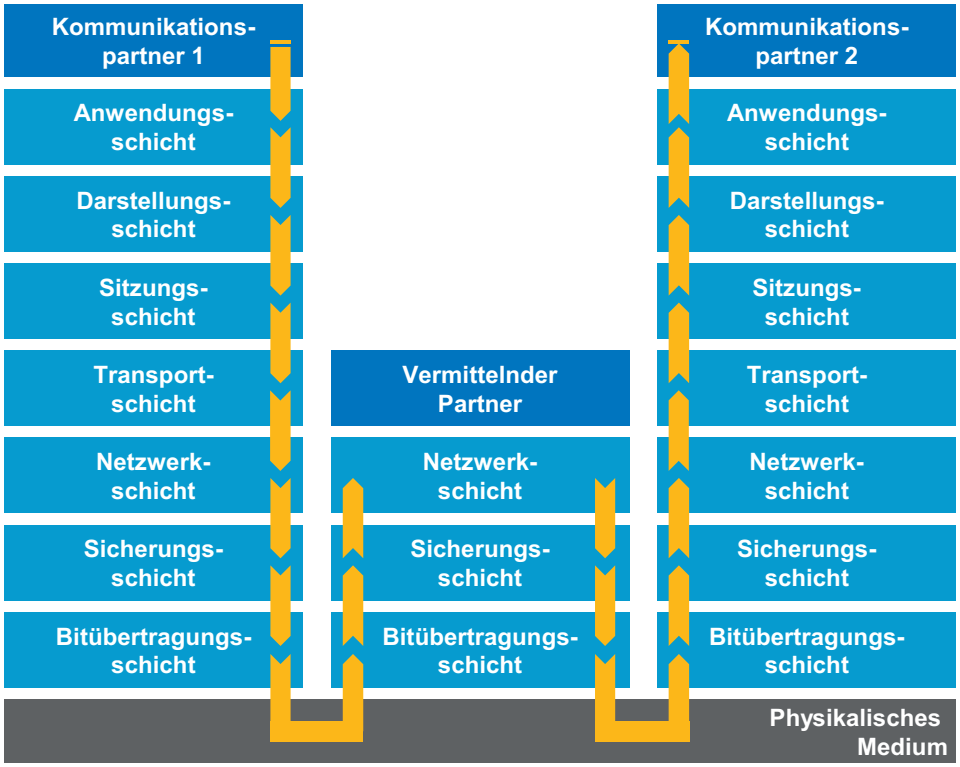


Bild 9.36 OSI/ISO-Schichtenmodell nach ISO/IEC 7498–1. Nach [DAY83; ISO/94]

Dienste und Funktionen als anwendungsorientierte Schichten bezeichnet. Die Informationsdichte und Dienstgranularität nimmt von unterlagerten zu überlagerten Schichten zu [SCHN12].

Die Funktionen der sieben Schichten des OSI-Referenzmodells werden im Folgenden beschrieben [ZIMM80; ISO/94]:

- Schicht 7 (Anwendungsschicht oder Application Layer) bildet die Schnittstelle zur Anwendung des Kommunikationsprozesses. Beispielsweise greift ein Webbrowser über Schicht 7 auf das Internet zu.
- Schicht 6 (Darstellungsschicht oder Presentation Layer) handhabt die Darstellung der Daten. Je nach Rechner und untergeordneten Ebenen müssen Daten konvertiert werden. Zum Beispiel lassen sich Zeichenketten (Strings) auf unterschiedlichen Arten darstellen, wie z. B. in der bekannten Darstellungsform der ASCII Zeichen.
- Schicht 5 (Sitzungsschicht oder Session Layer) handhabt die Dialogkontrolle mit der festgelegt wird, welcher Kommunikationspartner wann übertragen darf. In dieser Schicht findet auch Token-Management statt. Token sind „Marken", die ausgetauscht werden. Nur wer das Token besitzt, darf bestimmte Operationen durchführen. Weiter werden Wiederaufsetzpunkte bereitgestellt. Wenn bei einer Operation, wie beispielsweise der Übertragung von Dateien, ein Fehler auftritt, sorgt Schicht 5 dafür, dass die Sitzung an der Stelle fortgesetzt wird, wo sie unterbrochen wurde.
- Schicht 4 (Transportschicht oder Transport Layer) stellt Ende-zu-Ende-Verbindungen zwischen Anwendungen her. Dazu werden die kontinuierlichen Datenströme in Pakete aufgeteilt. Die Schicht baut neue Verbindungen zwischen Kommunikationsteilnehmern auf. Dazu werden Anwendungsprozesse adressiert. Die Schicht übernimmt bei Bedarf die Behandlung von Fehlern wie verlorene Daten oder falsche Reihenfolge von Paketen. Schicht 4 führt zudem die Flusskontrolle zur Anpassung der Datenrate durch.
- Schicht 3 (Netzwerkschicht oder Network Layer) führt die Übertragung zwischen homogenen und heterogenen Netzwerken durch. Sie routet Datenpakete, d. h. schickt Datenpakete auf ihren bestimmten Pfad, bzw. adressiert Pakete an eindeutige Rechneradressen. Schicht 3 führt zudem Multiplexing mehrerer logischer Verbindungen über eine physikalische Verbindung durch.
- Schicht 2 (Sicherungsschicht oder Data Link Layer) bietet als Dienst für die Vermittlungsschicht eine fehlerfreie Übertragung der Daten zwischen zwei Kommunikationsteilnehmern an. Sie prüft einzelne Pakete auf Fehlerfreiheit durch Hinzufügen einer Prüfsumme auf Senderseite. Bei lokalen Netzen wird eine Überlast des physikalischen Mediums erkannt und vermieden.
- Schicht 1 (Bitübertragungsschicht oder Physical Layer) transportiert einzelne Bits über ein bestimmtes physikalisches Medium. Sie kodiert einzelne oder Gruppen von Bits für die Übertragung.

Die Kommunikation im OSI-Schichtenmodell erfolgt immer zwischen Schichten der gleichen Ebene. Informationen durchlaufen dabei alle unterlagerten Schichten des sendenden Kommunikationspartners in absteigender Reihenfolge und werden dabei von der jeweiligen Implementierung der Schicht entsprechend der von der OSI definierten Schnittstellendefinitionen verarbeitet und weitergegeben. In Schicht 1 werden die Daten abschließend verarbeitet und auf das physikalische Übertragungsmedium übertragen. Die Daten durchlaufen dann die Schichten des empfangenden Kommunikationspartners in aufsteigender Reihenfolge. Je nach Kommunikationssystem sind nicht alle vom OSI-Schichtenmodell vorgesehenen Schichten vorhanden [HERF13; SCHN12].

9.3.3 Busarchitekturen und -zugriffsverfahren

Den eingesetzten Kommunikationstechnologien der Automatisierungstechnik liegen verschiedene Busarchitekturen zugrunde. Bild 9.37 zeigt den schematischen Aufbau der gängigsten Architekturen. Sie beschreiben, zwischen welchen Kommunikationspartnern des Netzwerkes direkte Kommunikation erfolgt bzw. welche Verbindungen und weiteren Stationen die Nachrichten bei der Übertragung zwischen zwei Kommunikationspartnern passieren.

Bei der Sternarchitektur, auch Parallelverdrahtung genannt, laufen alle Kommunikationsvorgänge über einen zentralen Punkt. Besteht eine Störung an diesem Punkt, kann keine weitere Kommunikation erfolgen. Fällt eine Verkabelung aus, besteht nur eine Störung für die Kommunikation des jeweiligen Teilnehmers. Besteht bei der Ring-Architektur für einen Teilnehmer oder eine Verbindung eine Störung, fällt das gesamte Netzwerk aus. Der Wegfall eines Teilnehmers in einer Busarchitektur, ist das für das Netzwerk nicht kritisch. Bei einem Leitungsbruch oder Ausfall des verbindenden Kommunikationskanales ist keine weitere Kommunikation möglich.

Unabhängig von der gewählten Busarchitektur nutzen die Teilnehmer des Netzwerkes zur Kommunikation ein gemeinsames Übertragungsmedium. Um Kollisionen in der Kommunikation, also die gleichzeitige Nutzung des Übertragungsmediums durch mehrere sendende Teilnehmer und den damit einhergehenden Verlust der Nachrichtenübertragbarkeit, zu verhindern, müssen die Kommunikationsvorgänge koordiniert werden. Das geschieht auf Basis sogenannter Buszugriffsverfahren. Im Folgenden werden die gängigsten Verfahren beschrieben.

Bei dem Token-Passing-Verfahren wird ein Token in zyklischer Reihenfolge zwischen allen Kommunikationspartnern weitergeleitet. Der Kommunikationspartner, der gerade in Besitz des Tokens ist, hat die Berechtigung, Daten zu senden. Dieses Verfahren wird sowohl für Ring-Architekturen (Token Ring), bei denen das Token immer zum physikalisch nächsten Nachbarn gesendet wird, als auch für Bus-Architekturen eingesetzt, bei denen das Token auf Basis einer fest definierten logischen Reihenfolge weitergereicht wird, eingesetzt. Durch Einsatz dieses Verfahrens wird in der Regel ein gutes Echtzeitverhalten erreicht, d. h. die Antwortzeiten sind vorhersagbar (deterministische Kommunikation).

Das Master-Slave-Verfahren sieht vor, dass die Kommunikation durch einen einzelnen Kommunikationspartner, dem Master, koordiniert wird. Der Master kann als einziger Teilnehmer das Kommunikationsmedium nutzen und fragt zyklisch bei allen anderen Teilnehmern, den Slaves, Daten an. Die Slaves senden Nachrichten erst, nachdem der Master eine entsprechende Aufforderung gesendet hat. Dieses Verfahren ist einfach zu implementieren, unterliegt aber einer starken Störanfälligkeit, da bei Ausfall des Masters keine Kommunikation mehr erfolgen kann. Deshalb wird es in der Praxis oft mit einem Token-Passing-Verfahren kombiniert, wobei dann die Rolle des Masters auf Basis des Toking-Passing-Verfahrens zwischen mehreren Teilnehmern wechselt.

Das Carrier-Sense-Multiple-Access-Verfahren (CSMA) regelt den asynchronen Zugriff mehrerer Stationen auf ein

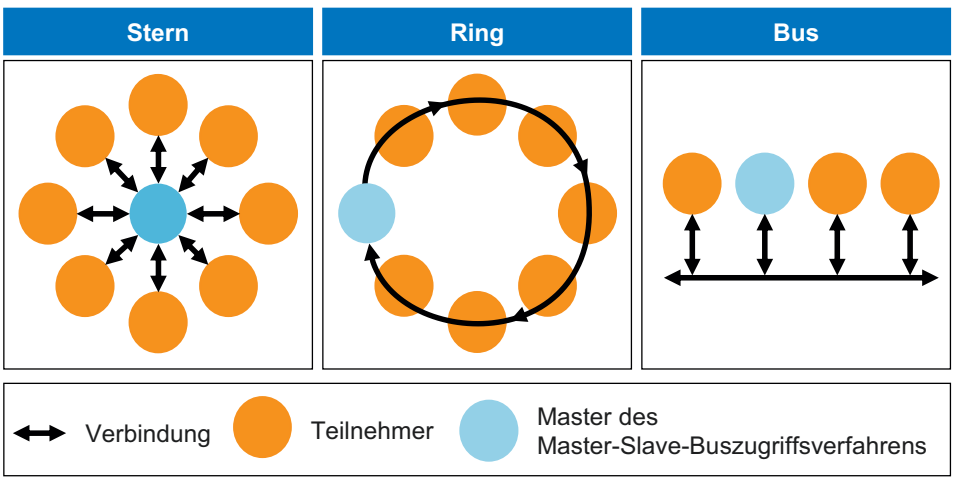


Bild 9.37 Busarchitekturen der Automatisierungstechnik

	Busarchitektur		
Fehlerfall	**Stern**	**Ring**	**Bus**
Ausfall einer Verbindung	Unkritisch	Kritisch	Kritisch
Ausfall eines Teilnehmers	Kritisch bei zentralem Teilnehmer sonst unkritisch	Kritisch	Unkritisch
Aufwand zur Verkabelung	Hoch	Mittel	Gering

Bild 9.38 Eigenschaften der Busarchitekturen

gemeinsames Medium. Dabei überwacht jede Station das Medium. Vor der Übertragung wird geprüft, ob das Medium frei ist. Je nach gewählter Variante des Verfahrens (CSMA/CD – CSMA with Collision Detection oder CSMA/CA – CSMA with Collision Avoidance) wird die Übertragung sofort gestartet und bei Kollision nach einer Wartezeit erneut angestoßen oder die Kommunikation wird nach einer zufälligen Wartezeit im Falle eines dann immer noch freien Mediums gestartet, wodurch Kollisionen weitestgehend vermieden werden. CSMA/CD kommt meist bei kabelgebundener Übertragung zum Einsatz, CSMA/CA dagegen meist bei kabelloser Übertragung. Das CSMA führt zu einer nicht deterministischen Übertragung. Mit steigender Teilnehmerzahl steigen auch die Antwortzeiten.

9.3.4 Bus-Systeme

Vor allem auf den unteren Ebenen der Automatisierungspyramide werden heute hauptsächlich Bussysteme zur Kommunikation eingesetzt. Die Kommunikationsteilnehmer, z. B. die zahlreichen Sensoren und Aktoren dieser Ebene, werden über kurze Kabelverbindungen an ein zentral verlaufendes Buskabel angeschlossen. Im Vergleich zu der Parallel- bzw. Sternverdrahtung, bei der jeder Kommunikationspartner über ein separates Kabel mit einer zentralen Steuerung verbunden wird, ergeben sich Vorteile durch geringeren Verkabelungs- und Wartungsaufwand. Durch die Vielzahl verschiedener Feldbus-Arten sind Sensor-/Aktor-Hersteller gezwungen, mehrere dieser Systeme zu unterstützen, was zusätzliche Kosten verursacht. Außerdem ist die Vorhersage, welche Feldbusse in Zukunft an Bedeutung gewinnen bzw. verlieren werden, schwierig. Dadurch besteht die Gefahr von Fehlinvestitionen bei der Entwicklung von Feldbusankopplungen.

Die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (DKE) ist in Deutschland für die Feldbusnormungen zuständig. Die Normen der DKE werden als Entwürfe für internationale Normungen genutzt. Weiter gehen Normenentwürfe verschiedener Nutzerorganisationen, deren Ziel die Unterstützung bestimmter Bussysteme ist, in den Standardisierungsprozess ein. Internationale Feldbusnormungen werden von der International Electrotechnical Commission (IEC) und europäische Feldbusnormungen von der Commité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC) verwaltet. Durch vertragliche Regelungen werden Normen der IEC auch als europäische Entwürfe zur Abstimmung gestellt. Die Arbeiten im Rahmen beider Organisationen werden sowohl von Mitarbeitern aus Industrie als auch von öffentlichen Instituten durchgeführt.

Die Norm IEC 61158 (DIN EN 61158 der CENELEC) beschreibt existierende Feldbusse und strukturiert diese auf Basis des OSI/ISO-Referenzmodells. Die Norm IEC 61784 (DIN EN 61784 der CENELEC) definiert aufbauend auf IEC 61158 eine zusätzlich Strukturierung der Feldbusse nach Protokollfamilien. Beispiele für Protokollfamilien sind für den Bereich der Ethernet-basierten Feldbusse „CIP“, „Profibus-Profinet“ und „P-Net“ und für den Bereich der klassischen Feldbusse „Foundation Fieldbus“, „CIP“ und „Profibus & Profinet“. Zusätzlich sind in den Normen Sicherheitsbussysteme erfasst. Die Normen werden stetig auf Basis aktueller technischer Entwicklungen aktualisiert [SCHN12].

Zur Gefahrenabwehr für Mensch, Maschine und Umwelt müssen Maschinenhersteller nach europäischem Recht Gefahrenanalysen für ihre Maschinen durchführen (vgl. Normen EN ISO 14121, EN ISO 13849, EN IEC 62061, 2006/42/EG und vgl. ► Kap. 15.1). Dazu werden alle verbauten Komponenten betrachtet. Für die verbauten Bussysteme bestehen in diesem Zusammenhang die konkreten Gefahren der Verfälschung und des Verlustes von Daten sowie der falschen Adressierung der Telegramme. Ein erhöhtes Gefahrenpotential besteht für explosionsgefährdete Bereiche, wie z. B. Gasverteiler oder Tankanlagen. In diesen Bereichen werden „eigensichere Bussysteme“ eingesetzt, deren maximal aufgenommene Energie hinsichtlich einer möglichen Funkenbildung beschränkt ist. Weitere Maßnahmen für den sicheren

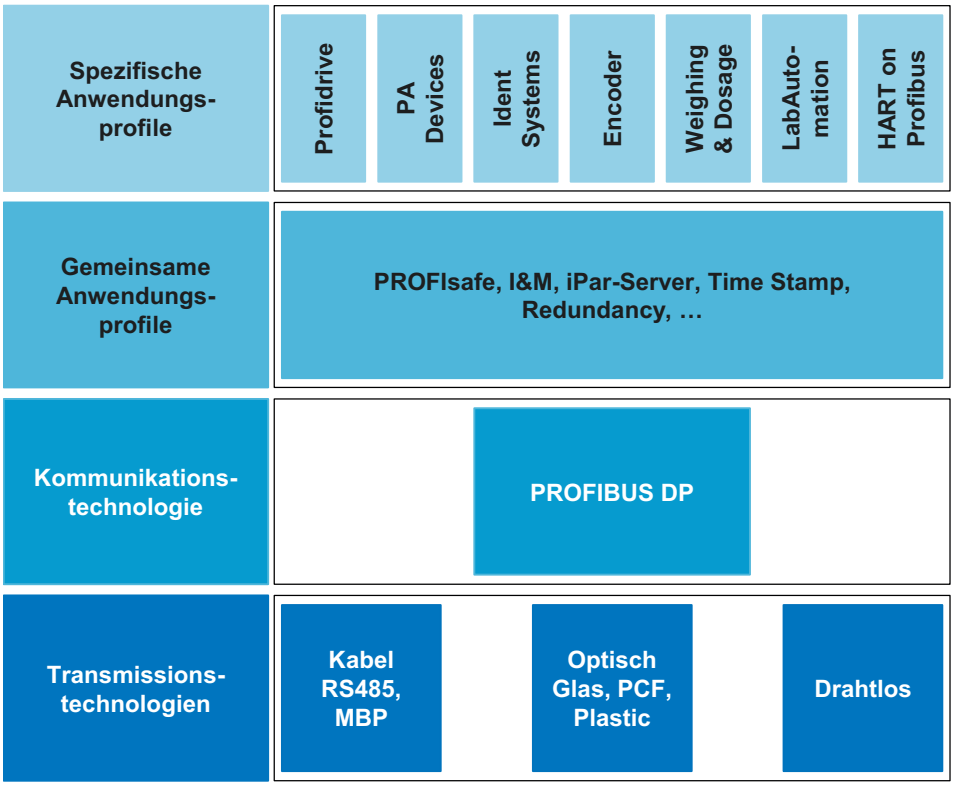


Bild 9.39 Profibus Systembaukasten

Betrieb von Bussystemen in explosionsgefährdeten Bereichen sind der Verguss von Steckern und die Sandkapselung von Verbindungen. Letzteres beschreibt die Bauweise Bauteile im Gehäuseinneren von Verbindungen, die potentielle Zündquellen sind, in Sand einzubetten, sodass im Gehäuseinneren keine Explosion auftreten kann. Zu den am Markt erhältlichen Sicherheitsbussen zählen AS-I Safety at work, Profisafe auf Profibus und INTERBUS-Safety [SCHN12; HERF13].

Der verbreitete Profibus Standard umfasst Spezifikationen der Schichten 1, 2 und 7 des OSI-/ISO Referenzmodells sowie Applikationsprofile, die bestimmte Eigenschaften, Leistungsmerkmale und Verhaltensweisen von Geräten und Systemen zwischen Herstellern und Anwendern definieren, Bild 2.39. Profibus umfasst auf Schicht 1 des OSI/ISO-Referenzmodells Spezifikationen für Datenübertragungen über Kupferkabel, optische Lichtwellenleiter und drahtlose Technologien. Auf Schicht 2 legt Profibus das Master-Slave-Verfahren in Kombination mit dem Token-Verfahren zur Koordination mehrerer Master fest. Für Schicht 7 definiert PROFIBUS das Kommunikationsprotokoll PROFIBUS DP, welches in drei Leistungsstufen zur Verfügung steht (DP-V0, DP-V1, DP-V2). Die Leistungsstufen umfassen Möglichkeiten des zyklischen sowie azyklischen Datenaustausches zwischen Master und Slave, z. B. zur Anbindung von dezentralen Eingangs- und Ausgangsbaugruppen an eine SPS, und des isochronen Datenaustauschs, z. B. für Anwendungen aus dem Bereich Motion Control.

Die Applikationsprofile dienen der Austauschbarkeit und Integration verschiedener Geräte und Systeme. Sie legen je nach Zweck Eigenschaften bestimmter Geräteklassen wie z. B. von Robotern oder Antrieben fest, sind teilweise aber auch branchenspezifisch und anwendungsbezogen. Applikationsprofile definieren die Integration von Subsystemen anderer Normen und Hersteller, wie z. B. das Applikationsprofil HART on Profibus. Unterschieden wird zwischen allgemeinen Applikationsprofilen mit Einsatzmöglichkeit in unterschiedlichen Anwendungen und Branchen und spezifischen Applikationsprofilen, deren Einsatzmöglichkeiten stärker an spezifische Anwendungen und Branchen gebunden sind. Das Profil „PA Devices“ spezifiziert die Eigenschaften von Geräten der Prozesstechnik in der Prozessautomatisierung an Profibus, was auch die Sicherheit gegen Explosionen in Explosionsgefährdeten Bereichen umfasst. Der Feldbusstandard Profibus (PROcess FIeld BUS) wurde von mehreren Firmen und Instituten in einem Verbundprojekt erarbeitet und wird von der PROFIBUS Nutzerorganisation und ihrem internationalen Dachverband PROFIBUS & PROFINET gepflegt und weiterentwickelt [SCHN12; PNO10].

9.3.5 Industrial Ethernet

In den 1990er Jahren wurde der Einsatz von Ethernet-Technologien für die Automatisierungstechnik bereits diskutiert. Die klassischen Feldbusse sollten durch das aus der Büroum-

gebung bekannte und bereits teilweise in den oberen Ebenen der Automatisierungspyramide eingesetzte Bussystem Ethernet abgelöst werden und zu einer umfassenderen Standardisierung der Kommunikationstechnologien in der Automatisierungstechnik beitragen. Durch die Standardisierung der Stecker, Kabel, Netztopologien und Übertragungsmedien (also im Bereichen der Schichten 1 und 2 des OSI/ISO-Referenzmodells) des Ethernets ist die Verfügbarkeit von bewährten und in Anschaffung und Betrieb kostengünstigen Hardware-Komponenten groß. Der Ethernet-Standard (IEEE 802) definiert das zu verwendende nicht deterministische Buszugriffsverfahren Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) sowie ein Protokoll zur Übertragung von Datenpaketen. Auf dieser Basis arbeiten einige etablierte Kommunikationsprotokolle und Anwendungen der Büroumgebung, wie die der TCP/IP-Protokollfamilie, mit ihrem wichtigen Einsatzgebiet der Internetkommunikation [SCHN12].

Hardwarekomponenten und Kommunikationsprotokolle auf Basis des Ethernet-Standards finden heute in den oberen Ebenen der Automatisierungspyramide breite Anwendung. Ethernet realisiert für diesen Bereich ausreichend hohe Übertragungsraten (z. B. 10 GBit/s auf Glasfaser- und Kupferkabeln spezifiziert im IEEE 802.3). Für den Einsatz der Ethernet-Technologie auf der Feld- bzw. Sensor-/Aktor-Ebene ergeben sich erhöhte Anforderungen durch die zu unterstützenden Echtzeitanwendungen wie z. B. Motion Control, sowie die Notwendigkeit einer zuverlässigen Kommunikation unter erhöhten Störeinflüssen der Industrieumgebung. Vorteile der realisierbaren hohen Datenraten kommen Anwendungen der zunehmend eingesetzten Bildverarbeitung, bei denen große Datenmengen zur Auswertung übertragen werden, zu Gute. Zudem werden Webtechnologien auf Basis der TCP/IP-Protokollfamilie zur direkten Diagnose und Steuerung von Feldgeräten, z. B. durch Installation von Webservern auf Steuerungen, eingesetzt [EISE12; SCHN12].

Die Kopplung von schnellen, synchronisierten Antrieben erfordert eine kurze und äquidistante Zykluszeit der eingesetzten Kommunikationstechnik (zum Teil unter einer Mikrosekunde). Der Ethernet-Standard eignet sich für diese Anwendung nur bedingt. Das zugrundeliegende Buszugriffsverfahren, CSMA/CD, führt mit steigender Nutzung des Kommunikationskanals – d. h. der Nutzung des Kanals durch viele Teilnehmer – zu einer wachsenden Verzögerung der Kommunikationsvorgänge. Durch verschiedene Gegenmaßnahmen, wie der Wahl einer Sterntopologie zur Anbindung der Feldgeräte (Parallelverdrahtung) oder der Begrenzung von Kommunikationsvorgängen in Häufigkeit und übertragbarer Datenmenge für die einzelnen Teilnehmer, kann diesem Effekt zwar entgegengewirkt werden, doch sind die so implementierten Lösungen anwendungs- bzw. herstellerspezifisch und untereinander nicht immer kompatibel [SCHN12; HMS14].

Die in der Automatisierungstechnik eingesetzten Kommunikationskomponenten müssen eine hohe Zuverlässigkeit der Informationsübertragung unter Feldbedingungen aufweisen. Sie müssen z. B. unter Einfluss verschiedener Temperaturen, dem Einwirken von Flüssigkeiten und Schmutz sowie Erschütterungen funktionieren. Weiter besteht die Notwendigkeit einer erhöhten elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Für einige explosionsgefährdete Umgebungen werden zusätzlich Anforderungen an die maximal durch die Komponente aufgenommene Energie gestellt, um Funkenbildung zu verhindern (Eigensicherheit). Die in der Büroumgebung eingesetzten Ethernet-Komponenten erfüllen diese Anforderungen nicht [SCHN12].

Die Notwendigkeit von Integrationsmöglichkeiten zwischen Ethernet-basierten Bussystemen verschiedener Hersteller und den klassischen Feldbussen ergibt sich zum einen aus Gründen des Investitionsschutzes für Anwender klassischer Feldbusse und zum anderen aus dem erhöhten Eignungsgrad klassischer Feldbusse für bestimmte Anwendungen. Zur Integration der verschiedenen Feldbusse bestehen Anforderungen an die Hardwarekomponenten wie der Kompatibilität von Steckern und der für den Einbau verwendeten Hutschienen. Weiter besteht die Notwendigkeit, bereits verfügbare Konfigurations- und Diagnosesoftware zu erweitern und zu koppeln. Es wird eine integrierte Verwaltung der Bussysteme und Automatisierungskomponenten insbesondere auch derer, die auf Ethernet basieren, angestrebt.

Am Markt haben sich folgende Ethernet-basierte Lösungen für die Automatisierungstechnik etabliert: Sercos III, SafetyNET p, VARAN, Profinet, EtherNet/IP, Ethernet Powerlink und EtherCAT. Es werden sowohl aus der Büroumgebung bekannte Kabel und Stecker wie dem RJ45 Steckverbinder in industrietauglichen Varianten eingesetzt, als auch neu entwickelte Steckverbinder wie dem M12. Eine Kopplung zwischen verschiedenen Steckverbindern und Bussen ist über Adapter und Klemmen möglich [EISE12].

9.3.6 Wireless Communication

Die in der Automatisierungstechnik eingesetzten Funktechnologien unterscheiden sich unter anderem in ihren übertragbaren Datenraten, den genutzten Frequenzbereichen, ihrer Echtzeitfähigkeit und der Störanfälligkeit. Die Vorteile der Funktechnologien gegenüber drahtgebundenen Kommunikationstechnologien ergeben sich z. B. in Anwendungen weiträumiger Anlagen oder Anlagen mit mobilen Fertigungseinrichtungen wie z. B. fahrerlosen Transportsystemen. Zur Auswahl und zum Einsatz von Funktechnologien in der Automatisierungstechnik müssen immer der Anwendungsfall und die damit verbundenen Anforderungen betrachtet werden. Bild 9.40 stellt einige Funktechnologien der Automatisie-

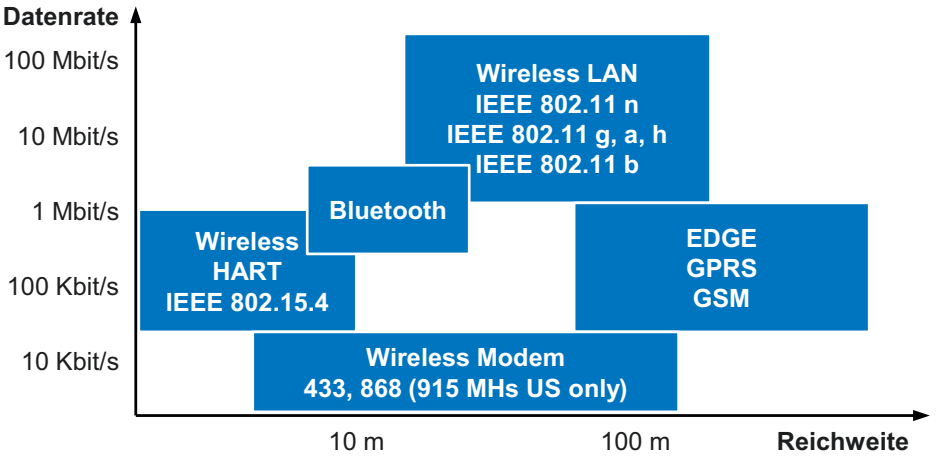


Bild 9.40 Ausgewählte Funktechnologien der Automatisierungstechnik, geordnet nach Reichweite und Datenrate. Nach [WOLF10]

rungstechnik beispielhaft anhand ihrer Reichweite und Datenrate gegenüber.

Neben diesen Größen, die auch für die Auswahl und den Betrieb konventioneller Bussysteme relevant sind, spielen für die Auswahl von Funktechnologien zusätzlich Fragen der gegenseitigen Beeinflussung eingesetzter Funktechnologien sowie der Einfluss geometrischer und baulicher Eigenschaften der Einsatzumgebung eine wichtige Rolle. Funkwellen können durch metallische Gegenstände reflektiert und so verfälscht und überlagert werden. Diesen Effekt, die sogenannte Mehrwegeausbreitung, gilt es bei der Auswahl und Auslegung der Funksysteme zu vermeiden. Parallel betriebene Funktechnologien können zu gegenseitigen Störungen führen. Ziel des sogenannten Koexistenzmanagements ist es, diese Störungen zu vermeiden, z. B. durch eine Entkopplung aller parallel eingesetzten Funksysteme in mindestens einem der Bereiche Ort, Frequenz und Zeit [WOLF10].

Die VDI-Richtlinie 2185 beschreibt Anforderungen an Funktechnologien in der Automatisierungstechnik. Diese sind den einzelnen Ebenen der Automatisierungspyramide zugeordnet. Zusätzlich werden die Anforderungen in Größen wie geforderter Verfügbarkeit, Notwendigkeit nach redundanten Übertragungswegen, einem zyklischen bzw. azyklischen Datenverkehr, der Echtzeitkommunikation, der Anzahl zu vernetzender Stationen, Übertragungsbandbreiten, dem Einsatz von stationären bzw. mobilen Peripheriegeräten, der zu überbrückenden Entfernung und der notwendigen elektromagnetischen Verträglichkeit strukturiert. Weiter werden anwendungsspezifische Anforderungen definiert, die sich unter anderem aus dem Einsatz mobiler Peripheriegeräte und sicherheitskritischen Einsatzorten ergeben. Auch Anforderungen an die Integrationsmöglichkeiten in bestehende Anlagen werden beschrieben. Die VDI-Richtlinie 2185 erläutert darüber hinaus Abläufe des Koexistenzmanagements. Weiter werden technische Merkmale von Funktechnologien sowie deren anwendungsgerechte Auswahl anhand von Bewertungskriterien in Form eines Vorschlags für eine anwendungsfallspezifische Bewertungsmatrix aufgezeigt. Die Richtlinie stellt zudem eine Empfehlung zur Charakterisierung von Funklösungen vor, die eine Messung und Beeinflussung von in der Richtlinie definierten Kenn- und Einflussgrößen im Rahmen vorgeschlagener Bewertungsszenarien vorsieht [VDI/12a; VDI/12b; VDI/13].

Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) verwaltet einige Normen der beiden unteren Schichten des OSI/ISO Referenzmodells, die eine Grundlage für Funktechnologien in der Automatisierungstechnik bilden. Dazu gehören Normen der Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN – IEEE 802.16 und IEEE 802.20), Wireless Personal Area Network (WPAN – IEEE 802.15), Wireless Local Area Network (WLAN – 802.11) und des Ultra Wide Band (UWB – 802.15.3a und 802.15.4a).

In der Automatisierungstechnik eingesetzte Funktechnologien sind insbesondere WLAN, Bluetooth, Wireless Interface für Sensoren und Aktoren (WISA), WirelessHART, ZigBee, MeshScape und nanoLOC. Alle genannten Funktechnologien nutzen einen lizenzfreien Funkfrequenzbereich (sogenanntes ISM-Band) im Bereich von 2,4 GHz. Weiter werden in der Automatisierungstechnik providerbasierte Funktechnologien wie GSM/GPRS und UMTS eingesetzt. Vorteile können sich dabei aus ihrer Reichweite und der nahezu weltweiten Netzabdeckung ergeben. Abhängigkeiten von Netzwerkbetreibern sind durch die immer geringeren Datenübertragungskosten zunehmend für Auswahlentscheidungen vernachlässigbar.

9.3.7 Near Field Communication

Near Field Communication (NFC) ist ein internationaler Übertragungsstandard zum kontaktlosen Austausch von Daten per Funktechnik über kurze Strecken von einigen Zentimetern (bis etwa 20 cm) im Frequenzbereich von 13,56 MHz. Daten werden zum einen zwischen zwei NFC-Geräten

ausgetauscht, zum anderen ist eine Kommunikation zwischen NFC-Gerät und wahlweise RFID-Transpondern bzw. RFID-Lesegeräten möglich. NFC-Geräte vereinen also die Funktionen eines RFID-Lesegerätes und eines RFID-Transponders. In der Industrie werden hoch integrierte NFC-Transceiver-Bausteine angeboten, die alle zur NFC-Kommunikation notwendigen Komponenten wie Sender, Empfänger- und Lastmodulator enthalten und in elektronische Geräte wie z. B. Mobiltelefon integriert werden. NFC ist in den internationalen Normen ISO/IEC 18092 NFCIP-1 und ISO/IEC 21481 NFCIP-2 definiert. Voraussetzung zur Kommunikation mit RFID-Transpondern und -Lesegeräten ist deren Konformität zur Norm ISO 14443.

In der Kommunikation von NFC-Geräten wird zwischen den Betriebsmodi „active Mode" und „passive Mode" unterschieden. Der active Mode dient der Übertragung von Daten zwischen zwei NFC-Geräten. Der passive Mode erlaubt die Kommunikation zwischen einem NFC-Gerät und wahlweise RFID-Transpondern in der Betriebsart „Reader Emulation" bzw. RFID-Lesegeräten in der Betriebsart „Card Emulation". Im Betriebsmodus active Mode wird die Kommunikation zwischen den Geräten durch das Aussenden eines Signals von einem NFC-Gerät, dem sogenannten NFC-Initiator, gestartet. Das Signal induziert eine Spannung in der verbauten Antennenschleife des zweiten NFC-Gerätes, dem NFC-Target. Die Daten werden durch Amplitudenmodulation des ausgesendeten magnetischen Wechselfeldes (ASK-Modulation) übertragen. Für eine Datenübertragung vom NFC-Target zum NFC-Initiator wird die Senderichtung umgekehrt. Im Betriebsmodus passive Mode und der Betriebsart Reader Emulation wird die Verbindung zum RFID-Transponder durch das NFC-Gerät ebenfalls durch Aussenden eines Signals hergestellt, das eine Spannung induziert. Das Signal wird unmoduliert aufrecht erhalten. Durch Lastmodulation werden Daten vom RFID-Transponder an das NFC-Gerät übertragen. Die Kommunikation zwischen NFC-Gerät und RFID-Lesegeräten in der Betriebsart Card Emulation erfolgt ebenfalls mittels Lastmodulation [ECMA13].

RFID-Technologien bieten sich zur Realisierung dezentraler Steuerungskonzepte an. Dabei enthalten die les- und schreibbaren RFID-Transponder Informationen z. B. zu Werkstücken und Werkzeugen, die unabhängig von einem zentralen Leitrechner im Prozess gelesen und verändert werden können. RFID-Technologien werden im Bereich der Werkzeugmaschinen z. B. zur Werkzeug- oder Werkstückidentifikation und zur Werkstückträgerkennzeichnung eingesetzt. Werkzeuge oder Werkzeugaufnahmen werden dazu mit RFID-Transpondern versehen, die Informationen wie Einsatzempfehlungen und Zustandsgrößen enthalten. Werkzeugverwechselungen können so vermieden werden [FINK12].

9.3.8 Middleware-Protokolle

In der VDI/VDE Richtlinie 2657 [VDIV13] wird Middleware in der Automatisierung als Softwareschicht zur Verbindung verschiedener Komponenten, wie z. B. Anlagen, Maschinen etc., einer automatisierungstechnischen Anwendung definiert. Die Middleware kann dabei sowohl auf einem Feldgerät als auch auf einem Rechner ausgeführt werden. Eine wichtige Anforderung an eine Middleware in der Automatisierungstechnik ist insbesondere die Abstraktion der Kommunikation und die Abbildung eines Daten- und Informationsraums.

Eine bereits standardisierte Middlewarelösung für die Automatisierungstechnik, die die Anforderungen der genannten Richtlinie erfüllt, ist OPC Unified Architecture (OPC UA). OPC UA ist in der DIN EN 62541 standardisiert und enthält außerdem mehrere Companion-Standards, die auf OPC UA aufsetzen und entsprechende Bereiche der Automatisierungstechnik (z. B. Parametrierung von Antriebssystemen, Sensorintegration etc.) mittels OPC UA verknüpfen. OPC UA ist die aktuellste einer Reihe von Spezifikationen zum herstellerübergreifenden Datenaustausch in der Automatisierungstechnik, veröffentlicht von der OPC-Foundation. Der Kern von OPC UA ist ein plattformunabhängiger Informationsaustausch auf Basis einer hersteller- und geräteübergreifenden Client-Server-Kommunikation verschiedener Arten von Systemen und Geräten. Durch Sicherheits- und Authentisierungsmaßnahmen auf Transportschicht, wird die Identität von Clients und Servern sowie die Datenintegrität sichergestellt. OPC UA definiert einen festen Satz von Diensten, welche von einem Server zur Verfügung gestellt werden. Die Darstellung von Informationen geschieht auf Basis eines Informationsmodells, auch Namensraum genannt, welches von einem Client mit Hilfe der Serverdienste beschrieben, gelesen und manipuliert werden kann. Da die Art und Weise der Informationsübertragung von OPC UA spezifiziert ist, können verschiedene Hersteller für eigene Geräte entsprechende Informationsmodelle generieren, die dann von Clients anderer Hersteller genutzt werden können. Neben dem Zugriff auf aktuelle und historische Daten, als auch der Übertragung von Alarmen, können Clients über wichtige Änderungen vom Server benachrichtigt werden.

Insgesamt ist OPC UA in Schichten strukturiert und trennt so Kernkonzepte der Kommunikation von unterlagerten computertechnologiespezifischen und netzwerktransportspezifischen Implementierungen. Eine Abbildung von Standards auf zukünftige Technologien wird dadurch gewährleistet. Aktuell sind Kommunikationsvorgänge im Binär- oder XML-Format und über TCP oder SOAP-Web-Dienste über http möglich. Frühere Spezifikationen der OPC Foundation, wie beispielsweise OPC Data Access (OPC DA),

finden auch heute noch breite Anwendung, sind jedoch im Vergleich zum OPC UA Standard proprietär – (COM/DCOM von Microsoft). OPC UA soll Funktionalitäten früherer Spezifikationen vereinen und zusätzlich die beschriebenen Vorteile der Technologieunabhängigkeit bieten [DIN12]. Es kann dabei die Grundlage für die Integration von IT-Systemen in die Automatisierungstechnik Bilden [APPE10; ROHJ10]. So ist eine direkte und nahtlose Rückführung von Prozessdaten in Entwicklung und Engineering möglich.

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog to Digital Converter
ALU	Arithmetic Logic Unit
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
ASK	Amplitude Shift Keying
BCD	Binary Coded Decimal
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
COM/DCOM	Component Object Model / Distributed Component Object Model
CPU	Central Processing Unit
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection
DAC	Digital to Analog Converter
DIN	Deutsche Industrienorm
DTL	Diode-Transistor-Logic
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HART	Highway Addressable Remote Transducer
IC	Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical Band
ISO	Internationale Organisation für Normung
KV	Karnaugh-Veitch
LCD	Liquid Crystal Display
LSB	Least Significant Bit
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MSB	Most Significant Bit
NC	Numerical Control
NFC	Near Field Communication
NMOS	N-doped Metal-Oxide-Semiconductor
OPC DA	OLE for Process Control Data Access
OPC UA	OLE for Process Control Unified Architecture
OSI	Open Systems Interconnection
PAL	Programmable Array Logic
PC	Personal Computer
PLA	Programmable Logic Array
PLD	Programmable Logic Device
PMOS	P-doped Metal-Oxide-Semiconductor
PROFIBUS	PROcessFIeld BUS
PROFIBUS-DP	PROcessFIeld BUS – Dezentrale Peripherie
RAM	Random Access Memory
RFID	Radio-Frequency Identification
ROM	Read-Only Memory
SOAP	Simple Object Access Protocol
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Transport Control Protocol
TTL	Transistor-Transistor-Logic
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra-Wide-Band
VLSI	Very Large Scale Integration
WISA	Wireless Interface for Sensors and Actors
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
XML	Extensible Markup Language

Literaturverzeichnis

[APPE10] Appelrath, H.-J.; Nieße, A.; Sonnenschein, M.; Tröschel, M.: Energieinformatik 2010. Oldenburg: OFFIS, 2010

[BAIL74] Bailey, F. J.: Halbleiter-Schaltungen. Wien: Oldenburg, 1974

[BLAC99] Black, B.; Ranzenberger, R.: A/D-Umsetzung – aber richtig. In: Elektronik. 1999. Jg., 1999, Nr. 24

[BORU89] Borucki, L.: Digitaltechnik. Stuttgart: Teubner, 1989

[BUES94] Bues, M.: Offene Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994

[DAY83] Day, J.-D.; Zimmermann, H.: The OSI-Reference Model. In: Proceedings of the IEEE. 1983. Jg., 1983, Nr. 71, S. 1334–1340

[DIN12] Fachbericht SIN CLC/TR 62541-1 (08/2012). OPC Unified Architecture – Teil 1: Übersicht und Konzepte

[DIN97] DIN EN 60617 (1997). Graphische Symbole für Schaltpläne

[DURC83] Durcansky, G.: Digitaltechnik. Weinheim: Physik-Verlag, 1983

[DWOR86] Dworatschek, S.: Grundlagen der Datenverarbeitung. Berlin: Walter de Gruyter, 1986

[ECKL90] Eckl, R.; Pütgens, L.; Walter, J.: A-D- und D-A-Wandler. München: Franzis, 1990

[ECMA13] ECMA International: Standart ECMA-340. 3. Aufl, 2013

[EISE12] Eisenmann, U.: Vom Sensor ins Rechenzentrum oder vielleicht doch gleich in die Cloud. In: Fach.Journal. 2012. Jg., 2012, S. 130–131

[FINK12] Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. München: Hanser, Carl, 2012

[FLEG93] Flegel, G.; Birnstiel, K.; Nerreter, W.: Elektrotechnik für den Maschinenbauer. München, Wien: Hanser, 1993

[FLEI85] Fleischer, D.: Digitale Schaltglieder. Berlin, München: Siemens-Aktiengesellschaft, [Abt. Verl.], 1985

[FREY97] Freytag, A.: Zeichen setzen – Unicode in der Praxis. 1997. Jg., 1997, Nr. 14

[FRIS78] Frisch, H.: Elektronik. Grafenau/Württ., Düsseldorf: Lexika-Verlag; VDI-Verlag, 1978

[HAGE93] Hagelauer, R.; Ronge, K.: ASIC-Entwurf für die Mikrosystemtechnik – Varianten, Verfahren, Systeme. Conference Paper, 1993

[HÄUS80] Häusler, L.: MOS-Technologie. Berlin, München: Siemens-Aktiengesellschaft, [Abt. Verl.], 1980

[HERF13] Herfs, W.: Automatisierungstechnik für Produktionsanlagen. VorlesungWerkzeugmaschinenlabor RWTH Aachen, 25.10.2013

[HILB92] Hilberg, W.: Grundlagen elektronischer Schaltungen. München, Wien: Oldenbourg, 1992

[HMS14] HMS Industrial Networks GmbH: Feldbusse.de. URL: http://www.feldbusse.de. [Stand: 27.02.2014]

[ISO/94] ISO/IEC: 7498-1. Genf, 1994

[KOCH77] Koch, G.: Einführung in die Informatik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. München: Hanser, 1977

[KORE81] Koren, Josef. , Thaller, Werner.: EDV für jedermann. Mannheim, 1981

[LEHM74] Lehmann, J.: Feldeffekttransistoren. Würzburg: Vogel-Verlag, 1974

[LEHM83] Lehmann, J.: Dioden und Transistoren. Würzburg: Vogel, 1983

[PALO13] Palotas, L.: Elektronik für Ingenieure. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2013

[PNO10] PNO: POFIBUS Systembeschreibung

[ROHJ10] Rohjahns, S.: Eine standardkonforme und semantikbasierte Kommunikatiosnarchitektur für die Automationsebene in Smart Grids, 2010

[SCHN12] Schnell, G.: Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2012

[STIL15] Stiller, A.: Prozessorgeflüster. In: c't, 2015, Nr. 7

[TIET93] Tietze, U.; Schenk, C.: Halbleiter-Schaltungstechnik. Berlin: Springer-Verlag, 1993

[VDI/12a] Richtlinie VDI/VDE 2185 Blatt 1 (08/2012). Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik

[VDI/12b] Richtlinie VDI/VDE 2185 Blatt 2 (08/2012). Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik – Koexistenzmanagement von Funklösungen

[VDI/13] Richtlinie VDI/VDE 2185 Blatt 3 (10/2013). Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik – Anforderungen und Spezifikationen an die Energieversorgung basierend auf Batterien und Energy Harvesting

[VDIV13] 2657 (01/2013). Middleware in der Automatisierungstechnik Grundlagen

[WOLF10] Wolfgang Bölderl-Ermel: Funktechnologien in der Industrie. In: Fertigungs- und Maschinenautomation. 2010. Jg., 2010, Nr. 6, S. 2–5

[WOLF77] Wolf, G.: Digitale Elektronik. München: Franzis-Verlag, 1977

[ZIMM80] Zimmermann, H.: OSI Reference Model. In: IEEE Transactions On Communications, 1980, Nr. 4, S. 425–432

Kapitel 10



Elektrische Steuerungen

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M.Sc., Dr.-Ing. Johannes Nittinger, Dr.-Ing. Markus Obdenbusch, Simon Sittig M.Sc. und Simon Storms M.Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

Elektrische Steuerung



10.1 Aufbau und Einordnung von elektrischen Steuerungen – 370
10.1.1 Verknüpfungssteuerungen – 372
10.1.2 Ablaufsteuerungen – 372

10.2 Verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS) – 374
10.2.1 Anwendungsgebiete und Aufgaben – 374
10.2.2 Anwendungsbeispiele – 374

10.3 Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) – 376
10.3.1 Anwendungsgebiete und Aufgaben – 376
10.3.2 Aufbau und Funktionsweise – 379
10.3.3 SPS-Programmierung – 383
10.3.4 Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung von komplexen SPS-Programmen – 392

10.4 Sicherheitssteuerungen – 396
10.4.1 Maschinenrichtlinie – 397
10.4.2 Performance Levels – 398
10.4.3 Zweikanalige, fehlererkennende Steuerungsstruktur – 398
10.4.4 Dreikanalige, fehlertolerante Steuerungsstruktur – 399
10.4.5 Konventionelle Sicherheitsschaltung in Relaistechnik – 399
10.4.6 Fehlersichere Prozessankopplung – 401

10.5 Motion Control – 404
10.5.1 Grundlagen und Anwendung – 404
10.5.2 Aufbau und Funktionsweise von MC-Systemen – 405
10.5.3 Programmierung – 407

Abkürzungsverzeichnis – 408

Literaturverzeichnis – 409

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_10

Angesichts der Komplexität heutiger Fertigungsprozesse und des hohen Automatisierungsgrades moderner Produktionsanlagen werden standardmäßig elektrische Steuerungen eingesetzt, um eine hohe Qualität und Effizienz des Fertigungsprozesses sicherzustellen. Durch die rasante Entwicklung im Bereich der Mikroelektronik – insbesondere der Mikroprozessoren – sind leistungsfähige Steuerungssysteme am Markt verfügbar, die selbst unter strengen Echtzeitbedingungen mehrere tausend Prozesssignale zuverlässig verarbeiten können. Die Aufgabe einer Steuerung ist es dabei, die Vielzahl von Signalen aus dem Prozess (Positions-, Geschwindigkeits-, Drehzahl-, Temperatur-, Füllstand-, Drucksignale etc.) einzulesen, die notwendigen Steuersignale entsprechend der logischen Verknüpfungen zu bestimmen und diese an die Stellglieder auszugeben. Der zu steuernde Prozess kann eine einfache Maschinenkomponente sein, wie ein Vorschubantrieb für einen Maschinentisch, aber auch ein gesamtes Fertigungssystem, wie ein Bearbeitungszentrum oder eine Transferstraße.

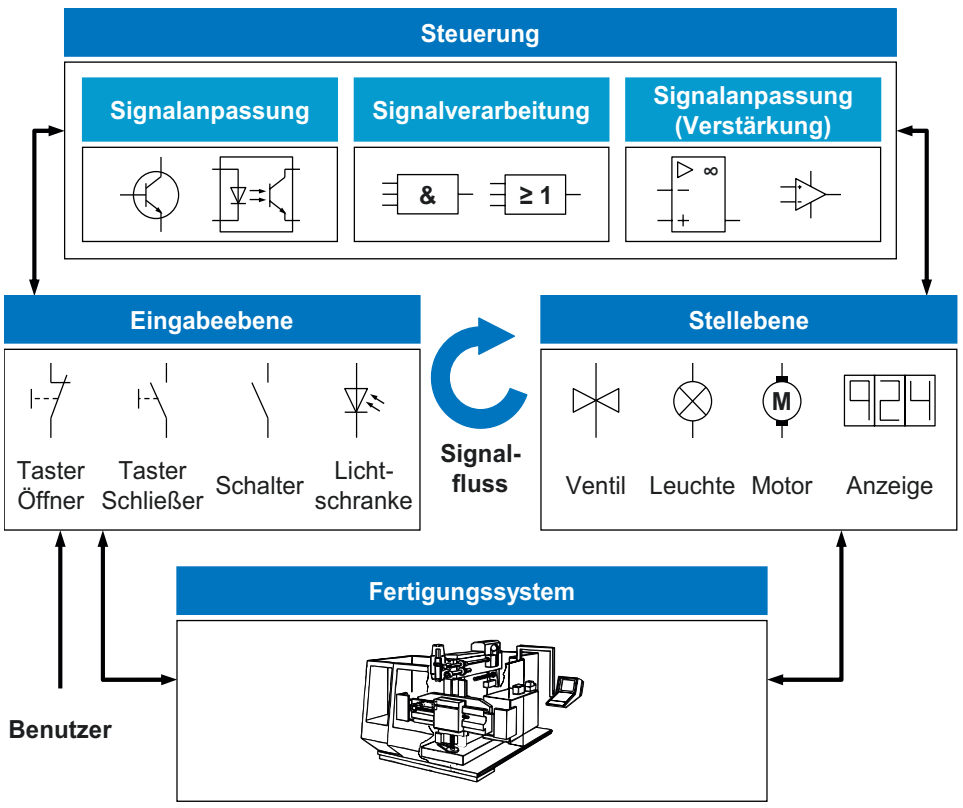
Da bei umfangreichen Steuerungsaufgaben der Logikanteil sehr komplex und dadurch unübersichtlich werden kann, können Planung und Entwurf der Steuerungslogik durch den Einsatz der Boole'schen Algebra und der zugehörigen grafischen Hilfsmittel wirkungsvoll unterstützt werden. Eine der Zielsetzungen ist es dabei, die Anzahl der logischen Verknüpfungsfunktionen zur Beschreibung der Steuerungsaufgabe zu minimieren, um auf diese Weise z. B. den Geräteaufwand bei Relaissteuerungen so gering wie möglich zu halten. Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) sind allerdings heute so leistungsfähig, dass auf die Minimierung der logischen Verknüpfungsfunktionen zu Gunsten einer besseren Nachvollziehbarkeit häufig verzichtet werden kann. Bei hohen Echtzeitanforderungen an die Steuerung lassen sich jedoch mit Hilfe der Boole'schen Algebra die Zykluszeit eines Programms verkürzen.

10.1 Aufbau und Einordnung von elektrischen Steuerungen

In ◘ Bild 10.1 ist der Aufbau und Signalfluss einer elektrischen Steuerung schematisch dargestellt.

In der *Eingabeebene* findet die Erfassung der Prozesssignale statt. Die Signale können dabei beispielsweise prozessinterne Sensorsignale oder externe Bedienereingaben sein. Interne Signalgeber sind z. B. Sensoren zur Aufnahme der Maschinenzustände bzw. Prozessrückmeldungen (Temperatur-, Druck-, Füllstandsensoren, Wegaufnehmer, Winkelcodierer usw.). Die Bedienereingaben können über Handbedienelemente einer Werkzeugmaschine wie Handtaster und -schalter erfasst werden.

Bevor die Signale im Logikteil der Steuerung verarbeitet werden können, findet in der Regel eine galvanische Tren-



◘ **Bild 10.1** Schematischer Aufbau und Signalfluss einer elektrischen Steuerung

nung und eine Anpassung an das Spannungsniveau der Steuerung statt. Zur Entkopplung und Signalanpassung werden z. B. Optokoppler oder auch Relais eingesetzt. Im Vergleich zu den elektromechanischen Relais arbeiten die wesentlich schnelleren Optokoppler photoelektrisch: Eine Leuchtdiode erzeugt bei elektrischer Ansteuerung ein Lichtsignal, welches von dem lichtsensitiven Photohalbleiter wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Kernstück der Steuerung ist die eigentliche Signalverarbeitung. Die Ausgangssignale werden durch logische Verknüpfungen der Eingangssignale ermittelt, wobei die Logik durch den Prozess und den Entwickler vorgegeben wird. Die technische Realisierung der logischen Verknüpfung kann entweder elektromechanisch durch Relais bzw. Schütze, elektronisch durch den Einsatz von Halbleiterbauelementen oder durch ein Programm bzw. einen Rechner realisiert sein.

Um die Elemente der Stellebene (Motoren, Kupplungen, Anzeigeelemente etc.) anzusteuern, müssen die Signale häufig durch elektronische Schaltungen verstärkt werden. Bei Relaissteuerungen hingegen reicht die maximale Schaltleistung der Relais meistens aus. Sollen größere Leistungen geschaltet werden, setzt man Schütze ein.

Wie bereits erwähnt, kann die Realisierung der logischen Verknüpfungen auf technisch unterschiedliche Weise erfolgen und stellt gleichzeitig ein wesentliches Unterscheidungskriterium elektrischer Steuerungen dar. Wie in Bild 10.2 dargestellt, lassen sich elektrische Steuerungen prinzipiell in verbindungsprogrammierte (VPS) und speicherprogrammierte Steuerungen (SPS) unterteilen.

Bei einer VPS wird die Steuerungsfunktion durch die Verbindung der Baugruppen (Relais, Schütze, Halbleiterbausteine) untereinander bestimmt. Erfolgt die Verbindung durch Klemmen, Löten oder Schrauben, so kann die Steuerungsfunktion nur durch mechanischen Eingriff verändert werden. In diesem Fall bezeichnet man die Steuerung als festprogrammiert.

Durch steckbare Leitungsverbindungen, Kreuzschienenverteiler oder Diodenmatrizen wird bei einer VPS die Programmlogik änderbar. Solche Steuerungen wurden früher häufig eingesetzt, um unter anderem bei Änderungen des werkstückbedingten Steuerungsablaufes eine einfache *Umprogrammierung* zu ermöglichen. Heute sind jedoch solche Steuerungen, wie beispielsweise die Stecktafelsteuerungen, auch Kreuzschienenverteiler genannt, fast vollständig durch SPS abgelöst worden.

Im Gegensatz zur VPS wird bei einer SPS die Steuerungsfunktion durch ein Programm (Software) bestimmt, das in einem Speicher abgelegt wird. Die Hardware der Steuerung wird dadurch problemunabhängig und ist für einen Gerätetyp im Grundausbau immer gleich. Die weitere Unterteilung dieser Steuerungsart richtet sich nach dem zur Anwendung kommenden Speichertyp.

Bei freiprogrammierbaren Steuerungen kann der Inhalt des Programmspeichers (RAM, batteriegepuffertes CMOS-RAM, EEPROM) ohne mechanische Eingriffe in das Steuerungsgerät

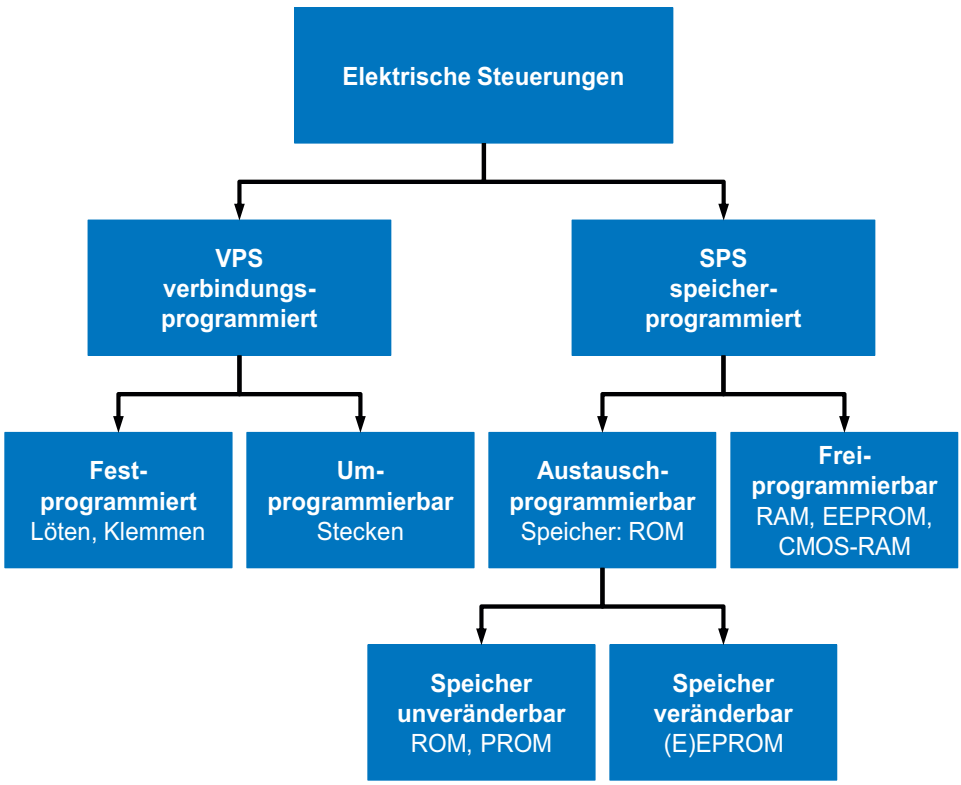


Bild 10.2 Einteilung elektrischer Steuerungen nach Realisierungsformen

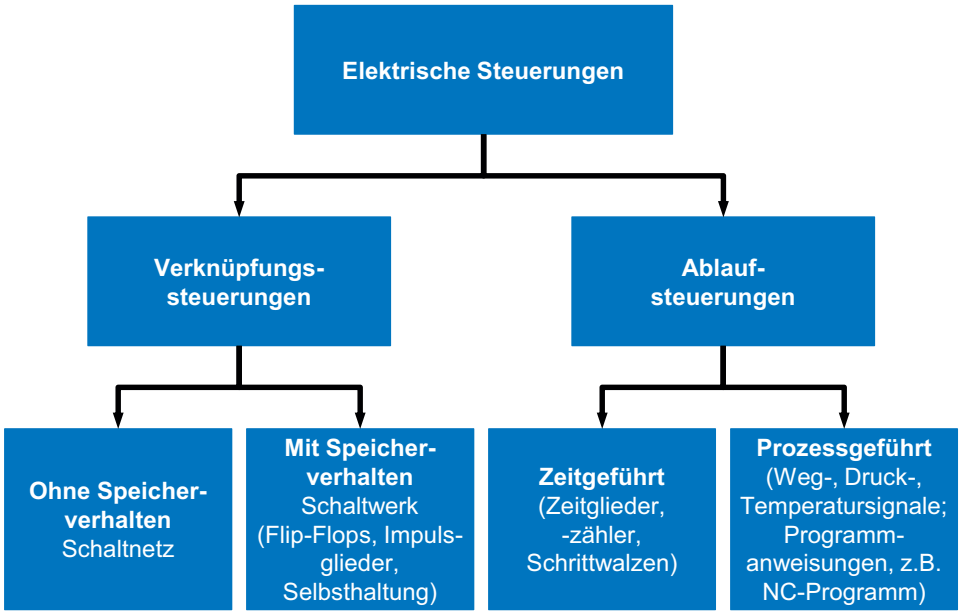


Bild 10.3 Einteilung elektrischer Steuerungen nach dem Steuerungsprinzip

geändert werden. Kommen Nur-Lese-Speicher (ROM = Read Only Memory) zum Einsatz, so handelt es sich um austauschprogrammierbare Steuerungen, d. h. die Software kann nur durch Austausch der Speicherbausteine verändert werden.

Die austauschprogrammierbaren Steuerungen werden nochmals in Steuerungen mit unveränderbarem Speicher (ROM, PROM) oder mit veränderbarem Speicher (EPROM) untergliedert, ▶ Kap. 10.3.2.

Neben der Einteilung von Steuerungen nach der Art der Realisierung des Steuerungsprogramms, ◘ Bild 10.2, wird in der DIN 19226, Teil 3 (Steuerungstechnik) [DIN94] prinzipiell noch zwischen sogenannten Verknüpfungssteuerungen und Ablaufsteuerungen unterterschieden, ◘ Bild 10.3.

10.1.1 Verknüpfungssteuerungen

Der Begriff der Verknüpfungssteuerung ist nach DIN 19226-3 definiert als „eine Steuerung", die aus den Signalzuständen der Eingangssignale, den Ausgangssignalen, im Sinne Boole'scher Verknüpfungen, bestimmte Signalzustände zuordnet. Typische Verknüpfungsfunktionen sind unter anderem UND-, ODER-, NICHT-, NOR- und NAND-Funktionen, ▶ Kap. 9.1.3. Praktische Beispiele für eine Verknüpfungssteuerung sind z. B. eine Kran- oder Baggersteuerung, bei der die Reihenfolge der einzelnen Aktionen allein von der Bedienperson festgelegt wird. Ebenso ist die Steuerung zur Drehrichtungswahl eines Motors oder zur Ansteuerung eines Vorschubantriebes mit allen erforderlichen Verriegelungen weitestgehend eine Verknüpfungssteuerung, ▶ Kap. 10.2.1.

Die Verknüpfungssteuerungen lassen sich wiederum in Steuerungen mit und ohne Speicherverhalten unterteilen, ◘ Bild 10.3.

Bei Verknüpfungssteuerungen *ohne Speicherverhalten*, auch Schaltnetze genannt, hängen die Ausgangssignale zu jedem beliebigen Zeitpunkt allein vom Zustand der Eingangssignale ab. Das Verhalten der Steuerung kann also vollständig durch den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen in Form einer Wertetabelle beschrieben werden, ▶ Kap. 9.1.3.

Bei Verknüpfungssteuerungen *mit Speicherverhalten*, auch Schaltwerke genannt, hängen die Ausgangssignale noch zusätzlich von internen Speicherzuständen bzw. der „Vorgeschichte" des Systems ab. Soll beispielsweise ein Motor durch kurzzeitiges Betätigen eines Tasters eingeschaltet und durch erneutes Betätigen des Tasters wieder ausgeschaltet werden, so ist das Verhalten der Steuerung abhängig von der Vorgeschichte, nämlich ob der Motor zuvor lief oder nicht.

10.1.2 Ablaufsteuerungen

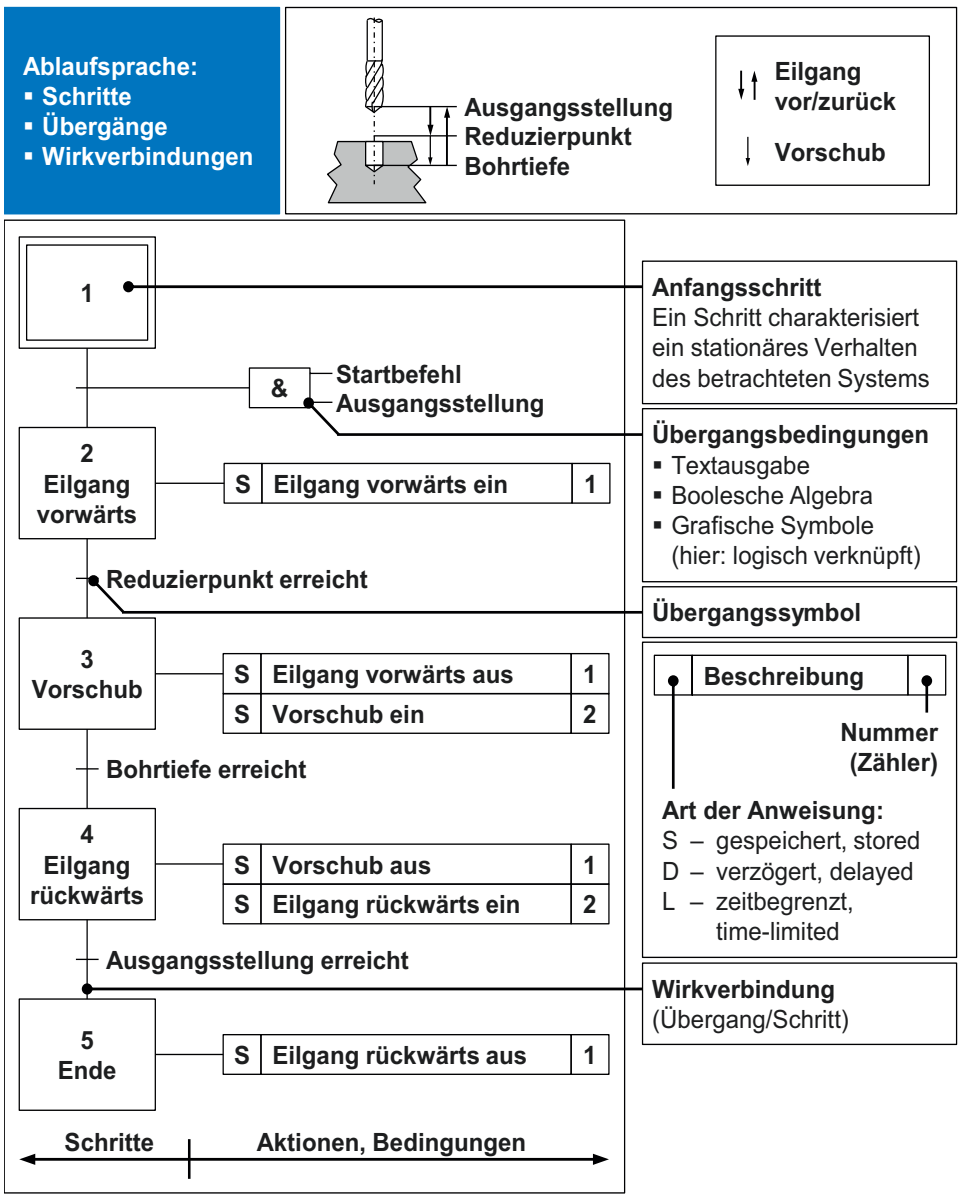
Neben den Verknüpfungssteuerungen sind die Ablaufsteuerungen von großer Bedeutung, wobei im Bereich der Werkzeugmaschinen der Anteil der Ablaufsteuerungen den Anteil der reinen Verknüpfungssteuerungen bei weitem übersteigt [OEST86]. Ablaufsteuerungen sind Steuerungen mit zwangsläufig schrittweisem Ablauf, wobei das Weiterschalten von einem auf den programmgemäß folgenden Schritt in Abhängigkeit von Weiterschaltbedingungen erfolgt. Wichtigste Eigenschaft der Ablaufsteuerung ist dabei die eindeutige funktionelle und zeitliche Zuordnung der einzelnen Schritte zu technologischen Abläufen. Während bei der Verknüpfungssteuerung alle Verknüpfungen zu jedem beliebigen Zeitpunkt ausführbar sind, werden bei Ablaufsteuerungen die zu

einem Schritt gehörenden Steuerungsanweisungen nur ausgeführt, wenn die entsprechende Weiterschaltbedingung des vorherigen Schrittes erfüllt ist.

Sind die Weiterschaltbedingungen nur von der Zeit abhängig, spricht man von einer *zeitgeführten* Ablaufsteuerung. Zum Erzeugen der Weiterschaltbedingungen können z. B. Zeitglieder, Zeitzähler oder Schaltwalzen mit gleichbleibender Drehzahl benutzt werden. Sind hingegen die Weiterschaltbedingungen nur von Signalen der gesteuerten Anlage bzw. dem Prozess abhängig, z. B. dem Erreichen der Endlage einer Vorschubbewegung mit anschließendem Weiterschalten auf eine andere Achsbewegung, handelt es sich um eine *prozessgeführte* Ablaufsteuerung, ◘ Bild 10.3.

Wenngleich die Begriffe Verknüpfungs- und Ablaufsteuerung in der DIN 19226-3 eindeutig voneinander abgegrenzt sind, ist zu beachten, dass insbesondere komplexere Maschinensteuerungen eine Kombination der vorgenannten Steuerungen enthalten können [BIEL90] und die Übergänge von einer Verknüpfungssteuerung mit Speicherverhalten zu einer Ablaufsteuerung fließend sind [ZAST95]. Können den Zuständen des Steuerungsprogramms jedoch eindeutig Ablaufschritte der Anlage zugeordnet werden, so wird das Steuerungsprinzip als Ablaufsteuerung bezeichnet. In diesem Sinne stellt auch die numerische Steuerung (NC) einer Werkzeugmaschine eine Ablaufsteuerung dar, weil den einzelnen Zeilen des NC-Programmes eindeutig einzelne Schritte bei der Bearbeitung des Werkstückes zugeordnet werden können, ▶ Kap. 11.

Ein praktisches Beispiel für eine prozessgeführte Ablaufsteuerung ist die Steuerung eines Montageautomaten [PLAG90]. Entsprechend dem schrittweisen Arbeitsablauf des Automaten – zuführen, spannen, schrauben, entspan-



◘ **Bild 10.4** Ablaufsteuerung eines Bohrwerks mit Ablaufsprache. Nach DIN EN 60848 und DIN EN 61131-3

nen, transportieren usw. – muss die Steuerung das Handlinggerät drehen, senken, greifen, heben, öffnen usw.

Charakteristisch für eine Ablaufsteuerung ist außerdem ein weitgehend automatischer Ablauf. Dieser wird durch ein Startsignal ausgelöst und bis zum Ende selbsttätig weitergeführt.

Ein weiteres Beispiel zu Arbeitsweise und Eigenschaften einer Ablaufsteuerung zeigt ◘ Bild 10.4. Es handelt sich hier um einen Teil der Steuerung für ein Bohrwerk. Der Steuerungsablauf ist in Schritte aufgeteilt, die der Arbeitsfolge des Bohrvorgangs entsprechen.

Zur Darstellung des Ablaufes ist die Ablaufsprache nach DIN EN 60848 und DIN EN 61131-3, [DIN14b; DIN14c] gewählt worden, da sich hiermit die Funktionen und das Verhalten einer Steuerung anschaulich und realisierungsunabhängig beschreiben lassen. Zudem eignet sich die Ablaufsprache als Verständigungsmittel zwischen verschiedenen an der Steuerungsprojektierung beteiligten Fachleuten, z. B. Konstrukteure und Steuerungstechniker, ▶ Kap. 10.3.4.

Die Ablaufsprache ist im Wesentlichen durch drei Symbole definiert: Schritte, Übergangs- bzw. Transitionsbedingungen und Wirkverbindungen, die Schritte und Übergänge miteinander verbinden, ◘ Bild 10.4. Die Schritte beschreiben einzelne Zustände (z. B. Schritt 2, *Eilgang vorwärts*), denen ein oder mehrere Befehle (z. B. *Eilgang vorwärts ein*) zugeordnet sein dürfen. Transitionsbedingungen (z. B. *Reduzierpunkt erreicht*) beschreiben zu erfüllende Zustände, um von einem Schritt in den nächsten zu wechseln. Die Syntax des Funktionsplanes wird am Beispiel des Bohrwerkes im ◘ Bild 10.4 deutlich.

Der Ausgangszustand, der das Anfangsverhalten der Steuerung beschreibt, wird durch den *Anfangsschritt* (Schritt 1) dargestellt. Ausgelöst wird der Bohrzyklus durch einen Startbefehl, z. B. manuell vom Bediener oder automatisch von einer angekoppelten Fertigungseinrichtung. Befindet sich der Bohrer in der Ausgangsstellung, beginnt der Bohrzyklus durch Einschalten des Eilgangs (Schritt 2). Bei Erreichen des Reduzierpunkts wird ein Schaltnocken betätigt (Transitionsbedingung von Schritt 2 zu Schritt 3) und die Geschwindigkeit auf normalen Vorschub reduziert. Der Ablauf von Schritt 3 nach 5 erfolgt analog. Schließlich führt Schritt 5 wieder in den Ausgangszustand 1 und ermöglicht die Auslösung des nächsten Bohrzyklus.

Nachdem in diesem Abschnitt eine grundlegende Einordnung elektrischer Steuerungen hinsichtlich der Realisierungsform und des Steuerungsprinzips vorgenommen wurde, soll in den folgenden beiden Abschnitten näher auf die beiden wichtigsten Realisierungsformen, die verbindungsprogrammierten, ▶ Kap. 10.2, sowie die speicherprogrammierbaren Steuerungen, ▶ Kap. 10.3, eingegangen werden.

10.2 Verbindungsprogrammierte Steuerungen (VPS)

10.2.1 Anwendungsgebiete und Aufgaben

Während die verbindungsprogrammierten Steuerungen in vielen Anwendungsgebieten von den flexibleren und leistungsfähigeren speicherprogrammierbaren Steuerungen verdrängt worden sind, kommen sie bei relativ einfachen Steuerungsaufgaben sowie insbesondere bei sicherheitskritischen Anwendungen noch häufig zum Einsatz, ▶ Kap. 10.4. Durch die rasante Entwicklung im Bereich der Mikroelektronik und dem damit verbundenen Preisverfall für elektronische Bauteile, insbesondere bei den Mikroprozessoren, bieten SPS bereits bei einem Steuerungsumfang von etwa fünf bis zehn Relais bzw. Schützen Kostenvorteile. Aber auch dann kann auf den Einsatz von Schützen nicht ganz verzichtet werden, da größere elektrische Ströme, z. B. von Hauptantrieben und größeren Magnetventilen, nicht direkt von der SPS, sondern nur über sogenannte Haupt- bzw. Lastschütze geschaltet werden können.

Bei erhöhten Sicherheitsanforderungen, z. B. bei Pressensteuerungen oder zur Überwachung des Not-Aus-Kreises an Werkzeugmaschinen, haben VPS zudem den Vorteil der geringeren Komplexität und erlauben eine einfache Erkennung von Fehlfunktionen, ▶ Kap. 10.4.3.

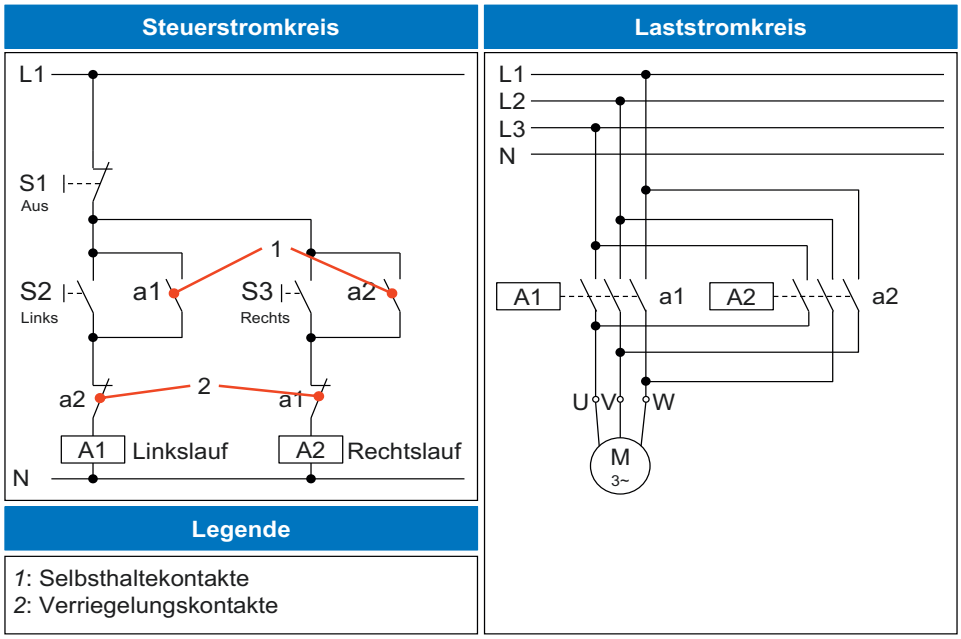
Neben einfachen logischen Grundschaltungen, lassen sich mit Relaisschaltungen auch Zeitverzögerungen oder Impulse beliebiger Länge erzeugen, z. B. als Taktgeber. Dazu verwendet man sogenannte Zeitrelais, an denen definierte Ein- bzw. Ausschaltverzögerungen eingestellt werden können. Anhand von Beispielen bei Werkzeugmaschinen sollen nachfolgend einige typische Anwendungen von verbindungsprogrammierte Steuerungen vorgestellt werden.

10.2.2 Anwendungsbeispiele

Wie bereits erwähnt, sind Verknüpfungs- und Ablaufsteuerungen unabhängig von der Realisierungsform und lassen sich auch als verbindungsprogrammierte Steuerung verwirklichen. Die in fast allen Steuerungen vorkommenden Funktionen *Selbsthaltung* und *Verriegelung* sollen im Folgenden anhand einer einfachen Verknüpfungssteuerung erläutert werden. ◘ Bild 10.5 zeigt dazu einen Stromlaufplan zur Steuerung der Drehrichtung eines Drehstrommotors. Abgebildet ist sowohl der Steuerstromkreis, der meist mit 12 bis 24 V Gleichspannung betrieben wird, als auch der Laststromkreis mit dem zu steuernden Drehstrommotor, der direkt an das 380-V-Dreiphasennetz (L1 bis L3) angeschlossen ist.

Betrachtet man den linken Strompfad im Steuerstromkreis, so kommt die Funktion *Selbsthaltung* auf folgende Weise zustande. Wird der Taster S2 gedrückt, so fließt der

Bild 10.5 Schaltung zur Drehrichtungsauswahl eines Drehstrommotors

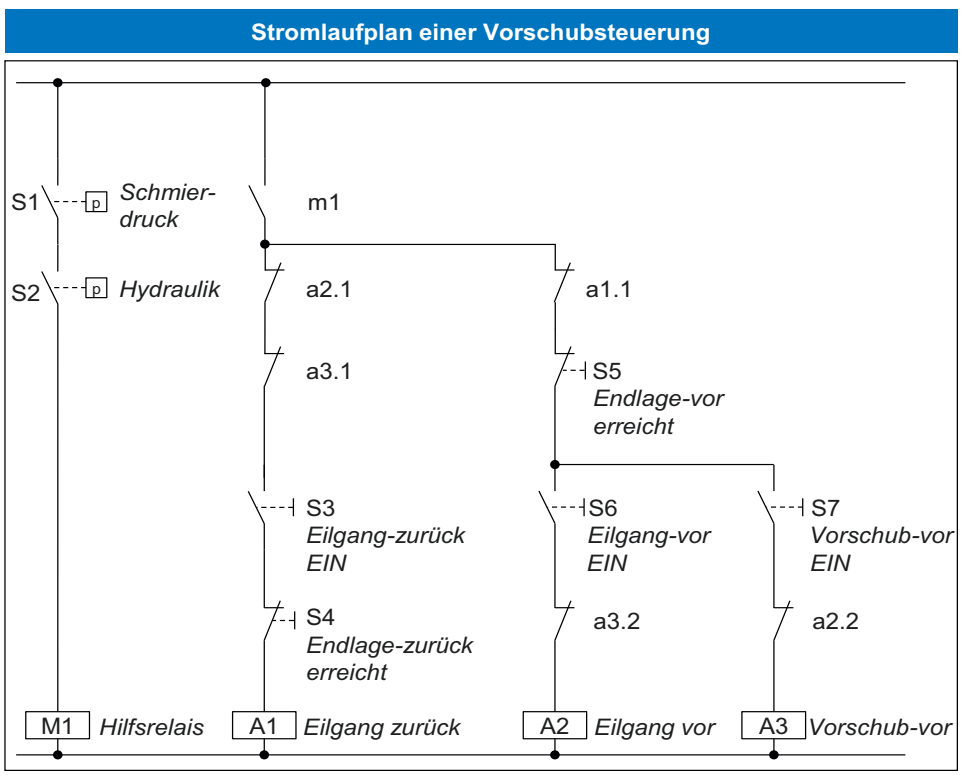


Strom über die Kontakte S1, S2, a2 durch das Schütz A1. Das Schütz A1 wird erregt, und alle Hilfskontakte von A1 (Kennzeichnung mit a1) werden in die Arbeitsstellung bewegt. Dadurch schaltet der im Laststromkreis dargestellte Antriebsmotor auf Linkslauf.

Durch das Schließen des Hilfskontaktes a1 parallel zum Schalter S2 wird der Stromfluss durch A1 auch nach der Öffnung von S2 aufrechterhalten – A1 hält sich somit selbst. Der Parallelkontakt a1 heißt „Selbsthaltekontakt“ und die Schaltung „Selbsthaltung“. Zum Ausschalten des Linkslaufs dient der Taster S1, der bei Betätigung den Stromkreis unterbricht, wodurch das Schütz A1 abfällt.

Der rechte Teil der Schaltung im Steuerstromkreis dient sinngemäß dazu, den Antriebsmotor über das Schütz A2 auf Rechtslauf zu schalten. Die Drehrichtungsumkehr erfolgt durch einfaches Vertauschen von zwei Leitungsphasen L1

Bild 10.6 Realisierung einer Vorschubsteuerung



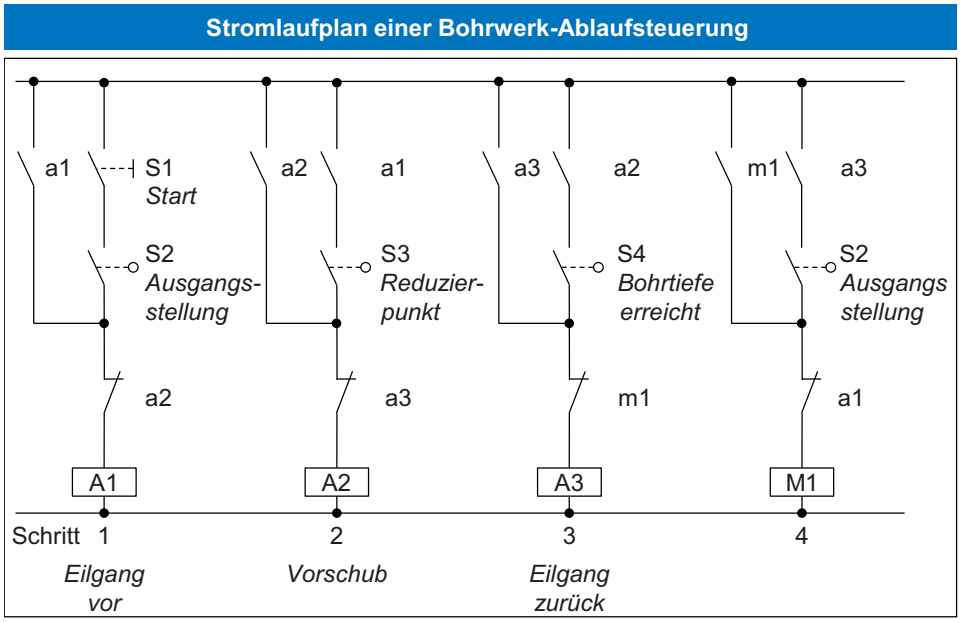


Bild 10.7 Stromlaufplan für die Ablaufsteuerung eines B6.1.3 Einflussgrößen auf die Funktion der Fertigungsmittel und die Qualität der Produkteach
Bild 10.4

10

und L2 bzw. V und W. Um eine gleichzeitige Schaltung in Rechts- und Linkslauf zu verhindern, ist ein Hilfskontakt des Schütz a1 – ein Öffner – vor dem Schütz A2 vorgesehen. Ist Schütz A1 angezogen, so ist dieser Kontakt a1 geöffnet und A2 kann nicht erregt werden. Analog wird der Strompfad von Schütz A1 gegen gleichzeitiges Einschalten von Schütz A2 gesichert. Diese Schaltung nennt man „Verriegelung"; die zugehörigen Kontakte sind „Verriegelungskontakte".

Als Beispiel für eine etwas kompliziertere Verknüpfungssteuerung soll im Folgenden die Steuerung eines Vorschubantriebes aus Bild 10.6 betrachtet werden.

Der Vorschubantrieb erlaubt drei Bewegungen: Eilgang-Vor, Eilgang-Rück und Arbeitsvorschub. Jede dieser Tischbewegungen lässt sich über einen Taster einschalten und bleibt so lange erhalten, bis der Taster losgelassen wird. Jedoch wird der Tastendruck nur dann wirksam, wenn keine der beiden anderen Bewegungen betätigt ist (Verriegelung). Die Bewegungen ruhen, sobald ein Endtaster angefahren wird. Ein Tastendruck ist ebenfalls unwirksam, wenn entweder die Hydraulik oder die Schmierung gestört sind.

Die beschriebene Verknüpfungssteuerung lässt sich auch in Halbleitertechnik realisieren. Festverdrahtete Halbleitersteuerungen findet man jedoch heute kaum noch, da sie durch die flexibleren speicherprogrammierbaren Steuerungen, ▶ Kap. 10.3, verdrängt worden sind.

Zur Realisierung von *Ablaufsteuerungen* können die gleichen Bauelemente eingesetzt werden wie bei Verknüpfungssteuerungen (Schütze, Halbleiterbausteine). Bild 10.7 zeigt die Realisierung der Steuerungsaufgabe aus Bild 10.4 als Beispiel für eine Ablaufsteuerung in verbindungsprogrammierter Form. Da in diesem Beispiel die Weiterschaltbedingungen prinzipiell gleich sind, sei die Schaltung lediglich für den ersten Schritt erläutert. Befindet sich der Bohrer in der Ausgangsstellung und wird der Starttaster S1 betätigt, so zieht das Schütz A1 an, und der Eilgang-vor wird eingeschaltet. Der Nockenschalter S2 für die Ausgangsstellung öffnet, aber Schütz A1 bleibt über seinen Selbsthaltekontakt a1 zunächst noch im angezogenen Zustand. Mit dem aktiven Schütz A1 ist auch dessen Hilfskontakt a1 im Strompfad für A2 geschlossen. Sobald nun der Nockenschalter S3 für den Reduzierpunkt schließt, zieht Schütz A2 an und öffnet den Verriegelungskontakt a2 im Strompfad von A1, sodass A1 wieder abfällt. Der jeweils nächste Schritt löscht also den vorhergehenden, bis ein Bohrzyklus abgelaufen ist.

10.3 Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)

10.3.1 Anwendungsgebiete und Aufgaben

Seit ihrer Markteinführung zu Beginn der 1970er Jahre werden speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS, engl. PLC = Programmable Logic Controller) in nahezu allen Industriebereichen eingesetzt und gehören heute zu den wichtigsten Bausteinen der Automatisierungstechnik. Dienten SPS zunächst als preiswerte und flexible Alternative zu den bis dahin ausschließlich eingesetzten Relaissteuerungen, so geht ihr Funktionsumfang heute weit über die Verknüpfung binärer Signale hinaus. Die stark gestiegene Leistungsfähigkeit der Hardware hat dazu geführt, dass mit einer SPS immer komplexere Steuerungsaufgaben wirtschaftlich lösbar sind und auch die früher eingesetzten Prozessrechner durch die Entwicklung schneller Multiprozessorsysteme weitestgehend abgelöst worden sind. Die Anwendungsgebiete von SPS sind

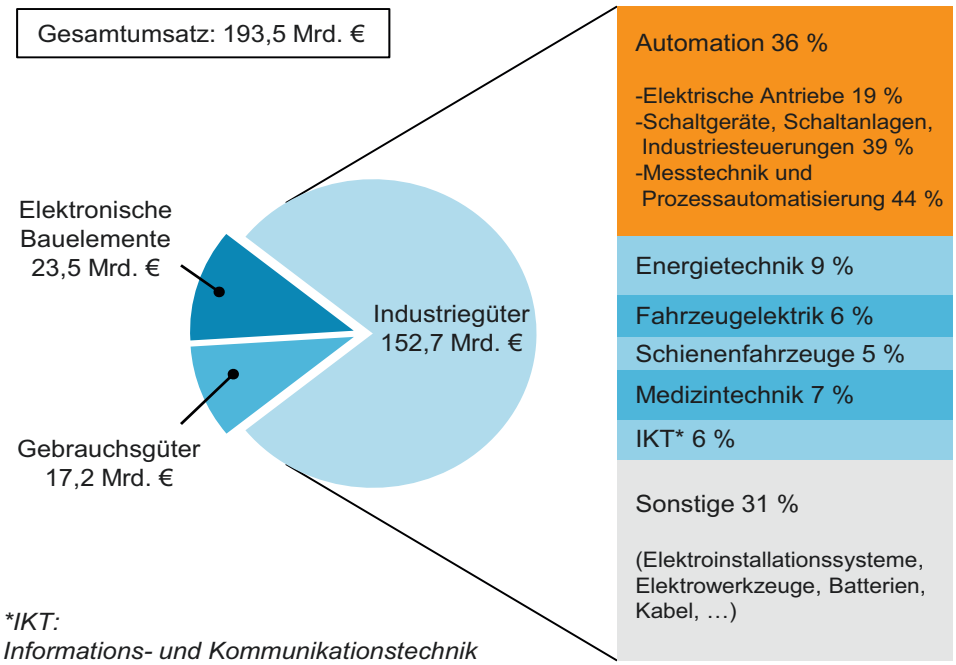


Bild 10.8 Anteil der Automatisierungstechnik am Branchenumsatz der Industriegüter in der deutschen Elektroindustrie im Jahr 2018. Quelle: [ZVEI19]

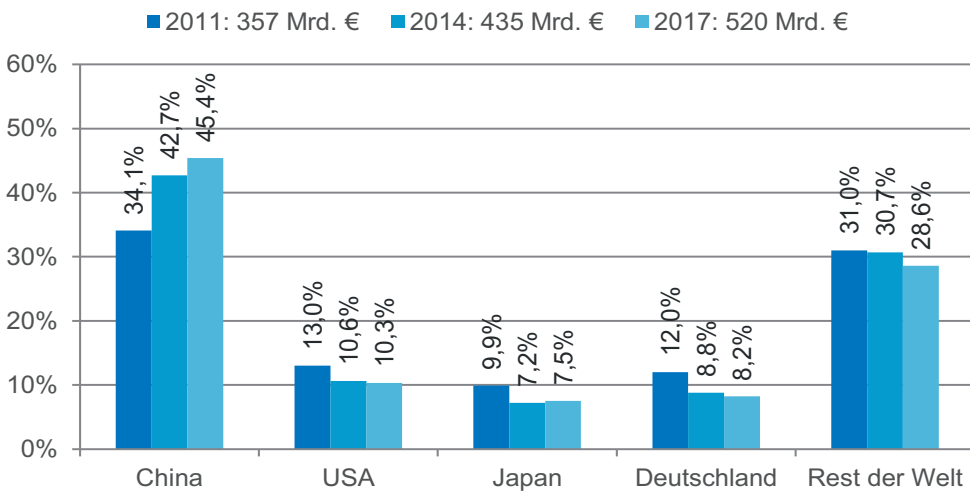


Bild 10.9 Globale Produktion und Länderanteile in der Automatisierungsbranche. Quelle: [KEGE14; KEGE16; KEGE19]

demzufolge sehr vielfältig und finden sich hauptsächlich in der Automatisierungsbranche. In Deutschland wird in ihr heute mehr als ein Viertel (28 %) des Umsatzes des deutschen Elektromarkts erwirtschaftet, was gut ein Drittel (35 %) des Sektors für Industriegüter ausmacht [ZVEI19], vgl. Bild 10.8.

Hinsichtlich der globalen Produktion nimmt Deutschland ebenfalls einen nicht unwesentlichen Stellenwert in der Automatisierungsbranche ein, Bild 10.9. Das Marktvolumen der deutschen Elektroindustrie betrug im Jahr 2017 122 Mrd. €, entsprechend einem Anteil von 3 % am Welt-Elektromarkt.

Bild 10.10 gibt einen Überblick über die Aufgaben, die SPS bei Werkzeugmaschinen übernehmen können. Die Hauptaufgaben der SPS sind die Steuerung und Überwachung der mechanischen Funktionseinheiten, wozu neben den logischen Verknüpfungen und Verriegelungsfunktionen auch die Zeit- und Plausibilitätsüberwachung einzelner Baugruppen gehören (z. B. Schwenkzeitüberwachung des Werkzeugwechslers oder Paarüberwachung von Endschaltern).



Bild 10.10 Aufgaben von SPS bei Werkzeugmaschinen

10

Weiterhin werden zahlreiche Funktionen des HMI (Human Machine Interface), wie z. B. Ein- und Ausschalten der Antriebe, die Kühlmittelzufuhr sowie der Späneförderer, von der SPS gesteuert.

Darüber hinaus werden SPS heute auch zur Erfassung, Aufbereitung und Weiterleitung von Prozessdaten (BDE: Betriebsdatenerfassung) oder zur Verwaltung der in der Maschine verfügbaren Werkzeuge eingesetzt. Größere Datenverarbeitungsaufgaben werden jedoch häufig von einem mit der SPS verbundenen Industrie-Personal-Computer (IPC) übernommen, vgl. ► Kap. 10.3.2.1. Bei Werkzeugmaschinen müssen SPS außerdem meist den Informationsaustausch mit der numerischen Steuerung (NC) bewältigen, vgl. ► Kap. 11. Während die NC aus dem zugrundeliegenden NC-Programm die geometrischen Informationen zum Verfahren der Achsen (Koordinaten, Vorschubgeschwindigkeiten) extrahiert und verarbeitet, werden die in den NC-Sätzen enthaltenen Schaltanweisungen (z. B. M- und T-Befehle) an die SPS weitergeleitet und von dieser ausgeführt. Weitere Signale zwischen NC und SPS dienen der Synchronisation beider Systeme sowie dem Austausch von Zustandsmeldungen und sonstigen Informationen (NC-Programm beendet, Fehlermeldungen usw.). Neben dem Datenaustausch mit der NC kann die SPS auch mit einem übergeordneten Leitrechner oder mit den SPS anderer Maschinen kommunizieren. Ein typisches Beispiel hierfür ist eine verkettete Transferstraße, bei der jede Bearbeitungsstation von einer eigenen SPS gesteuert wird.

Bei SPS wird die Steuerungsaufgabe nicht, wie bei VPS üblich, durch eine geeignete Verschaltung von Relais oder Schützen, sondern durch ein Steuerungsprogramm realisiert. Daher können Änderungen der Steuerungsaufgabe

	Verbindungsprogrammierte Steuerung	Speicherprogrammierbare Steuerung
Programmierung	Hardware (Verdrahtung)	Software (Anweisungen)
Arbeitsweise	parallel	seriell
Technologie	elektromechanisch (Relais) oder kontaktlos (Halbleiterelemente)	kontaktlos (Halbleiterelemente) (Mikroprozessor)

Bild 10.11 Gegenüberstellung von verbindungsprogrammierter und speicherprogrammierbarer Steuerung

ohne zusätzlichen Verdrahtungsaufwand durch einfaches Ändern des SPS-Programms durchgeführt werden. Die Steuerungshardware ist problemunabhängig aufgebaut und hat die Aufgabe, die im Steuerungsprogramm festgelegten Verknüpfungen von Prozesssignalen durchzuführen und die Verknüpfungsergebnisse an den Prozess auszugeben. Da eine SPS taktgesteuert arbeitet, d. h. eine Anweisung nach der anderen abgearbeitet wird (serielle Arbeitsweise) und somit zu einem Zeitpunkt nur ein einziger Signalzustand verarbeitet werden kann, ergibt sich ein weiterer Unterschied zur VPS, die beliebig viele Signalzustände gleichzeitig verarbeiten kann (parallele Arbeitsweise). Da die Zeit zur Ausführung einer Anweisung im Mikrosekundenbereich liegt, kann jedoch von einer quasiparallelen Arbeitsweise gesprochen werden. Die wesentlichen Merkmale beider Steuerungsarten sind in ◘ Bild 10.11 zusammengefasst.

10.3.2 Aufbau und Funktionsweise

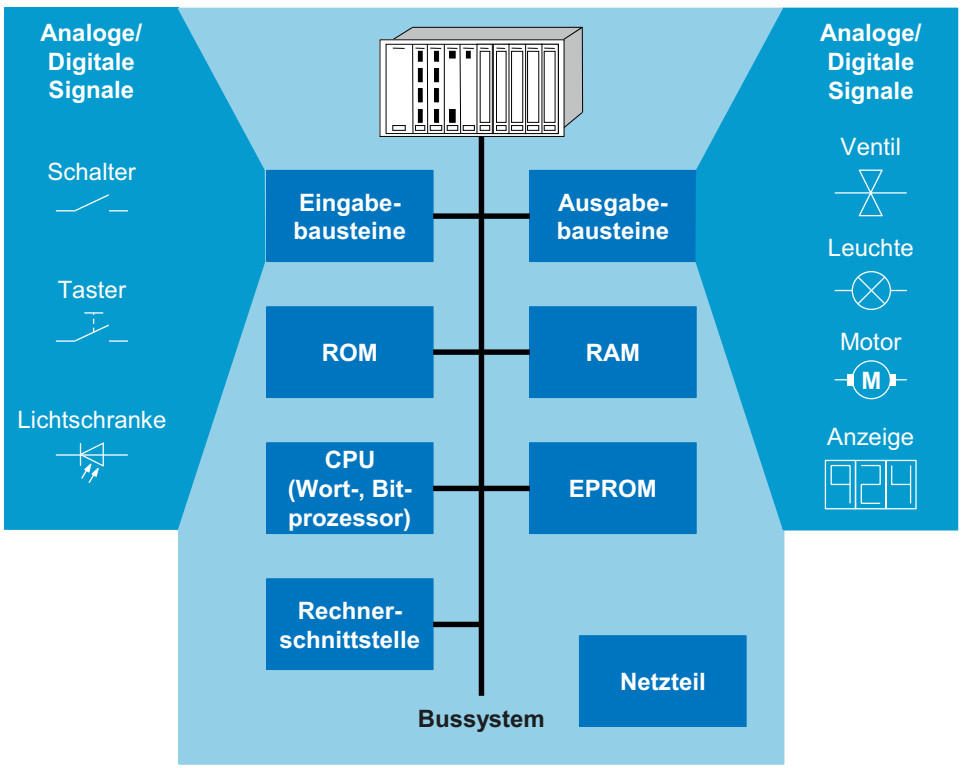
10.3.2.1 Aufbau

◘ Bild 10.12 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer SPS, die sich schematisch in Eingabe-, Ausgabe- und Verarbeitungsteil untergliedern lässt. An die Ein- und Ausgangsbaugruppen einer SPS werden die Signalgeber und Stellglieder des zu steuernden Prozesses unmittelbar über Klemm- oder Steckverbindungen angeschlossen.

Die Eingangsbaugruppen haben die Aufgaben, den Spannungspegel der Stellelemente (z. B. 24 V oder 220 V) an die Systemspannung der SPS (5 V) anzupassen, die Signale zu entstören (z. B. mit RC-Filtern, um Störspannungsspitzen auszufiltern) und sie galvanisch von der SPS zu trennen (z. B. mit Optokopplern). Eingebaute Leuchtdioden (LED) zeigen zur Kontrolle den jeweiligen Signalzustand an.

Die Ausgangsbaugruppen enthalten neben den Elementen zur galvanischen Trennung und den LED zur Anzeige der Signalzustände noch einen Ausgangsverstärker, der die SPS-internen Signale verstärkt und die zur Ansteuerung der Stellglieder notwendige Ausgangsleistung zur Verfügung stellt. Die Ausgangsbaugruppen sind meist für einen Signalpegel von 24 V Gleichspannung ausgelegt, es sind jedoch auch andere Spannungen üblich, z. B. 5- V-Gleich- oder 220-V-Wechselspannung. Die von den Ausgangsbaugruppen gelieferten Ströme (ca. 0,5 bis 2 A) reichen meist zur unmittelbaren Ansteuerung der Stellglieder aus. Zur Bereitstellung größerer Ausgangsleistungen, z. B. bei der Ansteuerung von Antriebsmotoren, werden meist Leistungsschütze zwischengeschaltet.

Kernstück jeder SPS ist der Verarbeitungsteil, der aus einem oder mehreren Prozessoren (CPU) und unterschiedlichen Speichern (RAM, ROM, EPROM) besteht. Da moderne Mikroprozessoren byte- oder wortorientiert arbeiten (8, 16, 32 Bit), typische Anwendungsfälle in der Steuerungstechnik jedoch reine Bitoperationen darstellen (z. B. Spannfutter öffnen/schließen), wurden bei SPS neben einem Wortprozessor vielfach spezielle Bitprozessoren eingesetzt. Neben dem Bit-



◘ **Bild 10.12** Hardware-Komponenten einer speicherprogrammierbaren Steuerung

prozessor, der für die Verarbeitung der rein binären Signale zuständig ist, übernimmt der Wortprozessor die Analogwert- und Textverarbeitung sowie arithmetische Berechnungen. Bei der Programmierung können Bit- und Wortoperationen beliebig kombiniert werden, da die Aufgabenteilung steuerungsintern erfolgt und keinen Einfluss auf die Programmierung hat. Wegen der Leistungsfähigkeit heutiger Prozessoren sind moderne SPS jedoch meist Einprozessorsysteme. Werden sehr hohe zeitliche Anforderungen an die SPS gestellt, werden auch SPS, die die Möglichkeit des echten Multiprozessorbetriebes bieten, eingesetzt. Dabei wird ein Steuerungsprogramm auf unterschiedliche Prozessoren aufgeteilt.

Der Speicher einer SPS kann in System-, Programm- und Datenspeicher unterteilt werden. Das Betriebssystem der Steuerung, das z. B. für das Einlesen und die korrekte Abarbeitung von Anwenderprogrammen oder die Überwachung der Zykluszeit zuständig ist, ist in einem *Systemspeicher*, dem ROM (Read-Only Memory), abgelegt und kann vom Anwender nicht manipuliert werden. Das Anwenderprogramm wird meist auf einem externen Programmiergerät erstellt und kann über eine Schnittstelle in den *Programmspeicher*, das (meist batteriegepufferte) RAM (Random-Access Memory), der SPS geladen werden. Um ein Programm sicherer abzulegen, kann es zusätzlich in einem EPROM (Erasable Programmable ROM) gespeichert werden. In diesem Speicher bleibt das Programm auch ohne Batteriepufferung nach dem Abschalten der SPS erhalten. Bei jedem Einschalten der Steuerung wird dann das Programm aus dem EPROM in das RAM übertragen. Bei entsprechender Voreinstellung läuft beim Einschalten einer SPS das Programm automatisch an.

Bei der Programmabarbeitung anfallende Zwischenergebnisse (z. B. Merker) werden kurzfristig im *Datenspeicher* (RAM) abgelegt. Mittels austauschbarer Speicherkarten (CF-Karten) können Maschinendaten gespeichert, portiert und abgerufen werden.

Ein Ausführungsbeispiel einer modular aufgebauten SPS zeigt Bild 10.13. Da die einzelnen Hardwarekomponenten der Steuerung als separate Baugruppen realisiert sind, kann eine SPS je nach Anzahl der benötigten (digitalen und analogen) Ein- und Ausgänge, dem notwendigen Speicherplatz und den externen Schnittstellen anlagenspezifisch konfiguriert werden. Da auch die Zentralbaugruppe mit der CPU (Central Processing Unit) als separate Baugruppe ausgeführt ist, kann bei steigenden Anforderungen an die Steuerung die Verarbeitungsgeschwindigkeit durch Einbau einer leistungsfähigeren CPU-Baugruppe vergrößert werden.

Zusätzlich können SPS-Steuerungen über eine Positionierbaugruppe verfügen. Solche Baugruppen erlauben es, auch Antriebe mit Hilfe einer SPS anzusteuern. Typische Anwendungen sind hier Handhabungseinrichtungen sowie Textil-, Verpackungs- und Druckmaschinen. Für Werkzeugmaschinen werden zur Steuerung der Achsen hingegen in der Regel numerische Steuerungen (NC) eingesetzt. Hierzu bieten die Steuerungshersteller integrierte Lösungen – d. h. Steuerungshardware mit SPS-, NC- und HMC- (Human Machine Communication) Komponenten – an, vgl. ▶ Kap. 11.

Wenn von einer SPS größere Datenmengen verarbeitet werden sollen, kann diese Aufgabe auch an einen Industrie-Personal-Computer (IPC) übertragen werden. Ein Industrie-PC ist ein „industrietauglicher" PC, der wie eine SPS Anfor-

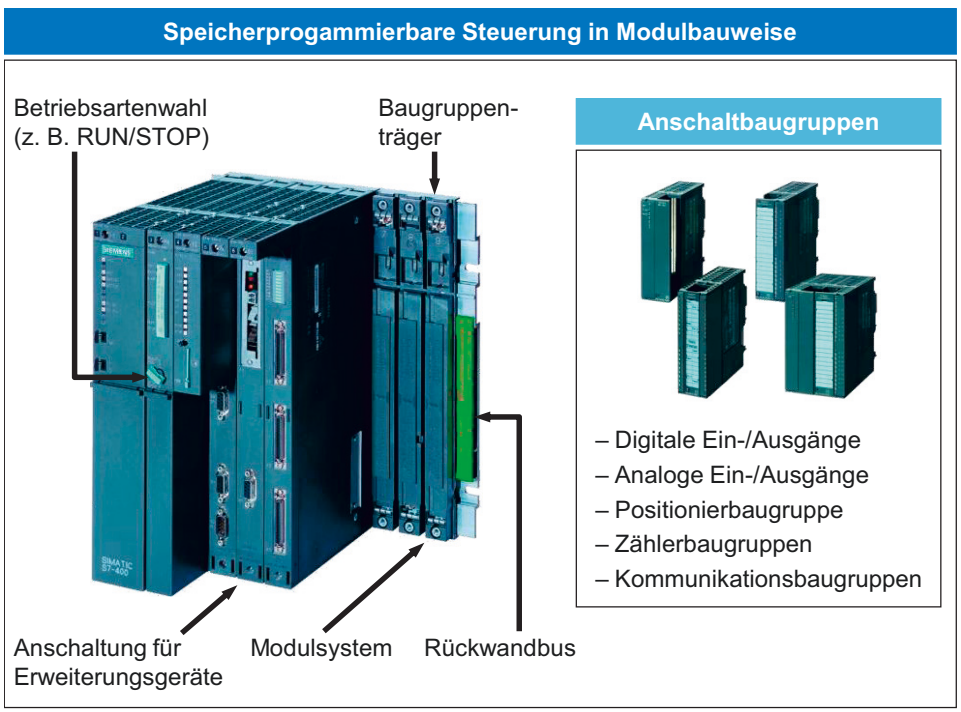


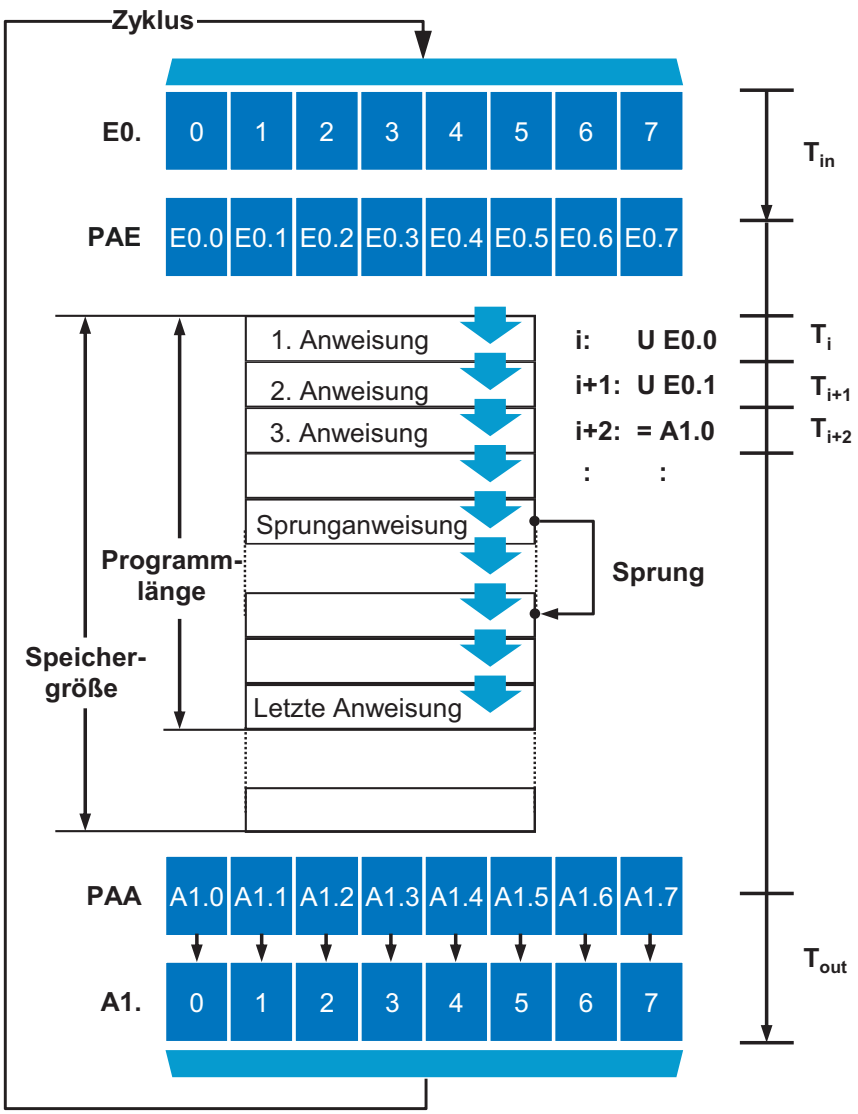
Bild 10.13 Speicherprogrammierbare Steuerung in Modulbauweise. Quelle: SIEMENS

derungen an die Hardware – wie Temperatur-, Vibrations- und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – erfüllt. Durch den Datenaustausch zwischen SPS und IPC können komplexe Datenverarbeitungsaufgaben (wie z. B. Werkzeugdatenverwaltung, Betriebsdatenerfassung etc.) vom IPC übernommen werden. Der IPC kann auch zusammen mit einem Bildschirm und einer Bedientafel als Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl.: Human Machine Interface, HMI) zur Visualisierung von Daten und zur Bedienung der zu steuernden Anlage dienen. Der Vorteil eines IPC liegt dabei in der Möglichkeit, bestehende, für PCs entwickelte Softwareanwendungen einzusetzen sowie in der einfachen Anbindung der Steuerung an Leit- oder Betriebsrechner. Außerdem kann der IPC auch zur Erstellung der SPS-Programme durch den Programmierer, vgl. ▶ Kap. 10.3.3, genutzt werden.

Neben der Anbindung von SPS an externe IPC oder der Erweiterung modularer SPS um IPC-Baugruppen setzen sich zunehmend reine IPC-Lösungen durch. Die SPS wird dabei entweder hardwaretechnisch in Form einer Steckkarte in den IPC integriert oder softwaretechnisch als sogenannte „Soft-SPS", d. h. ohne eigenständigen SPS-Prozessor, auf dem IPC realisiert [INTE15]. Die Aktoren und Sensoren werden meist über externe Ein-/Ausgabebaugruppen und ein Feldbussystem, vgl. ▶ Kap. 10.3.5, angebunden.

10.3.2.2 Funktionsweise

Die Arbeitsweise von SPS erfolgt zyklisch und beinhaltet das Einlesen der anliegenden Signalzustände, die Abarbeitung des Steuerungsprogramms und das Ausgeben von Steuerbefehlen an die Ausgangsklemmen. Das Steuerungsprogramm ist als Anweisungsfolge im Programmspeicher abgelegt und wird in jedem Zyklus einmal vollständig durchlaufen. Durch Sprunganweisungen können Vor- bzw. Rücksprünge innerhalb des Programms realisiert werden, ◘ Bild 10.14.



◘ **Bild 10.14** Darstellung der zyklischen Programmbearbeitung bei einer SPS

PAE: Prozessabbild Eingang, PAA: Prozessabbild Ausgang

Neben der normalen zyklischen Programmbearbeitung bieten moderne, größere SPS zusätzlich die Möglichkeit der ereignis- bzw. interruptgesteuerten sowie der zeitgesteuerten Bearbeitung. Bei der *ereignisgesteuerten* Bearbeitung kann durch ein vom Prozess kommendes Signal, z. B. Betätigung des Not-Aus-Tasters, die zyklische Programmbearbeitung unterbrochen werden, um ein spezielles Programm, z. B. die Not-Aus-Routine zum sicheren Ausschalten der Maschine, zu bearbeiten. Wurde das Hauptprogramm nicht generell unterbrochen – wie im Fall des Not-Aus –, setzt der Prozessor nach der Bearbeitung dieses Programms an der Unterbrechungsstelle im zyklischen Programm die Bearbeitung fort. Bei der *zeitgesteuerten* Bearbeitung kann die zyklische Programmbearbeitung durch ein internes Zeitsignal (Weckalarm) unterbrochen werden, um ein spezielles Programm zu bearbeiten. Anschließend wird, wie bei der ereignisgesteuerten Bearbeitung, das zyklische Programm an der Unterbrechungsstelle fortgesetzt. Bild 10.15 ist ein Programmzyklus mit den oben genannten Bearbeitungsarten beispielhaft dargestellt.

Während bei Prozessrechnern häufig direkt auf die Signale der Ein- und Ausgangsbaugruppen zugegriffen wird, arbeiten SPS üblicherweise mit dem sogenannten Prozessabbild (es gibt jedoch auch SPS, bei denen direkt auf die Ein- und Ausgabebaugruppen zugegriffen werden kann). Beim Betrieb mit Prozessabbild werden zu Beginn eines Zyklus die Signalzustände aller Eingänge abgefragt und in den Eingangs-Abbildungsspeicher übernommen. Dieses Zustandsabbild bleibt für einen ganzen Zyklus konstant, sodass Zustandsänderungen an den Eingängen, die innerhalb eines Abarbeitungszyklus auftreten, von der Steuerung ignoriert werden. Im Abarbeitungszyklus werden die gespeicherten Werte entsprechend dem Anwenderprogramm miteinander verknüpft, im Ausgangsabbildungsspeicher zwischengespeichert und dann gesammelt an die Ausgangsklemmen weitergegeben. Der Betrieb mit dem Prozessabbild bewirkt also ein paralleles Einlesen der Eingangszustände und nach der Programmabarbeitung ein gleichzeitiges Ansteuern der Ausgänge. Da sich ein solcher Zyklus je nach Programmlänge und Gerät im Abstand von einigen Millisekunden wiederholt (sogenannte „Zykluszeit"), wird ein Quasi-Echzeitverhalten realisiert, das eine hinreichend schnelle Reaktion auf alle Prozessänderungen gewährleistet. Um für unterschiedliche SPS einen Vergleichswert für die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erhalten, wird sie auf die Bearbeitung von 1 K (= 1024) Anweisungen bezogen. Übliche Werte hierfür liegen bei 0,1 bis 5 Millisekunden.

Die für die Programmierung des Steuerungsablaufs notwendigen Anweisungen sind vorwiegend Teil der Boole'schen Logik (z. B. UND-/ODER-Verknüpfungen). Darüber hinaus können beispielsweise auch Zeitbedingungen programmiert werden, vgl. ▶ Kap. 10.3.3.4, die der Funktion von Zeitrelais bei elektromechanischen Steuerungen entsprechen. Weitere spezielle Anweisungen dienen der Programmierung von Zählern sowie von unbedingten und bedingten Sprüngen innerhalb des Programms. Unbedingte Sprünge werden immer aus-

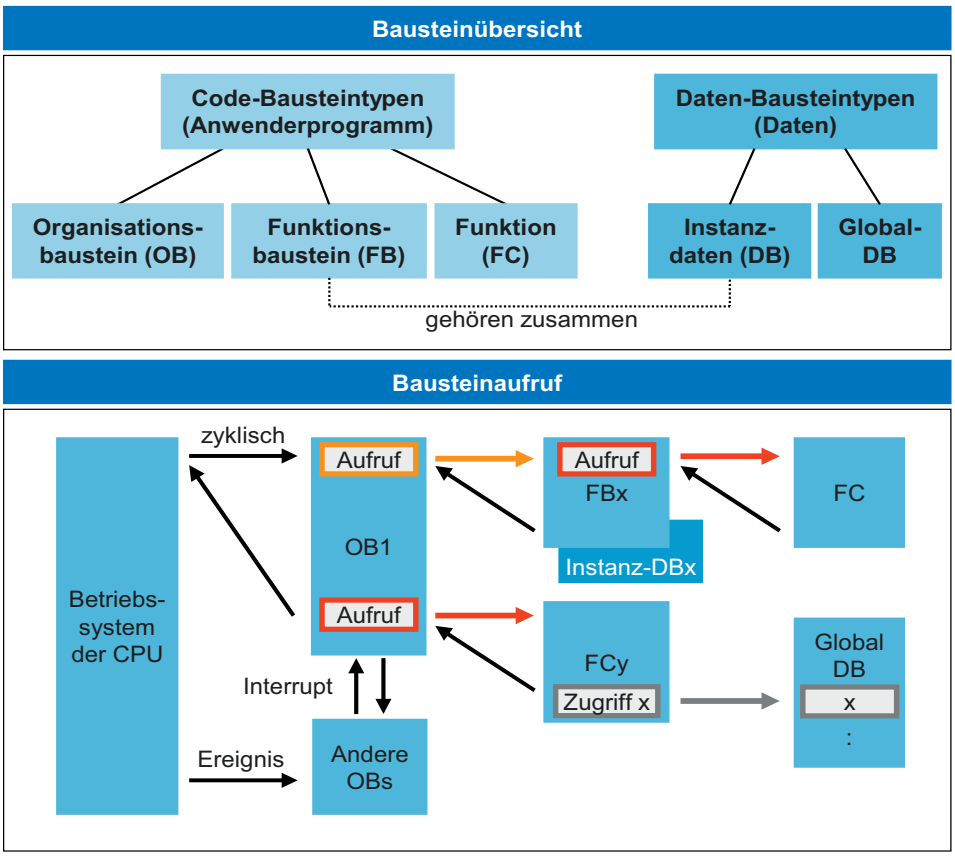


Bild 10.15 SPS-Konfiguration. Nach IEC 61131-3

geführt, bedingte nur dann, wenn die vorhergehende logische Bedingung erfüllt ist (Verzweigung). Für die Analogwertverarbeitung stehen zudem zahlreiche arithmetische Anweisungen zur Verfügung. Somit lassen sich, bei Verwendung der entsprechenden Hardware (Baugruppen zur Analogein-/-ausgabe, Weg- und Geschwindigkeitsmessung, Schrittmotorsteuerung), auch komplexe Steuerungsaufgaben erfüllen, Verfahrachsen positionieren und Regelkreise aufbauen.

Bei komplexen Steuerungsprogrammen ist das SPS-Programm nicht mehr in einem einzigen Block enthalten, sondern zur besseren Strukturierung in mehrere, in sich abgeschlossene Programmteile – sogenannte Bausteine – unterteilt. Ein Baustein ist dabei ein durch Funktion, Struktur oder Verwendungszweck abgegrenzter Teil des Programms. Vorteile der Bausteintechnik sind z. B. eine einfachere und übersichtlichere Programmierung komplexer Programmabläufe, Möglichkeiten zur Standardisierung und Wiederverwendung häufig benötigter Programmmodule (Unterprogrammtechnik) sowie die Vereinfachung von Test und Inbetriebnahme der Programme, vgl. auch ▶ Kap. 10.3.4. Die internationale Norm IEC 61131-3 reduziert die diversen Bausteintypen einzelner SPS-Hersteller auf drei vereinheitlichte Grundtypen (Programm, Funktion und Funktionsblock) [DIN14c]. Wie in ◘ Bild 10.15 dargestellt, werden diese mit Aufrufeigenschaften (zyklisch, zeit- oder ereignisgesteuert sowie Aufrufpriorität) zu Laufzeitprogrammen verknüpft und einer Recheneinheit (Ressource) der Hardwarekonfiguration zugeordnet [JOHN09].

10.3.3 SPS-Programmierung

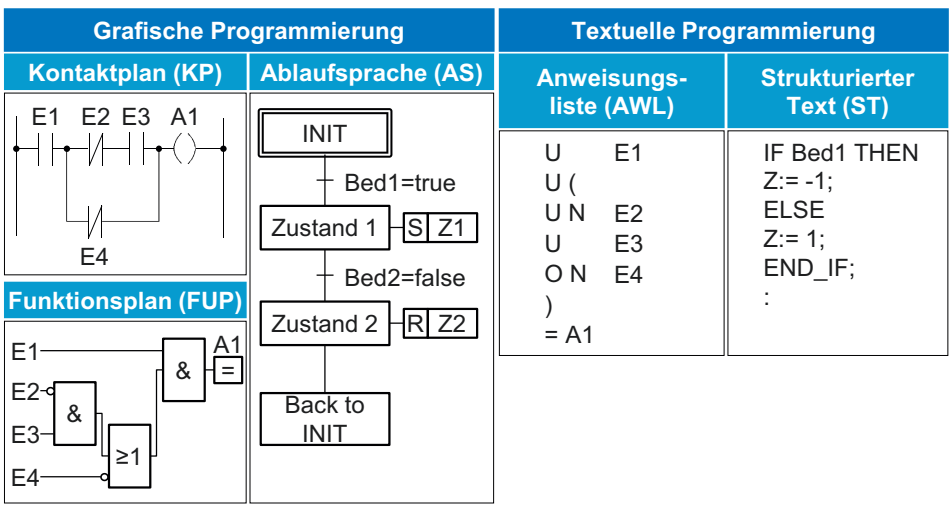
Zur Programmierung von SPS haben sich mehrere Grundprogrammiersprachen etabliert, die sich nach der Art der Darstellung in mnemotechnische und grafische Programmierverfahren untergliedern lassen, ◘ Bild 10.16.

Während die Programmierung mittels *Anweisungsliste (AWL)* und *Strukturiertem Text (ST)* in den Bereich der mnemotechnischen Programmierung fallen, lassen sich der *Kontaktplan (KOP)* und der *Funktionsplan (FUP)* den grafischen Programmierverfahren zuordnen, vgl. ▶ Kap. 10.3.3.1 bis ▶ Kap. 10.3.3.3. Auf den Strukturierten Text, der sich stark an der Hochsprachenprogrammierung anlehnt und typische Hochsprachenelemente wie z. B. WHILE-Schleifen und IF- und ELSE-IF Anweisungen umfasst, wird gesondert im ▶ Kap. 10.3.3.5 eingegangen. Darüber hinaus existiert in der Norm noch eine weitere Methode, die sich insbesondere zur Programmstrukturierung komplexer Ablaufsteuerungen eignet. Die dazu verwendete *Ablaufsprache (AS)* wird in ▶ Kap. 10.3.3.6 beschrieben.

Für alle Programmierverfahren ist zur Programmerstellung neben der eigentlichen SPS ein separates Programmiergerät erforderlich. Das Angebot der Programmiergeräte reicht von speziellen, zur SPS zugehörigen Programmiergeräten bis hin zu umfangreichen Programmiersystemen für normale PC. Letztere haben den Vorteil, dass keine herstellerspezifische Programmiergerätehardware erforderlich ist.

Neben der Offline-Programmierung am Programmiergerät besteht die Möglichkeit einer Online-Kopplung durch direkten Datenaustausch mit der SPS. In dieser Betriebsart ist der Systemzustand der SPS unmittelbar am Programmiergerät darstellbar, sodass z. B. das schrittweise Testen von Programmen möglich ist und die Reaktion des Steuerungsprogramms auf externe Prozess-Signale unmittelbar am Bildschirm beobachtet werden kann. Eine simulationsgestützte Rückführung externer Prozesssignale zur Evaluierung der korrekten steuerungstechnischen Funktionalität wird auch als Hardware-in-the-Loop (HiL) bezeichnet, vgl. ▶ Kap. 10.3.4.3.

Die anwendungsgetriebene Entwicklung im SPS-Bereich hat sowohl bei den Programmiersprachen als auch bei den Programmiergeräten zu immer größeren herstellerspezifischen Unterschieden geführt. Für SPS-Anwender entstand hieraus das Problem, dass bei einer Umstellung auf ein anderes Steuerungssystem eine zeitaufwendige Anpassung der



◘ **Bild 10.16** Konventionelle Programmiersprachen für die SPS-Programmierung nach Programmiernorm IEC 61131, Teil 3

Anwenderprogramme und zusätzlicher finanzieller Aufwand zur Anschaffung neuer Programmiergeräte notwendig wurde.

Angesichts dieser Situation wurden Anstrengungen unternommen, eine verstärkte internationale Standardisierung zu etablieren. Ergebnis dieser Bestrebungen ist die internationale SPS-Programmiernorm IEC 61131, Teil 3 [DIN14c]. Bestandteil der Norm sind die in ◘ Bild 10.16 gezeigten Programmiersprachen sowie die Ablaufsprache in grafischer und textueller Form. Die deutsche Version der IEC 61131-3 (früher IEC 1131-3) ist als Europa-Norm DIN EN 61131-3 erschienen. Sie löste die frühere Norm DIN 19239 ab. Damit verloren auch andere für die SPS-Programmierung gültige Normen wie die VDI-Richtlinie 2880, DIN 40700 sowie DIN 40719 ihre Gültigkeit.

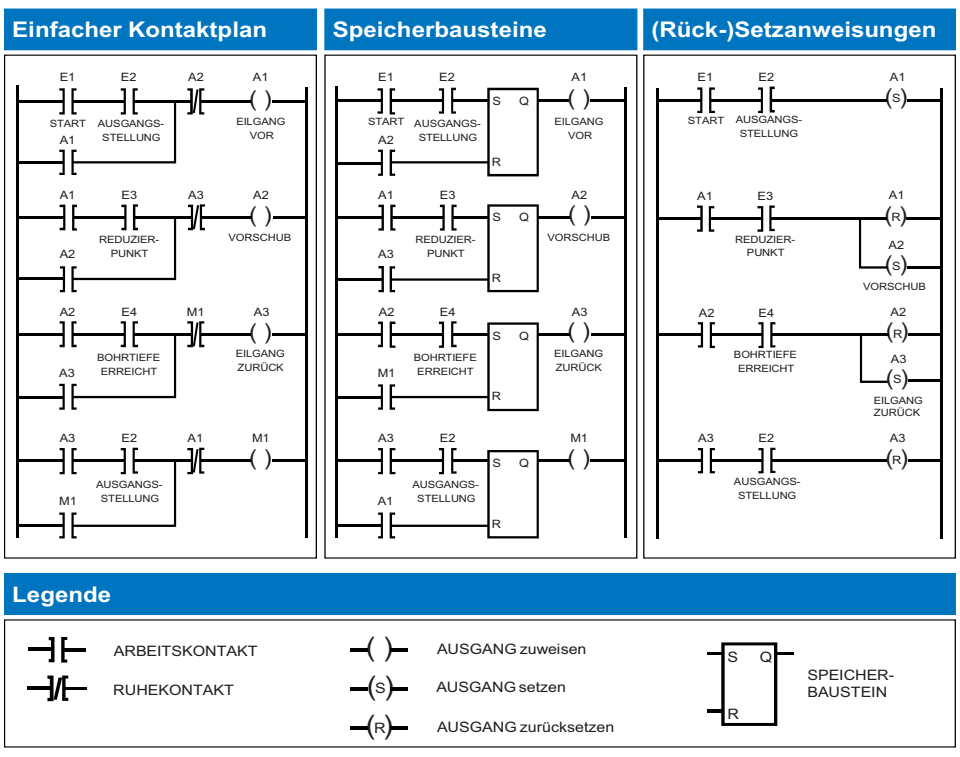
Auf Basis der IEC 61131-3 haben sich verschiedene Hersteller und Anwender von Steuerungs- und Programmiersystemen zu der internationalen Organisation PLCopen zusammengeschlossen, die die Anwendung und Verbreitung der Programmierung nach IEC 61131-3 forcieren. PLCopen verfolgt das Ziel, die Portierbarkeit von Anwenderprogrammen auf Geräte verschiedener Hersteller zu vereinfachen. Zur Zertifizierung der Programmiersysteme wurden von PLCopen vier unterschiedliche Normerfüllungsgrade definiert. Heute auf dem Markt verfügbare Programmiersysteme – z. B. Step 7 [SIEM10], TwinCat 3 [BECK14], WinSPS [WEIß16] oder herstellerübergreifende Systeme wie Codesys [WELL14] und Accon ProSys 1131 [TRÖS11] – sind größtenteils nur ersten Grades (Base Level) normkonform zur IEC 61131-3, d. h. die erstellten SPS-Programme sind nach wie vor nicht ohne Anpassungen auf SPS anderer Hersteller portierbar.

Der Grund hierfür liegt darin, dass die Norm zwar die Eigenschaften der Programmiersprachen genau definiert, jedoch nicht ausschließt, dass die Hersteller eigene, spezielle Sprachelemente integrieren. Dies ist jedoch erforderlich, da sich die SPS der verschiedenen Hersteller oftmals gerade durch spezielle Funktionalitäten auszeichnen. Auch wenn mit IEC-konformen Programmiersystemen erstellte Anwendungsprogramme nicht ohne weiteres zwischen SPS-Systemen verschiedener Hersteller ausgetauscht werden können, so entsprechen sich doch die grundlegenden Sprachelemente sowie die Programmstruktur, vgl. ▶ Kap. 10.3.2.2. Dadurch wird die Portierung von SPS-Programmen auf Fremdsysteme erleichtert [JOHN09].

Vor Einführung der Norm IEC 61131-3 hatte sich in Europa ein Quasistandard des Marktführers durchgesetzt [SIEM93]. Da trotz Einführung der Norm die Programmiersysteme, wie oben beschrieben, noch immer nur weitgehend herstellerspezifische Programmierung zulassen, der alte Quasistandard dagegen noch weit verbreitet ist, werden die nachfolgenden Programmbeispiele in Kontaktplan, Funktionsplan und Anweisungsliste noch gemäß der ursprünglichen Syntax dargestellt.

10.3.3.1 Kontaktplan-Programmierung

Die Kontaktplan- (KOP) oder auch Stromlaufplan-Programmierung ist bis heute in den USA die am weitesten verbreitete Programmiermethode und kommt den SPS-Anwen-



◘ **Bild 10.17** Kontaktplan (KOP) für das Bohrwerk nach ◘ **Bild 10.4**

dern entgegen, die bisher Steuerungen in Relaistechnik entwickelt haben.

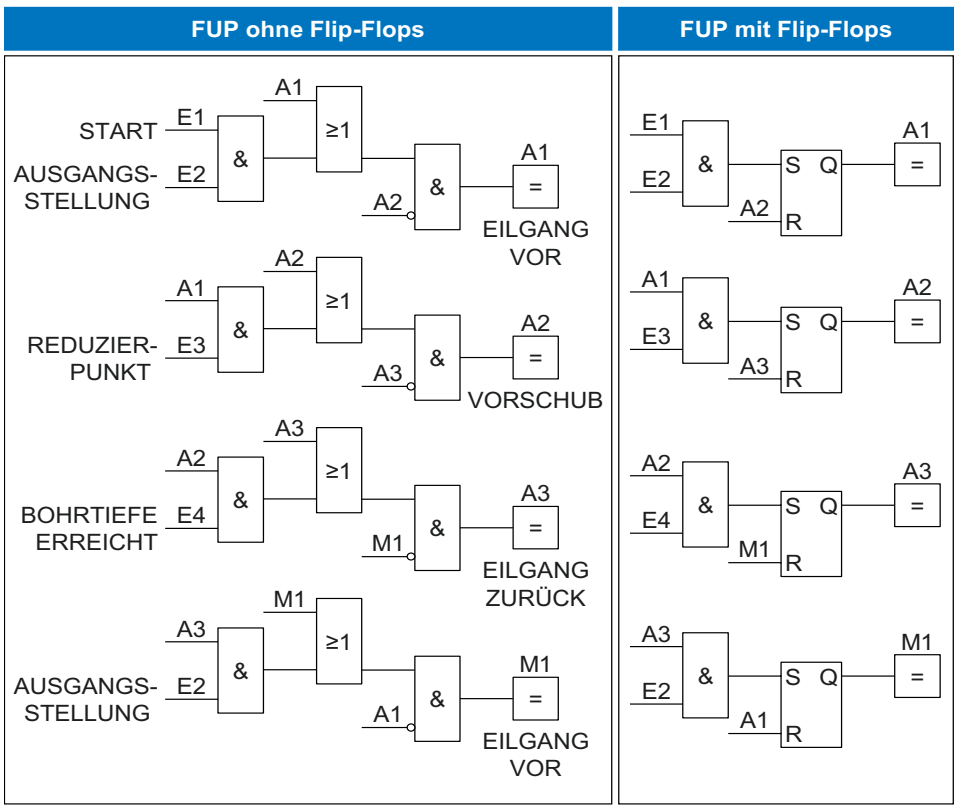
Ein bestehender Relaisstromlaufplan kann durch Einsetzen von Symbolen meist direkt in das entsprechende SPS-Programm umgesetzt werden. ◘ Bild 10.17 links, zeigt die Umsetzung der Bohrwerk-Ablaufsteuerung aus ◘ Bild 10.4. Eingänge (Starttaste, Nockenschalter) sind mit E, Ausgänge (Eilgang-Vor, -Zurück, Vorschub) mit A bezeichnet, gefolgt von einer Unterscheidungsziffer. Der Starttaster S1 und die Nockenschalter S2 bis S4 sind einzeln mit je einem der Eingänge E1 bis E4 der SPS verbunden. Die Reihenschaltung von S1 und S2 aus ◘ Bild 10.7 ist bereits Bestandteil des SPS-Kontaktplans. Für Relais, die keinen Ausgang betätigen, sondern nur eine logische Funktion erfüllen (Hilfsrelais), werden im Kontaktplan sogenannte Merker (M) verwendet. Da eine SPS nur über eine begrenzte Anzahl von Ausgängen verfügt, können Merker genutzt werden, Zwischenergebnisse zu speichern, die sich an einer anderen Stelle im Programm wieder abfragen lassen. Neben „Relais" mit Arbeits- und Ruhekontakten verfügt der Kontaktplan-Programmierer über Zeitglieder, Taktgeber, Zähler und weitere komplexe Funktionsbausteine, die die Erstellung von SPS-Programmen vereinfachen, vgl. ▶ Kap. 10.3.3.4.

Als Beispiel zeigt ◘ Bild 10.17, Mitte, den oben beschriebenen Kontaktplan unter Verwendung von Speicherbausteinen. Diese erfüllen die Funktion einer Selbsthalteschaltung. Über den Eingang S wird der Ausgang Q gesetzt und über R zurückgesetzt. Im Beispiel werden die Bausteinausgänge Q mit den SPS-Ausgängen A1 bis A3 bzw. dem Merker M1 verbunden. Es ist aber auch möglich, einen Bausteinausgang mit dem Eingang des nächsten Bausteins zu verbinden. Werden zusätzlich Gatterfunktionen (z. B. UND-/ODER-Verknüpfungen) sowie Inverter (liefert den gegenteiligen Wert des Eingangssignals) als Funktionsbausteine verwendet, erhält der Kontaktplan zunehmend Ähnlichkeit mit einem Funktionsplan, vgl. ▶ Kap. 10.3.3.2.

◘ Bild 10.17, rechts, veranschaulicht, wie Setz- (S) und Rücksetzanweisungen (R) diesen Kontaktplan noch vereinfachen und verkürzen können: Im Gegensatz zur einfachen Zuweisung, die das Ergebnis der logischen Verknüpfung fortwährend den Ausgängen (Q) bzw. Merkern zuweist, wird bei Verwendung von Speicherbausteinen (auch Speicherglieder oder Flip-Flops genannt) der Wert der Ausgänge bzw. Merker durch Setz- bzw. Rücksetzbedingungen dauerhaft gesetzt und bleibt auch erhalten, wenn sie nicht mehr erfüllt sind. Eine Setz-/Rücksetzbedingungen ist erfüllt, sobald das am Eingang (S bzw. R) anliegende Ergebnis der logischen Verknüpfung wahr wird. Liegt an beiden Eingängen des Speicherbausteins zugleich der Wahrheitswert an, so entscheidet der Typ des Speicherglieds, ob dessen Ausgang vorzugsweise gesetzt (setzdominant) oder zurückgesetzt wird (rücksetzdominant).

10.3.3.2 Funktionsplan-Programmierung

Ein als Funktionsplan (FUP) geschriebenes SPS-Programm entspricht einem Schaltplan aus Logikbausteinen (UND, ODER, INVERTER). ◘ Bild 10.18 zeigt als Beispiel den



◘ **Bild 10.18** Funktionsplan (FUP) für das Bohrwerk nach ◘ **Bild 10.4**

Funktionsplan des Bohrwerks au ◘ Bild 10.4. Durch den Einsatz von Flip-Flops, die in ihrem Aufbau den Speicherbausteinen des Kontaktplans gleichen, lässt sich der Funktionsplan übersichtlicher gestalten. Auch im Funktionsplan stehen dem Anwender weitere Funktionsbausteine zur Verfügung, wie z. B. Verzögerungselemente, Taktgeber, Zähler, Vergleicher, vgl. ► Kap. 10.3.3.4.

10.3.3.3 Programmierung mit Anweisungsliste

Die Anweisungsliste (AWL) lässt sich – wie auch der Funktionsplan – direkt aus den Boole'schen Gleichungen der Steuerungsaufgabe erstellen. Mit den mnemotechnischen Anweisungen können die Gleichungen direkt in eine Anweisungsliste umgesetzt werden. Dabei gilt – wie in der Boole'schen Algebra – die Regel „UND vor ODER", die sich aber durch Klammern umgehen lässt ◘ Bild 10.19 zeigt die Anweisungsliste für das Bohrwerk mit angefügten Kommentaren. Die Nummerierung der Ein- und Ausgänge entspricht den vorhergehenden Beispielen.

Wie auch beim Kontaktplan lässt sich die Anweisungsliste durch Verwendung von Setz- und Rücksetzanweisungen noch vereinfachen und verkürzen. Die Möglichkeit, ein Programm durch Verwendung von Sprunganweisungen zu strukturieren ist in ◘ Bild 10.20 dargestellt. Sie veranlassen die SPS, abhängig von logischen Bedingungen, Programmabschnitte zu überspringen und verkürzen so die Zykluszeit. Dies ist hier am Beispiel eines sogenannten Schrittverteilers dargestellt. Die Verwendung eines Schrittverteilers verkürzt die Zykluszeit des Programms, da nicht mehr das gesamte SPS-Programm durchlaufen wird, sondern immer nur die Anweisungen eines Schrittes bearbeitet werden.

10.3.3.4 Beispiele für komplexere Programmanweisungen

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die grundlegenden Programmierverfahren Kontaktplan, Funktionsplan und Anweisungsliste anhand des einfachen Beispiels des Bohrwerkes ◘ Bild 10.4 erläutert worden sind, werden nachfolgend einige komplexere Programmanweisungen vorgestellt.

10

Programmcode	Anweisungen
(	UND-Verknüpfungen
U E1 START	U Ex Eingang x
U E2 AUSGANGSSTELLUNG	U Ax Ausgang x
O A1 SELBSTHALTUNG	U Mx Merker x
)	
UN A2 RÜCKS. DURCH VORSCHUB	ODER-Verknüpfungen
= A1 EILGANG VOR	O Ex, O Ax, O Mx
(	Invertierungen
U A1 EILGANG VOR	UN Ex, UN Ax, UN Mx UND-NICHT
U E3 REDUZIERPUNKT	ON Ex, ON Ax, ON Mx ODER-NICHT
O A2 SELBSTHALTUNG	
)	= Ax Ausgang x zuweisen
UN A3 RÜCKS. D. EILGANG RÜCKW.	= Mx Merker x zuweisen
= A2 VORSCHUB	
	S Ax SETZE Ausgang x
(	S Mx SETZE Merker x
U A2 VORSCHUB	
U E4 BOHRTIEFE ERREICHT	R Ax RÜCKSETZE Ausgang x
O A3 SELBSTHALTUNG	R Mx RÜCKSETZE Merker x
)	
UN M1 RÜCKS. D. FERTIG	SP x SPRINGE nach Zeile x
= A3 EILGANG RÜCKW.	SPB x SPRINGE BEDINGT (d.h. abhängig von der vorangegangenen Verknüpfung) nach Zeile x
(	
U A3 EILGANG RÜCKW.	S Zx SETZE ZÄHLER x
U E2 AUSGANGSSTELLUNG	R Zx RÜCKSETZE ZÄHLER x
O M1 SELBSTHALTUNG	ZV Zx ZÄHLE VORWÄRTS ZÄHLER x
)	ZR Zx ZÄHLE RÜCKWÄRTS ZÄHLER x
UN A1 RÜCKS. D. START	
= M1 FERTIG	SET x SETZE EINSCHALTVERZÖGERUNG mit TIMER x

◘ **Bild 10.19** Anweisungsliste für das Bohrwerk nach ◘ **Bild 10.4**

Bild 10.20 Anweisungsliste mit Setz- und Rücksetzbedingungen (a) und Sprunganweisungen (b)

Rücksetzbedingung (a)

```
U   E1    START ?
U   E2    AUSGANGSSTELLUNG ?
S   A1    EILGANG VOR EIN

U   A1    EILGANG VOR ?
U   E3    REDUZIERPUNKT ?
R   A1    EILGANG VOR AUS
S   A2    VORSCHUB EIN

U   A2    VORSCHUB ?
U   E4    BOHRTIEFE ERREICHT ?
R   A2    VORSCHUB AUS
S   A3    EILGANG RUECKW. EIN

U   A3    EILGANG RÜCKW. ?
U   E2    AUSGANGSSTELLUNG
R   A3    EILGANG RUECKW. AUS
```

Sprunganweisung (b)

```
 SCHRITTVERTEILER:
 1   U     M1   SCHRITT 1 AKTIV ?
 2   SPB   12   SPRUNG NACH SCHRITT 2
 3   U     M2   SCHRITT 2 AKTIV ?
 4   SPB   18   SPRUNG NACH SCHRITT 3
 5   U     M3   SCHRITT 3 AKTIV ?
 6   SPB   24   SPRUNG NACH SCHRITT 4

                SCHRITT 1:
 7   U     E1   START ?
 8   U     E2   AUSGANGSSTELLUNG ?
 9   S     A1   EILGANG VOR EIN
10   S     M1   SCHRITTMERKER 1 SETZEN
11   SP    28   ZUM PROGRAMMENDE

                SCHRITT 2:
12   U     E3   REDUZIERPUNKT ?
13   R     A1   EILGANG VOR AUS
14   S     A2   VORSCHUB EIN
15   R     M1   SCHRITTM. 1 LOESCHEN
16   S     M2   SETZE SCHRITTMERKER 2
17   SP    28   ZUM PROGRAMMENDE

                SCHRITT 3:
18   U     E4   BOHRTIEFE ERREICHT ?
19   R     A2   VORSCHUB AUS
20   S     A3   EILGANG RUECKW. EIN
21   R     M2   SCHRITTM. 2 LOESCHEN
22   S     M3   SETZE SCHRITTMERKER 3
23   SP    28   ZUM PROGRAMMENDE

                SCHRITT 4:
24   U     E2   AUSGANGSSTELLUNG ?
25   R     A3   EILGANG RUECKW. AUS
26   R     M3   SCHRITTM. 3 LOESCHEN
27   SP    28   ZUM PROGRAMMENDE

28   PE         PROGRAMMENDE
```

Zeitfunktionen

Eine bei SPS-Programmen sehr häufig benötigte Funktion sind Zeitglieder bzw. Timer. Durch sie lassen sich z. B. Einschalt- und Ausschaltverzögerungen beliebiger Dauer, Warte- und Überwachungszeiten sowie Impulsglieder oder Taktgeber realisieren.

Bild 10.21 zeigt exemplarisch den Einsatz eines Zeitgliedes zur Realisierung einer Einschaltverzögerung. Neben dem Stromlaufplan und dem Zeitdiagramm zur Erläuterung der Funktionsweise ist dort zum Vergleich die Programmierung in Funktionsplan, Kontaktplan und Anweisungsliste gezeigt. In den grafischen Programmiersprachen FUP und KOP wird die Zeitfunktion durch ein rechteckiges Symbol dargestellt, wobei auf der linken Seite die Eingänge und auf der rechten Seite die Ausgänge liegen.

Mit dem Eingang E 5.3 wird das Zeitglied gestartet und mit dem Eingang E 5.2 zurückgesetzt. Die Verzögerungszeit wird über den Eingang mit der Kennung „TW“ als Konstante geladen. Die Zeitdauer setzt sich zusammen aus einem Faktor und der Zeitbasis (Faktor · Zeitbasis). Für die Zeitbasis stehen die Werte .0 = 10 ms, .1 = 100 ms, .2 = 1 s, .3 = 10 s zur Verfügung, sodass die Konstante KT 500.0 (500 · 10 ms) die Zeit 5 s ergibt. Die Ausgänge „DU“ und „DE“ zeigen die aktuelle Zeitdauer an (DU in dualer Codierung, DE in BCD-Codierung). Der Ausgang A 5.2 ist der eigentliche „Setzausgang“, der gemäß dem programmierten Zeitverlauf gesetzt bzw. zurückgesetzt wird.

Als Funktionsweise des Zeitgliedes ergibt sich somit, dass der Ausgang 5.2 mit einer Verzögerung von 5 s nach dem Eingang 5.3 gesetzt wird. Der Eingang bleibt jedoch nur so lange gesetzt, wie der Eingang 5.3 das Signal „1“ führt. Das Ausgangssignal (A 5.2) verbleibt im Zustand „0“, wenn das Startsignal (E 5.3) innerhalb der programmierten Zeitdauer zurückgesetzt wird, vgl. Zeitdiagramm, Bild 10.21. Unab-

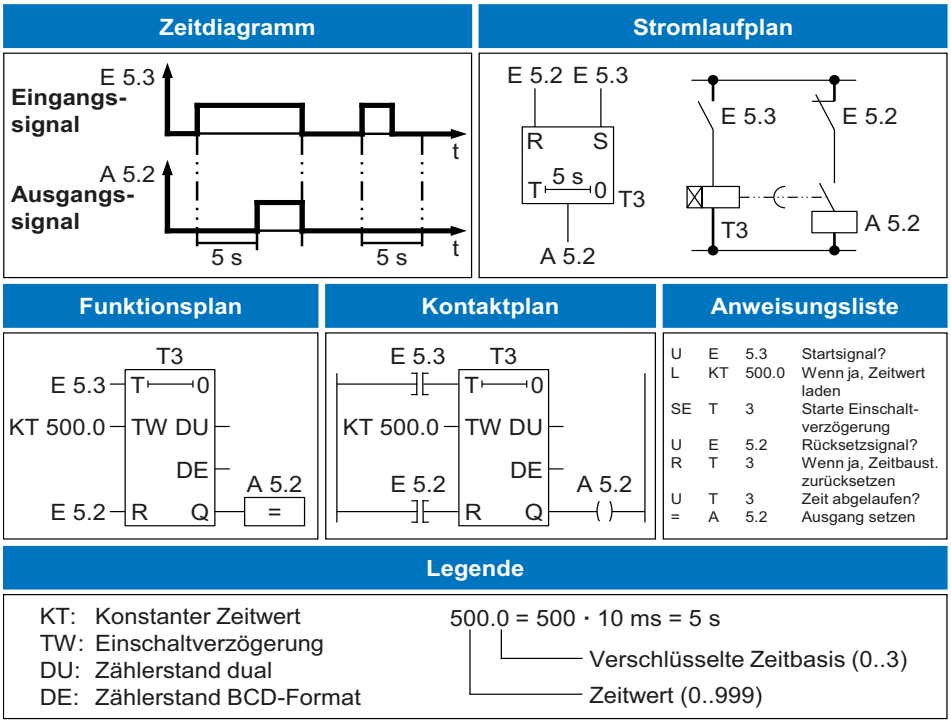


Bild 10.21 Beispiel zur Realisierung einer Einschaltverzögerung

10

hängig vom Zustand des Zeitgliedes bewirkt das Rücksetzsignal (E 5.2) ein Rücksetzen des Ausgangssignals.

Zähler

Zähler werden bei SPS beispielsweise zum Erfassen von Mengen eingesetzt (z. B. Stückzahlen, Flüssigkeitsmengen, Gewichten usw.) oder durch Hintereinanderschaltung mehrerer Zähler auch zur Bildung sehr langer Verzögerungszeiten. Die eigentliche Zählaufgabe wird dabei direkt von der CPU der SPS ausgeführt. SPS enthalten mehrere Zähler, die unabhängig voneinander eingesetzt werden können und sowohl vorwärts als auch rückwärts zählen können. Mit einem Vorwärtszähler kann z. B. an einem Montageband die Anzahl der Werkstücke gezählt und angezeigt werden,

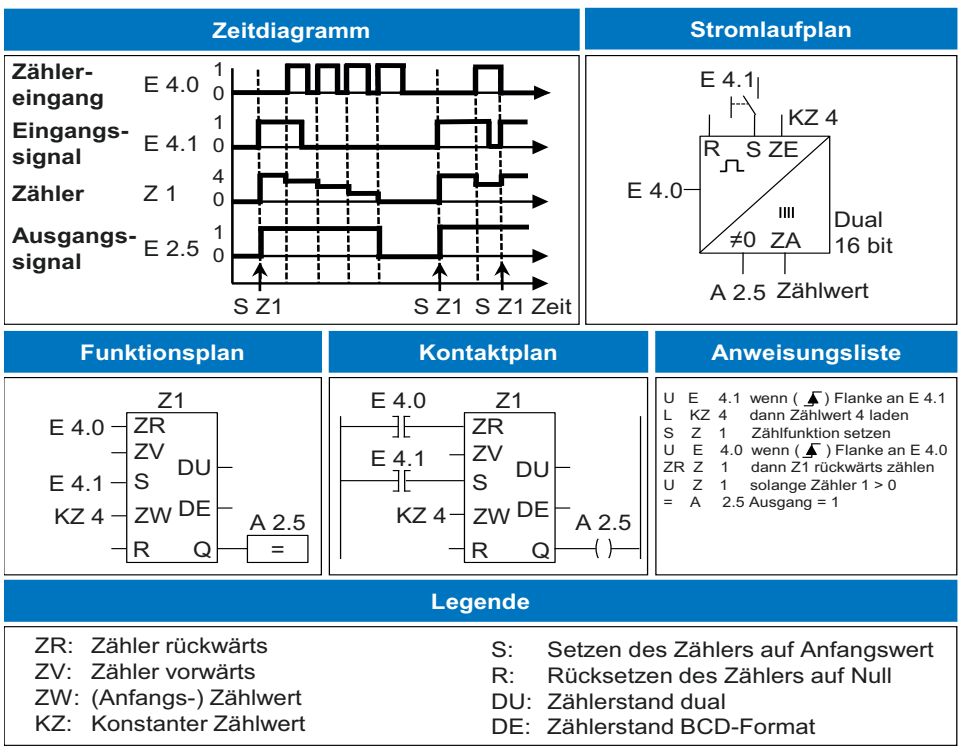


Bild 10.22 Beispiel zur Realisierung eines Rückwärtszählers

während Rückwärtszähler von einem programmierten Ausgangszustand nach Null hin zählen und beim Erreichen des Zählerstandes Null ein Signal abgeben (z. B. „Palette voll bestückt“). Die Funktionsweise und Programmierung eines Rückwärtszählers wird ◘ Bild 10.22 erläutert. Wie auch beim Zeitglied stehen Zählerbausteine in der Kontaktplan- und Funktionsplandarstellung als eigenes Symbol zur Verfügung. Jeder Zählerbaustein besitzt Anschlüsse für das Vorwärts- (*ZV*) und Rückwärtszählen (*ZR*), das Setzen (*S*) und Rücksetzen (*R*), das Laden eines Zählwertes (*ZW*) sowie das Abfragen des Zählerstandes (*DU* – dualer Zählerstand, *DE* – Zählerstand im BCD-Format). Im Beispiel im ◘ Bild 10.22 wird der Zähler 1 (*Z*1) beim Einschalten des Eingangs 4.1 (Setzen) auf den Zählwert 4 gesetzt („KZ“ = konstanter Zählwert). Der Ausgang 2.5 führt jetzt das Signal „1“. Bei jedem Einschalten des Eingangs 4.0 (Rückwärtszählen) verringert sich der Zählwert um 1. Der Ausgang 2.5 wird auf „0“ gesetzt, wenn der Zählerstand „0“ ist. Durch erneutes Setzen des Eingangs 4.1 – auch bevor der Zähler den Stand Null erreicht hat – wird wieder der Zählwert 4 geladen, vgl. Zeitdiagramm, ◘ Bild 10.22.

Wortverarbeitung

Heutige SPS können nicht nur einfache binäre Operationen, wie z. B. logische Verknüpfungen, durchführen, sondern ermöglichen auch umfangreiche Byte (8 Bit)-, Wort (16 Bit)- und Doppelwortoperationen (32 Bit). Damit lässt sich mit SPS auch rechnen, vergleichen, steuern und regeln. Ebenso wird dadurch die Verarbeitung analoger Signale möglich, wozu allerdings noch eine Analog/Digital (A/D)- bzw. Digital/Analog (D/A)-Wandlung nötig ist, da die SPS nur Zahlen verarbeiten kann.

Wichtige Funktionen bei der Byte- bzw. Wortverarbeitung sind Lade- und Transferfunktionen, die einen Informationsaustausch auf digitaler Basis zwischen Peripheriebaugruppen und der SPS sowie zwischen unterschiedlichen Datenbereichen innerhalb der SPS ermöglichen. Dieser Informationsaustausch geht nicht „direkt“ vor sich, sondern ist immer mit einem „Umweg“ über spezielle Zwischenregister des Prozessors – den sogenannten Akkumulatoren – verbunden. Dabei wird der Informationsfluss von einem Speicher in den Akkumulator *Laden L* und vom Akkumulator zum Speicher *Transferieren T* genannt. Mögliche Operanden beim Laden und Transferieren sind z. B. Ein-/Ausgangsbytes (EB/AB), -worte (EW/AW) und -doppelworte (ED/AD), Zeit- (T) und Zählwerte (Z), vgl. ▶ Kap. 10.3.3.4.1 und ▶ Kap. 10.3.3.4.2, sowie verschiedene Konstanten, z. B. Byte- (KB), Festpunkt- (KF) und Hexadezimalkonstanten (KH).

Sind die Operanden mit Hilfe der Ladefunktionen in die Akkumulatoren des Prozessors der SPS geladen, können umfangreiche Vergleichs- und Rechenfunktionen ausgeführt werden. Eine Übersicht über die elementaren Vergleichs- und Rechenfunktionen sowie deren Anwendung in einem kurzen Programmbeispiel sind im ◘ Bild 10.23 dargestellt.

Neben den hier dargestellten erweiterten Programmanweisungen bieten die am Markt verfügbaren Entwicklungsumgebungen vielfältige weitere Möglichkeiten zur Erstellung sehr umfangreicher und komplexer Programme. Da eine umfassendere Darstellung der Programmiermöglichkeiten jedoch den Rahmen dieses Buches sprengen würde, sei an

◘ Bild 10.23 Befehlsübersicht und Programmbeispiel zur Wortverarbeitung (Vergleichs- und Rechenfunktionen)

Vergleichsfunktionen

Befehlsübersicht		Programmbeispiel	
!=	gleich	L EW 10	Laden des Wertes von Eingangswort EW 10 (16-bit-Wert)
><	ungleich	L DW 22	Laden des Wertes von Datenwort DW 22 (32-bit-Wert)
>	größer	! = F	EW 10 gleich DW 22? (16-bit-Festpunkt-Vergleich)
>=	größer o. gleich	= M 170.0	wenn ja, Merker 170.0 = „1“ (1-bit-Wert)
<	kleiner	> F	EW 10 größer als DW 22?
F	16-bit-Festpunkt	= M 170.1	wenn ja, Merker 170.1 = „1“ (1-bit-Wert)
D	32-bit-Festpunkt		
G	32-bit-Gleitpunkt		
①			

Rechenfunktionen

+	Addition
-	Substraktion
X	Multiplikation
:	Division
F	16-bit-Festpunkt
G	32-bit-Gleitpunkt

① Möglichkeiten variieren je nach Prozessortyp

Aufgabenstellung: *Inhalt des Merkwortes 196*

<DW 30> = <DW 28> + 3 x <MW 196>

konstanter Faktor

Lösung:

L KB 3	Laden des Faktors 3 als Konstante (Byte)
L MW 196	Laden des Inhaltes des Merkwortes MW 196
XF	Multiplikation (16-bit-Festpunkt-Multiplikation)
L DW 28	Laden des Inhaltes des Datenwortes DW 28
+F	Addition von DW 28 zum Zwischenergebnis
T DW 30	Endergebnis zum Datenwort DW 30 transferieren

dieser Stelle zur Vertiefung der Thematik auf die einschlägige Literatur verwiesen z. B. [JOHN09; WELL14].

10.3.3.5 Strukturierter Text (Hochsprachen-Programmierung)

Wie bereits im ▶ Kap. 10.3.3 angedeutet, ist mit dem „Strukturierten Text“ (ST) in der SPS-Programmiernorm IEC 61131-3 eine Hochsprache definiert worden, bei deren Entwicklung neben PASCAL auch ADA, MODULA und „C“ Anleihen gegeben haben [MITT91]. Typische Sprachelemente des Strukturierten Textes sind z. B. WHILE- und REPEAT UNTIL-Schleifen sowie weitere Kontrollstrukturen, wie z. B. IF- und ELSEIF- sowie CASE-Anweisungen. Die einzelnen Anweisungen dürfen dabei gemäß den Syntax-Regeln beliebig geschachtelt werden.

Zur Erläuterung der Syntax und der Möglichkeiten dieser SPS-Hochsprache ist im ◘ Bild 10.24 ein Programmbeispiel zur Sortierung von Messwerten dargestellt. Ein Programm in Strukturiertem Text gliedert sich grundsätzlich in einen Deklarationsteil, in dem alle Variablen symbolisch definiert werden, und einen Anweisungsteil, der die eigentlichen Programmanweisungen enthält. Mit den Anweisungen FUNCTION_BLOCK und END_FUNCTION_BLOCK werden der Anfang und das Ende des ST-Programmbausteins definiert, der dann z. B. auch als eigenes Unterprogramm in ein „konventionelles“ AWL-Programm integriert werden kann. Im Deklarationsteil des Beispielprogramms werden zur Speicherung der Messwerte ein Feld mit zehn Komponenten vom Datentyp Integer sowie die benötigten Konstanten und lokalen Programmvariablen definiert. Im Anweisungsteil erfolgt dann in den beiden geschachtelten Schleifen (REPEAT UNTIL- und FOR-Schleife) die Sortierung des Messwertfeldes durch permanentes Vergleichen und Tauschen. Die Vertauschung wird erst abgebrochen, wenn die Boole'sche Variable TAUSCH logisch „1“ ist, d. h. keine Vertauschung mehr durchgeführt wurde und alle Werte sortiert sind.

Wie das Beispiel zeigt, lassen sich mit Hilfe des Strukturierten Texts selbst anspruchsvollere Aufgaben kompakt programmieren. Ein entsprechendes Programm in Anweisungsliste wäre erheblich länger und somit auch unübersichtlicher.

Ein anderer Ansatz zur SPS-Hochsprachenprogrammierung ist die Nutzung einer allgemein verbreiteten und im Bereich der Informatik genormten Hochsprache, wie z. B. „C“. Einige SPS-Hersteller haben hierzu bereits spezielle C-Code-Compiler entwickelt, mit denen sich aus dem vom Anwender geschriebenen Programmcode (z. B. ANSI-C) automatisch ein SPS-spezifischer Zielcode generieren lässt. Weiterhin ist es auch möglich, die Hochsprachenprogrammierung mit anderen bekannten SPS-Sprachen zu kombinieren. Beispielsweise kann ein Programm in KOP, FUP oder AWL erstellt

Deklarationsteil

```
FUNCTION_BLOCK

CONST
   WERTE     := 10;
   MAX       := WERTE - 1;
END_CONST;
VAR_IN_OUT
   WERTFELD :ARRAY[0..MAX] OF INT;
END_VAR;
VAR
   HILF      :WORD;
   TAUSCH    :BOOL;
   I         :INT;
END_VAR;
```

- Bausteinbeginn
- Deklaration der Konstanten
- Deklaration von Durchgangsparametern (eindimensionales Messwertfeld)
- Deklaration lokaler Programmvariablen

Anweisungsteil

```
BEGIN
REPEAT
  TAUSCH := TRUE;
  FOR I := MAX TO 1 BY -1 DO
   IF WERTFELD[|]<WERTFELD[I-1]THEN
    HILF          := WERTFELD [I];
    WERTFELD[I]   := WERTFELD [I-1];
    WERTFELD[I-1]:= HILF;
    TAUSCH        := FALSE;
   END_IF;
  END_FOR;
UNTIL TAUSCH;
END_REPEAT;
END_FUNCTION_BLOCK;
```

- Anfang des Anweisungsteils
- Anfang der Repeat-Schleife
- Paarweiser Vergleich der Messwerte und ggf. Vertauschen zum Sortieren
- Abbruchbedingung der Schleife
- Ende der Repeat-Schleife
- Bausteinende

Bild 10.24 Beispielprogramm zur Sortierung von Messwerten in Strukturiertem Text (ST)

werden und nur einzelne in C programmierte Programmmodule, z. B. komplizierte Regelalgorithmen, enthalten.

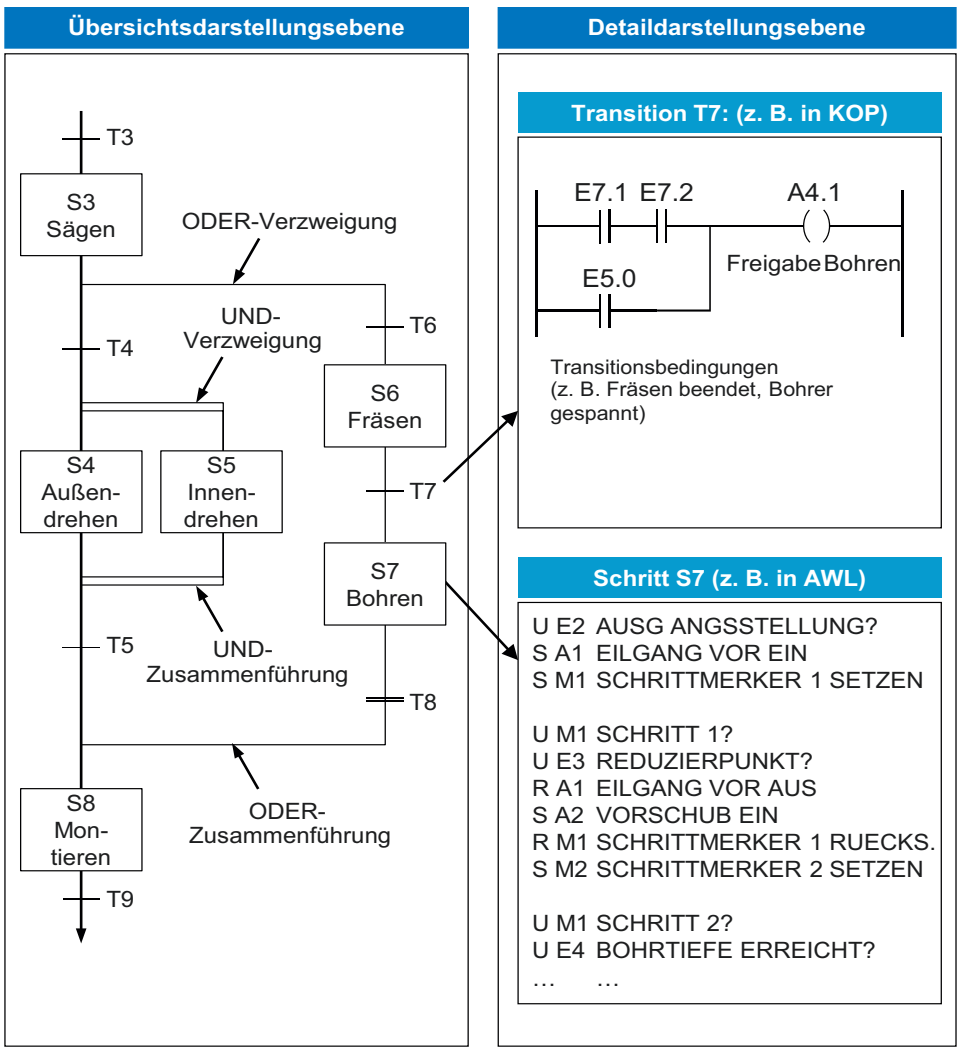
10.3.3.6 Ablaufsprache

Die Ablaufsprache (AS), in der Norm IEC 61131-3 auch als SFC (Sequential Function Chart, [BRUG99]) definiert, stellt im eigentlichen Sinne keine weitere neue Programmiersprache dar, sondern ist vielmehr eine komfortable Möglichkeit zur logischen Strukturierung und grafischen Programmierung von Ablaufsteuerungen, ◘ Bild 10.25, vgl. ► Kap. 10.1.2. Insbesondere bei komplizierten Steuerungsabläufen mit mehreren parallelen Abläufen und Verzweigungen bietet die Ablaufsprache Vorteile, da die Programmierung mit den bisher beschriebenen Programmiermethoden hier sehr aufwendig und unübersichtlich wird.

Grundelemente der Ablaufsprache sind Schritte (Steps) und Übergänge (Transitions). Jeder Schritt besteht aus einem Programmabschnitt, der ausgeführt wird, bis eine im Übergang spezifizierte Bedingung erfüllt ist. Ein Beispiel für eine einfache Ablaufsteuerung mit nur einer Ablaufkette – ohne Verzweigungen oder parallele Abläufe – ist das Bohrwerk in ◘ Bild 10.4. Das System entspricht genau der Ablaufkette mit Schritten (z. B. „Eilgang vorwärts ein“) und Übergängen („bis Reduzierpunkt erreicht ist“). Wird das Bohrwerk als Teil einer größeren Anlage aufgefasst, in der neben dem Bohrwerk u. A. noch eine Säge, eine Dreh- und eine Fräsmaschine stehen, so wäre ein Ablauf wie in ◘ Bild 10.25, der die Gesamtanlage beschreibt, denkbar.

Nach dem Sägen der Rohteile in Schritt 3 wird in Abhängigkeit vom Werkstück (Transition T4 und T6) entweder nur gedreht (S4 und S5) oder gefräst (S6) und anschließend gebohrt (S7) („ODER-Verzweigung“). Beim Drehen wird gleichzeitig die Außen- und Innenkontur gedreht („UND-Verzweigung“). Anschließend werden die Teile in Schritt 8 montiert.

Zur Programmierung dieses Beispiels mittels Ablaufsprache wird zunächst in der Übersichtsebene durch grafisch-interaktive Eingabe der Schritte und Übergänge der übergeordnete Programmablauf festgelegt. Anschließend wird in der Detaildarstellung die Logik für die einzelnen Schritte und Übergänge programmiert. Der Anwender kann dabei frei zwischen den verschiedenen zur Verfügung stehenden Programmierverfahren wählen. ◘ Bild 10.25 wurde bei-



◘ **Bild 10.25** Beispiel eines komplexen Ablaufplans mit Übersichts- und Detaildarstellung

spielsweise die Transition T7 in Kontaktplan-Darstellung (KOP) und der Schritt S7 – das bereits bekannte Beispiel des Bohrwerkes – in Anweisungsliste (AWL) erstellt. Das Programm für das Bohrwerk stellt eine eigene Schrittkette dar und hätte genauso wie in der Übersichtsdarstellung wieder als eigene Ablaufkette programmiert werden können.

Die Programmierung von Ablaufsteuerungen wird durch den Einsatz der Ablaufsprache deutlich vereinfacht, da die übergeordnete Programmlogik mit Erstellung der Übersichtsebene bereits festgelegt wird. Somit entfällt die explizite meist komplizierte Programmierung der Programmlogik, wodurch der Programmierer sich auf die Programmierung der Module für Schritte und Übergänge konzentrieren kann. Die Ablaufsprache unterstützt somit die Strukturierung der Steuerungsaufgabe sowie die systematische Top-Down-Vorgehensweise bei der Programmentwicklung.

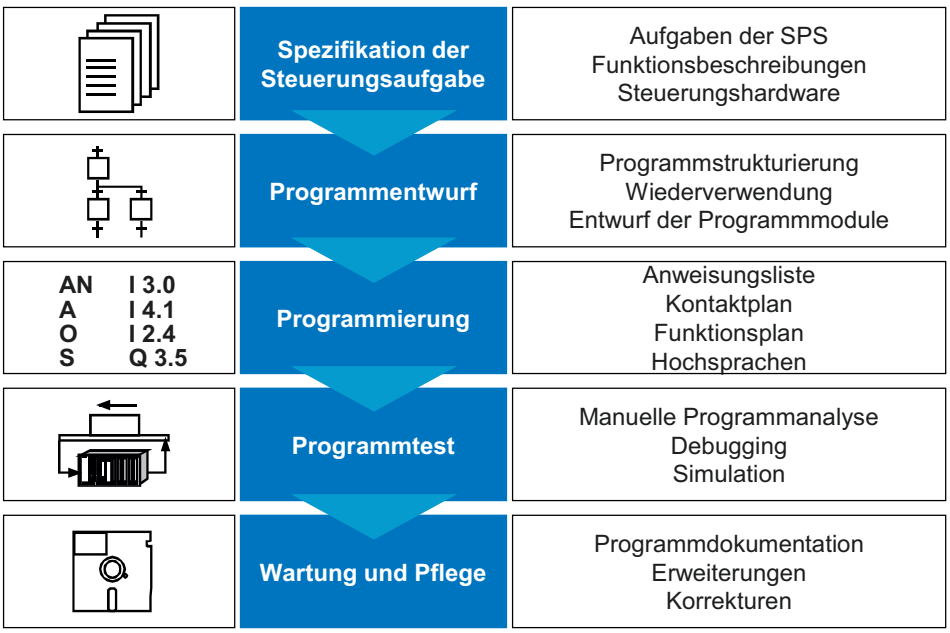
10.3.4 Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung von komplexen SPS-Programmen

Der gestiegene Aufgaben- und Leistungsumfang heutiger SPS hat dazu geführt, dass sowohl die Komplexität als auch der Umfang der SPS-Programme stark zugenommen haben. Nicht selten sind im Werkzeugmaschinenbau Steuerungen mit über 1000 Ein- und Ausgängen und umfangreichen Programmen mit hohem Speicherplatzbedarf anzutreffen. Entsprechend hoch ist daher der Anteil der Softwareentwicklung an den gesamten Entwicklungskosten für Werkzeugmaschinen. Angesichts der gesunkenen Hardwarepreise entsprechen heute die Kosten einer einfachen SPS ungefähr dem Tagessatz eines qualifizierten SPS-Programmierers. Damit wird deutlich, dass sich die SPS-Softwareentwicklung zu einem entscheidenden Kostenfaktor entwickelt hat. Die systematische Gestaltung der SPS-Softwareentwicklung – angefangen von der Spezifikation der Steuerungsaufgabe bis hin zum Programmtest – ist daher insbesondere für Werkzeugmaschinenhersteller mit hohem kundenspezifischem Programmieraufwand, z. B. im Sondermaschinenbau, von großer Bedeutung. Einen Überblick über die grundsätzliche Vorgehensweise und die einzelnen Phasen einer systematischen SPS-Softwareentwicklung gibt ◘ Bild 10.26.

10.3.4.1 Spezifikation der Steuerungsaufgabe

Kennzeichnend für die industrielle Entwicklung von SPS-Software ist der Umstand, dass die meisten Softwarefehler nicht erst bei der Programmerstellung, sondern bereits in frühen Entwicklungsphasen, also bei der Spezifikation der Steuerungsaufgabe, zustande kommen. Der überwiegende Teil der Fehlerbehebung findet jedoch erst in der Test- und Inbetriebnahmephase statt, vgl. Softwarefehler in ◘ Bild 10.27. Entsprechend groß ist der Kostenanteil der Testphase an den gesamten Entwicklungskosten, vgl. Softwarekosten in ◘ Bild 10.27.

Daher ist die wichtigste Voraussetzung für die Entwicklung komplexer SPS-Programme und die Vermeidung teurer Folgefehler die systematische Spezifikation der Steuerungsaufgabe, also die Sammlung und Dokumentation aller steuerungstechnisch relevanten Informationen der Maschine bzw. Anlage in einem Pflichtenheft. Das Pflichtenheft sollte jedoch nicht nur Grundlage für die SPS-Softwareentwicklung sein. Vielmehr sollte es während der gesamten Auftragsabwicklung vom Vertrieb über mechanische Konstruktion und Elektrokonstruktion bis hin zum Test und der Inbetriebnahme als zentrale, stets aktualisierte Arbeitsgrundlage für



◘ **Bild 10.26** Phasen der SPS-Softwareentwicklung

alle mitwirkenden Abteilungen dienen. Innerhalb einer Firma können, anstelle der Koordination durch ein oder mehrere Pflichtenhefte, Engineering Data Management (EDM) Systeme eingesetzt werden.

Obwohl die Vorzüge aussagekräftiger Pflichtenhefte unbestritten sind, werden sie im Werkzeugmaschinenbau in ausreichendem Umfang bislang nur selten erstellt. In der industriellen Praxis sind die wesentlichen Informationsquellen für die SPS-Softwareentwicklung die Entwurfsunterlagen aus der mechanischen Konstruktion, wie Prinzipskizzen, Funktionsbeschreibungen, z. B. in Form von Funktionsplänen oder Funktionsdiagrammen, sowie eine tabellarische Aufstellung aller eingesetzten Stellglieder (Motoren, Ventile usw.) und Sensoren (Endschalter, Geber, Lichtschranken usw.). Auf Basis dieser Informationen projektiert der Steuerungstechniker zunächst die SPS-Hardware (CPU, Peripheriebaugruppen, Energieversorgung, Bedienelemente, Schaltschrank, Sicherheitsschaltungen usw.), kann aber parallel dazu bereits mit der Softwareerstellung beginnen.

Eine enge Zusammenarbeit von mechanischer und elektrischer Konstruktion sowie die frühzeitige Abstimmung von Lösungskonzepten sind somit grundlegende Voraussetzungen zur Erstellung möglichst fehlerfreier SPS-Programme. Die industrielle Praxis zeigt jedoch, dass dies meist nur unzureichend geschieht und eine wesentliche Ursache für Missverständnisse und Softwarefehler darstellt.

10.3.4.2 Programmentwurf und Programmierung

Ist die Steuerungsaufgabe hinreichend bekannt und dokumentiert, kann mit der Softwareerstellung begonnen werden. Ein Hauptziel in der industriellen Praxis ist es dabei, Softwarestrukturen und Programmiermethoden innerhalb eines Unternehmens zu vereinheitlichen, um die Lesbarkeit und Transparenz der Programme zu verbessern sowie die Wiederverwendung bereits entwickelter Softwaremodule zu erhöhen.

Der erste Schritt für die Softwareabteilung besteht darin, die spezifizierte Steuerungsaufgabe zu analysieren und ggf. zu ergänzen. Auf der Basis dieser Informationen wird zunächst die prinzipielle Programmstruktur konzipiert und anschließend überprüft, inwieweit bereits entwickelte und ausgetestete Programmmodule aus früheren Projekten wiederverwendet werden können. Im nächsten Schritt werden dann die neu zu entwickelnden Programmmodule entworfen, wozu neben den Funktionsbeschreibungen von der mechanischen Konstruktion weitere Vorgaben, wie z. B. die Gestaltung des Bedienfeldes, ausgewertet werden müssen. Ein wichtiges Prinzip beim Programmentwurf ist die eindeutige Zuordnung der Programmmodule zu entsprechenden mechanischen Funktionseinheiten. Auf diese Weise können bei der Benutzung standardisierter Baugruppen die dazugehörigen Softwaremodule häufig ohne Modifikation wiederverwendet werden. Voraussetzung hierfür ist ein einheitlicher, auf definierten Schnittstellen basierender Aufbau der Module, sodass bei Kenntnis der Schnittstellen die interne Funktionsweise der Module unbekannt bleiben kann. Diese Vorgehensweise wird in der Softwaretechnik allgemein als „Information Hiding“ bezeichne

Bild 10.28 verdeutlicht am Beispiel eines Programmmoduls zur Steuerung eines Werkzeugwechslers, wie eine derartige Ausrichtung der SPS-Softwaremodule an den mechanischen Baugruppen realisiert werden kann. Die Schnittstellen zu einem übergeordneten Programmmodul reduzieren sich auf definierte Aufträge (z. B. „Revolver schwenken“), die mit entsprechenden Parametern (z. B. „auf Zielposition 7“) präzisiert werden. Die Rückmeldungen des Programmmoduls sind Ereignismeldungen (z. B. „Zielposition erreicht“ oder „Fehler aufgetreten“) und Zustandsmeldungen (z. B. genaue Fehlercodenummer oder aktuelle Position bzw. Drehrichtung).

Im Anschluss an den Entwurf der Programmmodule erfolgt die eigentliche Implementierung mit Hilfe eines Pro-

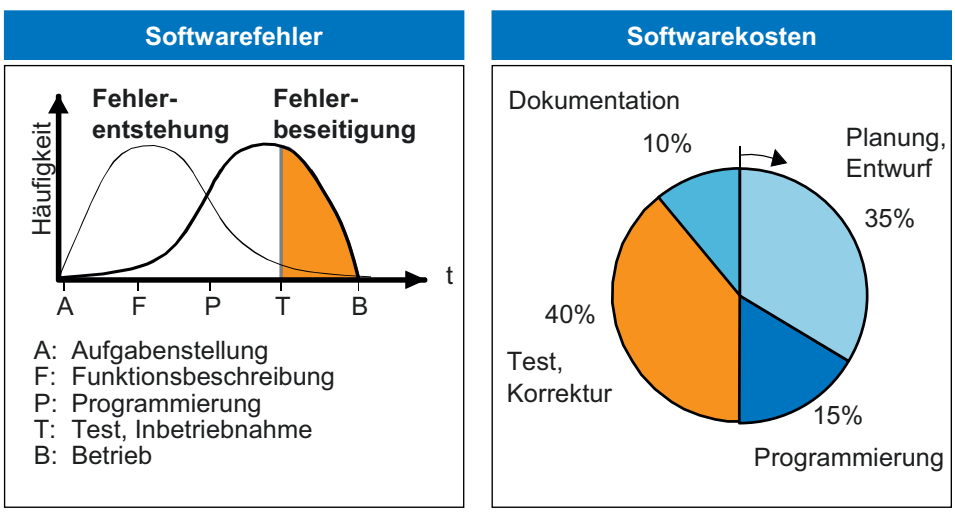


Bild 10.27 Fehler und Kosten bei der SPS-Softwareentwicklung. Nach [OEST86].

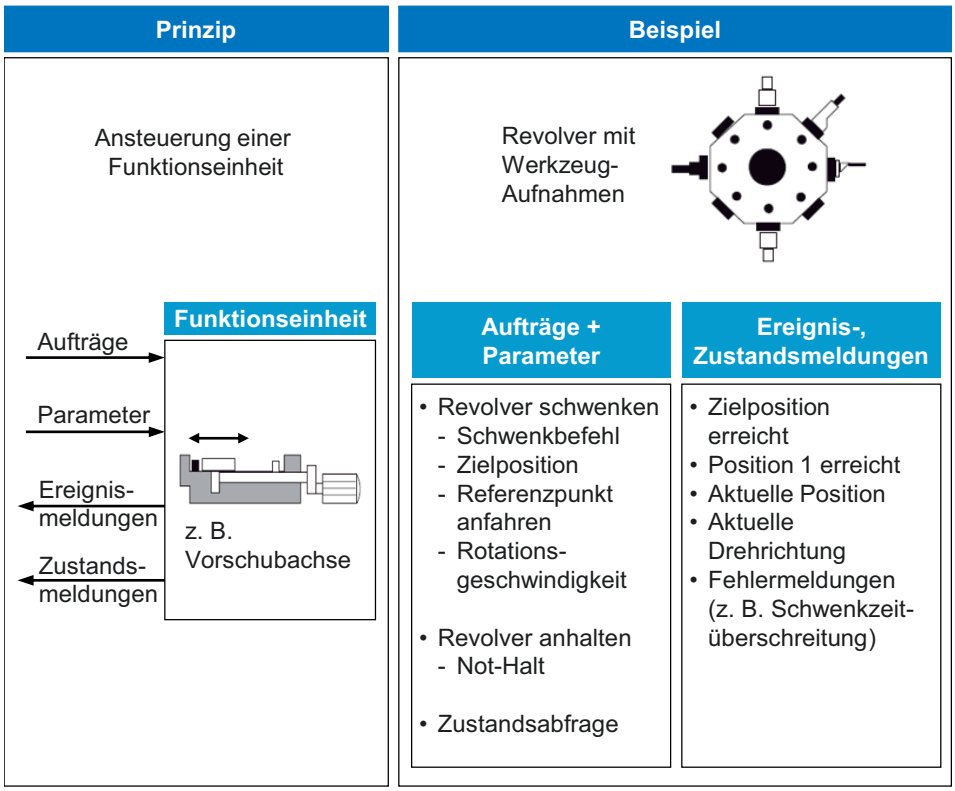


Bild 10.28 Strukturierung von SPS-Softwaremodulen durch Ausrichtung an den mechanischen Funktionseinheiten

grammiergerätes, wobei je nach Aufgabenstellung und individueller Neigung des Programmierers jedes der im ▶ Kap. 10.3.3 beschriebenen Programmierverfahren genutzt werden kann. Der nächste wichtige Schritt ist der Test der entwickelten Programme.

10.3.4.3 Programmtest

Die wesentliche Zielsetzung beim Testen von SPS-Programmen besteht darin, zu Beginn der Inbetriebnahme weitgehend ausgetestete Programme zur Verfügung zu stellen, um den allgemein hohen Softwaretestanteil an der gesamten Inbetriebnahme zu reduzieren [WECK90; SOSS89].

Eine einfache, früher in vielen Unternehmen eingesetzte Testhilfe für SPS-Programme ist ein Schaltpult, vgl. Bild 10.29. Es besteht aus einem Eingabefeld mit Schaltern und Tastern, die an die SPS-Eingänge angeschlossen werden, sowie einer Reihe von Leuchten, die die SPS-Ausgänge anzeigen. Für Analogsignale kommen Potentiometer und Analoganzeigen hinzu. Mit Hilfe der Schaltelemente können gezielt bestimmte Eingangszustände der Maschine vorgegeben werden. Die Steuerung liest diese Signale ein, verarbeitet sie gemäß des SPS-Programms und setzt die entsprechenden Ausgangssignale. Entspricht die an den Leuchten ablesbare Reaktion der SPS nicht den Erwartungen bzw. Anforderungen, muss die Software entsprechend modifiziert werden. Einige SPS-Hersteller bieten spezielle Simulationskarten an, um dem Anwender die Realisierung separater Testaufbauten zu ersparen.

Der entscheidende Nachteil dieser einfachen Testverfahren besteht darin, dass der Benutzer das Prozessverhalten der Maschine manuell nachbilden muss. Diese Vorgehensweise erfordert ein hohes Abstraktionsvermögen und ersetzt das Zeitverhalten der Maschine nur näherungsweise, sodass dynamische Vorgänge kaum überprüfbar sind. Hinzu kommt die fehlende Anschaulichkeit dieses Verfahrens, sodass komplexe Steuerungsabläufe kaum nachvollziehbar sind. Häufig besteht daher der Wunsch, zusätzlich das zeitliche Verhalten der Maschine nachzubilden, um die von den Sensoren und Endschaltern gelieferten Rückmeldungen in Abhängigkeit von den SPS-Ausgangssignalen zeitrichtig zu generieren. Eine günstigere Lösung besteht in einer rechnerunterstützten Simulation des logischen und zeitlichen Prozessverhaltens der Maschine

Bild 10.30 verdeutlicht das Grundprinzip einer Testumgebung für SPS-Software. Die betriebsbereite SPS wird an einen Simulationsrechner angeschlossen, der das steuerungstechnische Prozessverhalten der Maschine simuliert. Der Simulationsrechner verhält sich aus der Sicht der SPS wie die Maschine: Er empfängt Befehle in Form der von der SPS kommenden Ausgangssignale und generiert gemäß dem in einem Simulationsmodell spezifizierten Maschinenverhalten geeignete, zeitlich aufeinander abgestimmte Rückmeldungen der Geber und Sensoren. Das entsprechende Testverfahren, bei dem reale Steuerungselektronik anhand simulierter Eingangssignale getestet wird, wird als Hardware-in-the-Loop (HiL) bezeichnet.

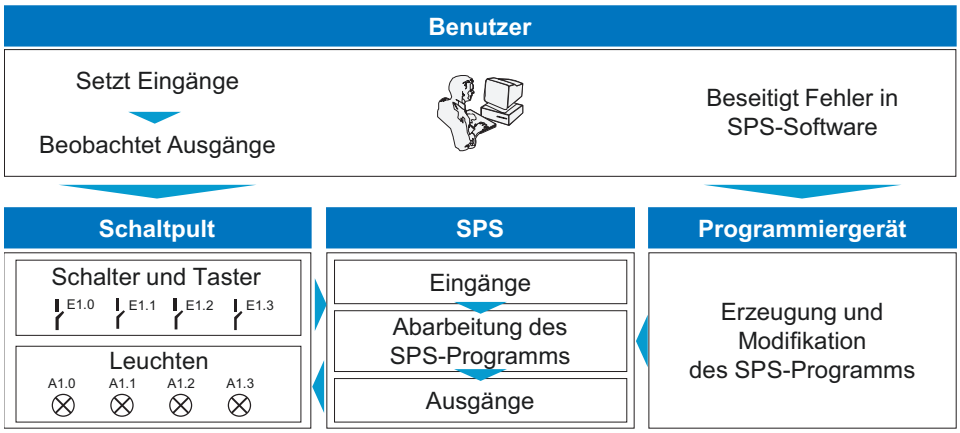


Bild 10.29 Einfaches Testverfahren für SPS-Programme (heute nicht mehr eingesetzt)

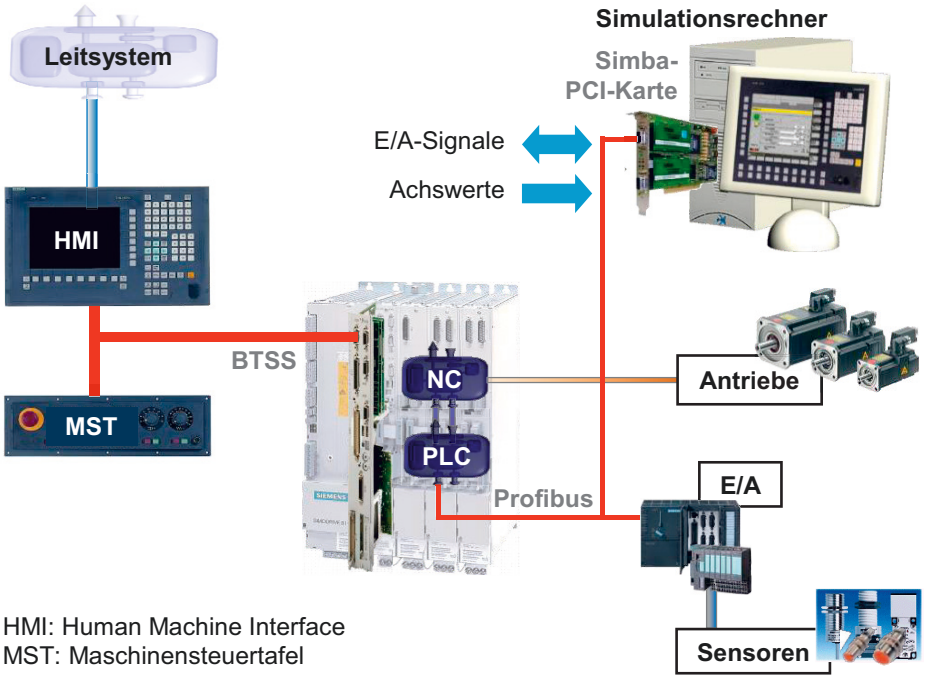


Bild 10.30 Aufbau einer Hardware-in-the-Loop-Testumgebung

Hardware-in-the-Loop Simulation

Bei der Hardware-in-the-Loop Simulation wird die Steuerung in die Simulationsumgebung eingebunden. Mit Hilfe einer Einbaukarte im PC werden dezentrale Ein- und Ausgänge simuliert. Dadurch kann das mechatronische Verhalten der Maschine auf dem Steuerungsrechner projektiert und verifiziert werden. Zur Simulation wird originale NC- und PLC-Hardware verwendet. Die Simulation erfolgt auf dem Rechner, der die Eigenschaften der angeschlossenen Komponenten simuliert. Durch den Anschluss an die reale Steuerung liegt eine echtzeitfähige Kommunikation zwischen den beteiligten Komponenten vor. Zu beachten ist allerdings, dass durch diese Vorgehensweise die Simulationstiefe bzw. Komplexität in gewisser Weise beschränkt ist.

Alle Funktionen und Abläufe können während eines Simulationstestes in geeigneter Weise visualisiert und protokolliert werden, sodass der Benutzer überprüfen kann, ob sie mit dem erwarteten Verhalten der Maschine übereinstimmen. Durch eine Beeinflussung von Prozesssignalen besteht zusätzlich die Möglichkeit, Fehler und externe Einflüsse zu simulieren und die entsprechenden Auswirkungen zu beobachten. Dieser Möglichkeit kommt angesichts der Erfahrung, dass Steuerungsprogramme häufig zu weit über 50 % aus Fehlererkennungs- und Diagnoseroutinen bestehen [SEIF92], besondere Bedeutung zu.

Software-in-the-Loop Simulation

Neben der HiL-Prüfung besteht die Möglichkeit, auch die SPS-Hardware mitsamt der Ein- und Ausgänge simulativ abzubil-

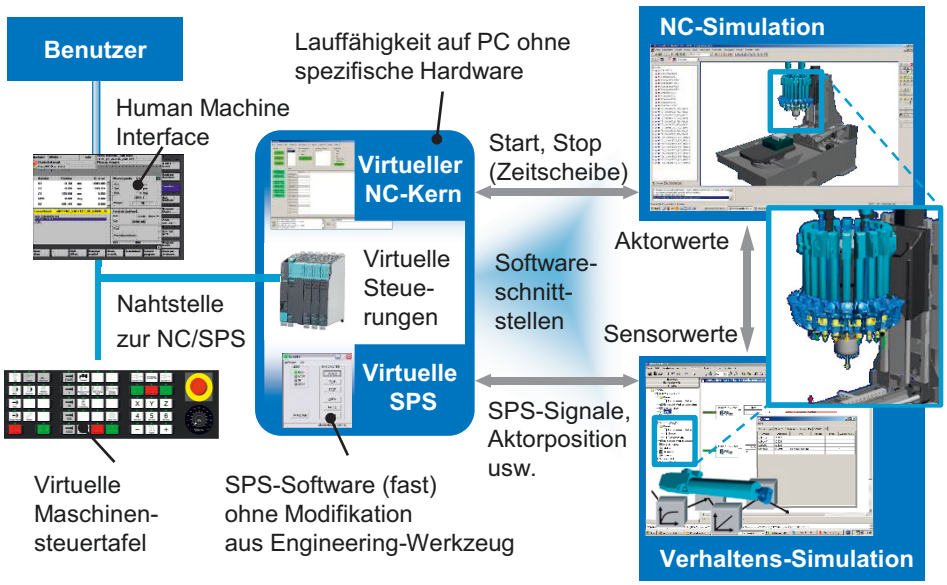


Bild 10.31 Software-in-the-Loop-Simulation: Steuerungstechnische Vollsimulation von Werkzeugmaschinen

10

den [HERF10]. Dadurch können Ein- bzw. Ausgänge direkt am Programmierrechner gesetzt bzw. beobachtet werden, wodurch ein Programmtest bereits in der frühen Programm-Entwicklungsphase erfolgen kann. Das entsprechende Verfahren wird als Software-in-the-Loop (SiL) bezeichnet Bild 10.31. Durch die Anwendung der Software-in-the-Loop-Simulation kann Software getestet werden, ohne dass die später für die Ausführung vorgesehene Hardware vorhanden ist. In dem abgebildeten Beispiel wird eine Werkzeugmaschine vollständig simuliert. So können z. B. NC-Programme ausgeführt werden, wobei in der Simulation z. B. das Verhalten des Werkzeugwechslers nachgebildet wird.

Chancen und Risiken von Simulationsanwendungen

Mit Hilfe von Simulationsumgebungen lässt sich ein erhöhtes Prozessverständnis erzielen und Produktionssysteme schädigungsfrei prüfen, wodurch ein wirtschaftlicher Ressourceneinsatz möglich ist. Steuerungstests lassen sich durch Formalisierung der Testvorgänge einfach automatisieren. Die Kopplung von Simulationssystemen erlaubt zudem die Aufdeckung von Wechselwirkungen innerhalb des Produktionssystems. Neben den Vorteilen sind der Simulation auch Grenzen gesetzt. So kann der Modellierungsaufwand mitunter sehr hoch und damit – abhängig vom Detaillierungsgrad und dem Betrachtungsumfang – unwirtschaftlich ausfallen. Außerdem bilden Modelle immer nur einen Teil der Wirklichkeit ab, sodass es passieren kann, dass bedeutsame Effekte vernachlässigt werden. Allgemein wird der Mehrwert einer Simulation wesentlich durch das zugrundeliegende Prozessverständnis und die technische sowie organisatorische Umsetzung mitbestimmt. Auch in Zukunft müssen daher Kopplungsmechanismen weiter analysiert und erforscht werden.

Bussysteme

In Fertigungs- und Montageanlagen stammen die Signale der Ein- und Ausgänge in der Regel aus mehreren räumlich weit auseinanderliegenden Baugruppen, peripheren Einrichtungen oder Maschinen, die an die SPS angeschlossen sind. Um den Verdrahtungsaufwand zwischen den an der Kommunikation beteiligten Komponenten gering zu halten, wird der Signalfluss über Bussysteme realisiert. Sie fassen mehrere Informationen zusammen und verteilen diese erst vor Ort an die Busteilnehmer. Bussysteme unterscheiden sich z. B. hinsichtlich Echtzeitfähigkeit, Ausfallsicherheit und Eigensicherheit (z. B. in explosionsgefährdeten Bereichen) und werden in Abhängigkeit der jeweiligen Systemanforderungen ausgewählt. Die Busarchitektur beschreibt, wie die Busteilnehmer angeordnet bzw. vernetzt sind (z. B. sternförmige oder ringförmige Anordnung der Busteilnehmer). Eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Bussysteme und -architekturen mit den wichtigsten Eigenschaften findet sich in ▶ Kap. 9.3.3 und 9.3.4.

10.4 Sicherheitssteuerungen

Da Steuerungsfehler in automatisierten Maschinen und Fertigungssystemen zu schwerwiegenden Unfällen mit Personen- und Sachschäden führen können, werden in sicherheitskritischen Anwendungen fehlersichere Steuerungen eingesetzt, die sowohl bei steuerungsinternen Fehlern als auch bei Fehlfunktionen an den Prozess-Schnittstellen ein definiertes Verhalten des Gesamtsystems sicherstellen.

Bild 10.32 gibt einen Überblick über mögliche, im Folgenden erläuterte Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit von Steuerungssystemen [FREN87].

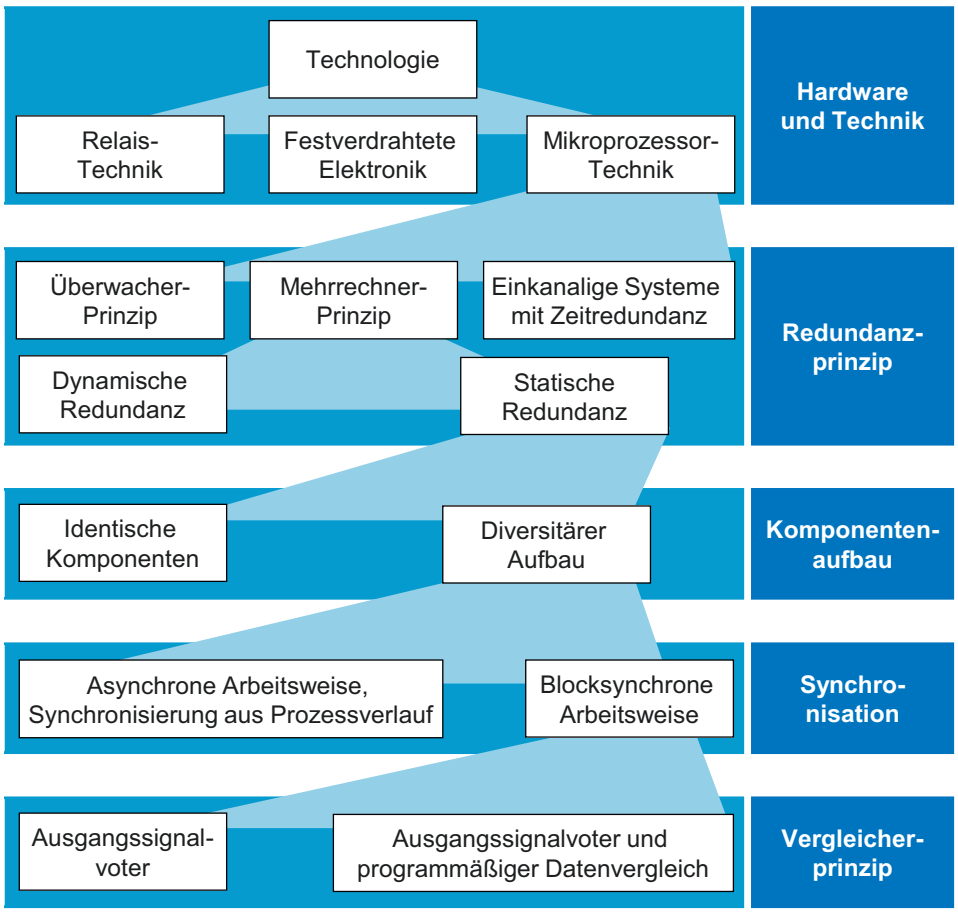


Bild 10.32 Gliederung der Maßnahmen zum Aufbau fehlersicherer Steuerungssysteme

Im Bereich der Fertigungstechnik werden beispielsweise Pressen oder Werkzeugmaschinen mit Sicherheitssteuerungen ausgerüstet, um das Herabfallen von vertikalen Achsen zu verhindern. Neben den klassischen redundant aufgebauten Relaissteuerungen haben sich mittlerweile speicherprogrammierbare Steuerungen und sogar Feldbussysteme für den Einsatz in sicherheitskritischen Anwendungsbereichen durchgesetzt [PILZ13].

Hauptaufgabe einer fehlersicheren Steuerung muss es sein, nach Erkennung eines Fehlers umgehend einen definierten, sicheren Zustand herbeizuführen. Bei Werkzeugmaschinen und Industrierobotern kann dies z. B. das Sperren der Antriebe bedeuten. Bei Systemen, die einen sicheren Zustand nicht sofort herbeiführen können, kommt dagegen der Tolerierung von Fehlern eine erhöhte Bedeutung zu: Ein in der Luft befindliches Flugzeug kann beispielsweise nach Ausfall einer sicherheitsrelevanten Komponente nicht umgehend einen sicheren Zustand annehmen. In solchen Fällen sind fehlertolerante Steuerungen erforderlich, die auch nach Erkennung eines Fehlers ihre ursprüngliche Aufgabe korrekt weiterführen können. Ob zum Aufbau einer fehlersicheren Steuerung die einfache Fehlererkennung ausreicht oder aber Fehlertoleranz gefordert wird, hängt letztlich von der Aufgabenstellung ab.

10.4.1 Maschinenrichtlinie

Am 29. Dezember 2009 sind im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) die nationalen Umsetzungen der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG in Kraft getreten [EURO06; EBER12]. Die Neufassung der Maschinenrichtlinie wurde im Rahmen der Harmonisierung der Rechtsvorschriften innerhalb der EG zum Abbau von Handelshemmnissen und zur Schaffung einheitlicher sicherheitstechnischer gesetzlicher Bestimmungen entwickelt. Zum Inverkehrbringen von Maschinen und Anlagen innerhalb des EWR müssen Maschinenhersteller gemäß der Richtlinie verschiedene Pflichten erfüllen:

- Die Maschine muss den Sicherheitsanforderungen aus Anhang 1 der Richtlinie genügen.
- Es muss eine technische Dokumentation der Anlage, insbesondere zur Risikobeurteilung verfügbar sein.
- Zum Betrieb erforderliche Dokumentation (Betriebsanleitung) muss zur Verfügung gestellt werden.
- Es muss ein Konformitätsbewertungsverfahren durchgeführt werden.
- Die EG-Konformitätserklärung muss ausgestellt und der Maschine beigelegt werden.
- Die CE-Kennzeichnung muss an der Maschine angebracht werden.

Allgemeine Hinweise zur sicheren Gestaltung von Maschinen und Anlagen, werden in Band 2 dieser Buchreihe beschrieben. Für den Bereich der Steuerungstechnik gelten darüber hinaus weitere, spezifischere Anforderungen. So werden in § 1.2 des Anhang 1 der Richtlinie konkrete Anforderungen an Steuerungen und Befehlseinrichtungen explizit ausdetailliert. Beispiele für diese Anforderungen sind etwa,

- dass die Maschine nicht unbeabsichtigt in Gang gesetzt werden darf,
- dass das Stillsetzen der Maschine, sobald der Befehl zum Stillsetzen erteilt wurde, nicht mehr verhindert werden darf oder
- dass Not-Halt-Befehle unabhängig von der Betriebsart jederzeit verfügbar und betriebsbereit sein müssen.
- Darüber hinaus fallen elektrische Steuerungen automatisch sowohl unter die Niederspannungsrichtlinie als auch die EMV-Richtlinie, deren Vorschriften somit ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

10.4.2 Performance Levels

Um die Zuverlässigkeit von Sicherheitsfunktionen auf einheitliche Weise bewertbar zu machen, sind in EN ISO 13849-1 „Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze“ die sogenannten Performance-Level (PL) definiert. Ein PL ist ein „diskreter Level, der die Fähigkeit von sicherheitsbezogenen Teilen einer Steuerung spezifiziert, eine Sicherheitsfunktion unter vorhersehbaren Bedingungen auszuführen“ [DIN08]. In ◘ Bild 10.33 ist für jeden der fünf Performance Level ein Bereich für die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls des Steuerungssystems je Stunde definiert.

Um eine Beurteilung der Zuverlässigkeit auf Basis der PL durchzuführen, muss ähnlich der Risikobeurteilung nach EN 954-1 anhand der Kriterien Schadensausmaß, Häufigkeit bzw. Aufenthaltsdauer sowie der Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung der erforderliche PL der betrachteten Sicherheitsfunktion bestimmt werden. Die Bestimmung wird durch einen Entscheidungsbaum erleichtert, welcher anhand der genannten Kriterien einen eindeutigen Pfad zu dem entsprechenden PL liefert.

Dem erforderlichen PL wird der tatsächlich erreichte PL gegenübergestellt, wobei letzterer für eine positive Bewertung der umgesetzten Sicherheitsfunktion größer oder gleich dem erfoderlichen PL sein muss. Der erreichte PL wird auf Basis der Steuerungskomponenten sowie der Sicherheitsbauteile bestimmt. Zum einen wird deren Mean Time To Failure (MTTF) bestimmt, welche die durchschnittliche Zeit bis zu einem Ausfall darstellt. Zum anderen werden die Komponenten in die Kategorien B, 1, 2, 3 und 4 eingeteilt, welche jeweils das Maß an integrierten Sicherheitsfunktionen wiedergeben. Je nach Kombination von Kategorie und MTTF kann der erreichte Performance Level dann anhand der Norm bestimmt werden.

10.4.3 Zweikanalige, fehlererkennende Steuerungsstruktur

Ein Prozess, der nach Auftreten eines Fehlers innerhalb der Steuerung oder an deren Schnittstellen zur Maschine einen definierten sicheren Zustand annehmen soll, erfordert einen zweikanaligen Steuerungsaufbau nach ◘ Bild 10.34.

Die beiden Teilsysteme führen dieselben Operationen durch und vergleichen zu bestimmten Zeitpunkten ihre Ein- und Ausgangssignale sowie bei Bedarf auch Zwischenergebnisse oder Systemzustände. Tritt in einer der beiden Komponenten ein Fehler auf, wird dieser durch den gegenseitigen Vergleich erkannt und es kann eine entsprechende Fehleranzeige erfolgen. Bei redundant aufgebauten Steuerungen mit identischer Hard- und Software besteht die Gefahr, dass systembedingte Fehler unerkannt bleiben, da sie in beiden Steuerungsrechnern gleichzeitig auftreten können und somit unter Umständen einen fehlerfreien Zustand vortäuschen. Abhilfe kann hier eine diversitäre Auslegung des Gesamt-

Stufe (PL)	Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde [1/h]
a	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ bis $< 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$

◘ **Bild 10.33** Performancelevel und Ausfallwahrscheinlichkeiten. Nach [DIN08]

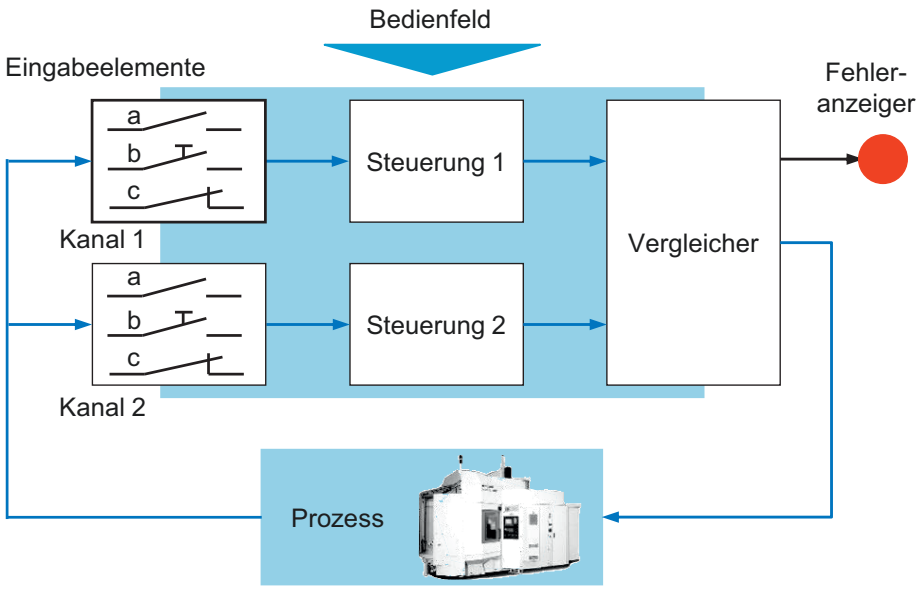


Bild 10.34 Zweikanalige, fehlererkennende Steuerungsstruktur

systems schaffen [DIN90; HÖLS84]: Die redundanten Komponenten unterscheiden sich in ihrem Aufbau voneinander (z. B. unterschiedliche Mikroprozessoren), obwohl sie dieselbe Aufgabe ausführen sollen. Nur dann gilt die Annahme, dass ein Fehler in einem Teilsystem nicht die gleichen Auswirkungen im anderen Teilsystem haben kann. Während die Wahl verschiedener Mikroprozessoren bei elektronischen Steuerungen zu einem diversitären Aufbau der Hardware führt, kann eine diversitäre Erstellung von Software letztendlich nur durch die Beteiligung mehrerer, unabhängiger Programmierer garantiert werden, da die Gefahr besteht, dass sich ein einzelner unerkannter Fehler im Entwurf der Programmstrukturen auf alle Einzelsysteme überträgt.

10.4.4 Dreikanalige, fehlertolerante Steuerungsstruktur

Der prinzipielle Nachteil zweikanaliger Steuerungen besteht darin, dass nach der Erkennung eines Fehlers umgehend der sichere Zustand herbeigeführt und somit ein weiterer Betrieb zunächst unterbunden wird. Darüber hinaus können die beiden Einheiten im Fehlerfall zumeist nicht entscheiden, in welchem Teilsystem der Fehler aufgetreten ist.

Eine deutliche Erhöhung der Systemzuverlässigkeit – verbunden mit einer weiteren Steigerung der Sicherheit – lässt sich mit einer dreikanaligen Ausführung erzielen, Bild 10.35.

Nach Ausfall eines Teilsystems kann der Betrieb aufrechterhalten und der Fehler somit für eine gewisse Zeit toleriert werden. Der 2-von-3-Voter bestimmt nach einem Vergleich der Steuerungsausgänge die korrekten Ausgangsgrößen durch „Mehrheitsentscheid". Das als fehlerhaft identifizierte Teilsystem wird vom weiteren Entscheidungsprozess ausgeschlossen, während die beiden noch funktionsfähigen Einheiten auf einen zweikanaligen fehlersicheren Betrieb umschalten. Erst nach Auftreten eines weiteren Fehlers muss das Gesamtsystem in den sicheren Zustand überführt werden. Bei dreikanaligen Steuerungen mit fehlertolerantem Verhalten besteht oft die Möglichkeit, die fehlerhafte Komponente während des Betriebes auszutauschen und in Stand zu setzen. Auf diese Weise können teure und unproduktive Stillstandszeiten vermieden werden.

10.4.5 Konventionelle Sicherheitsschaltung in Relaistechnik

Sicherheitsrelevante Schaltkreise, wie z. B. der Not-Aus-Kreis bei Werkzeugmaschinen, werden aufgrund des einfachen, leicht überwachbaren Aufbaus in der Regel in redundanter Relaistechnik gemäß IEC 60204-1 und VDI-Richtlinie 2854 [DIN14a; VDI91] ausgeführt.

Bild 10.36 zeigt eine solche Relaisschaltung mit zwangsgeführten Relaiskontakten, wie sie in der Praxis zum Einsatz kommt und auch als platz- und verdrahtungssparende Kompaktlösung erhältlich ist [KOCH93].

Prinzipiell wird die Freigabe für die Anlage nur bei korrekter Funktion aller drei Relais K1, K2 und K3 erteilt, wobei Fehler an den Relais durch eine regelmäßige automatische Überprüfung ihrer Ein- und Ausschaltfähigkeit erkannt werden können. Gemäß ▶ Kap. 10.4.3 handelt es sich dabei um eine zweikanalige, fehlererkennende Redundanz, wobei die in Reihe liegenden Schließerkontakte k2.2 und k3.2 die Redundanz für das sichere Abschalten der Anlage darstellen. Die korrekte Funktion dieser beiden Kontakte wird vor jedem Einschalten durch kurzfristiges Öffnen des Kontaktes k1.5 überwacht.

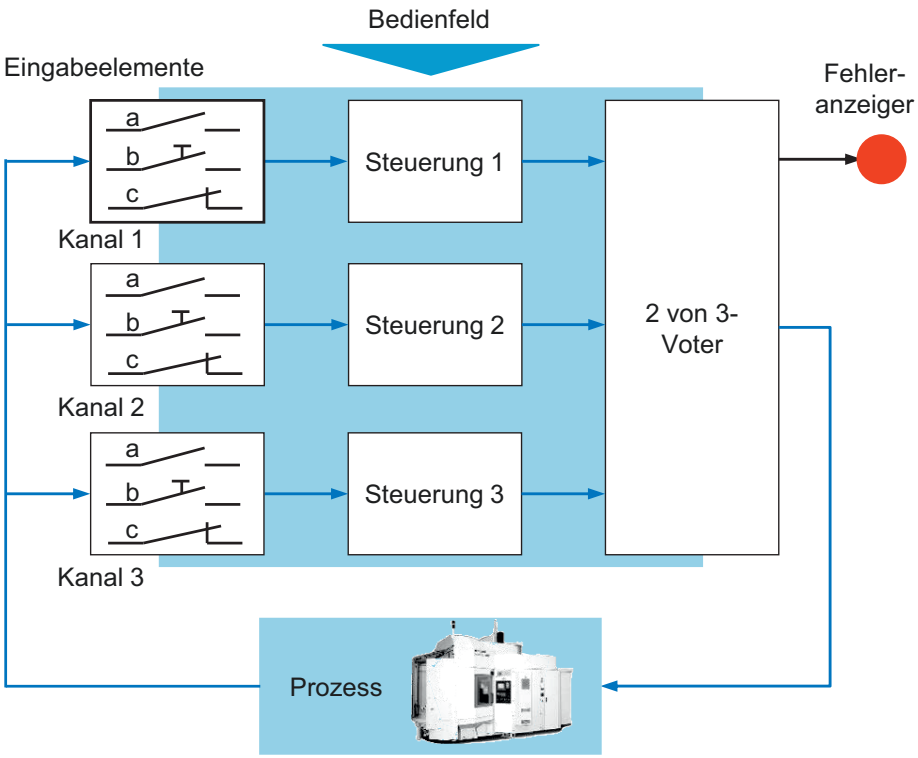


Bild 10.35 Dreikanalige, fehlertolerante Steuerungsstruktur

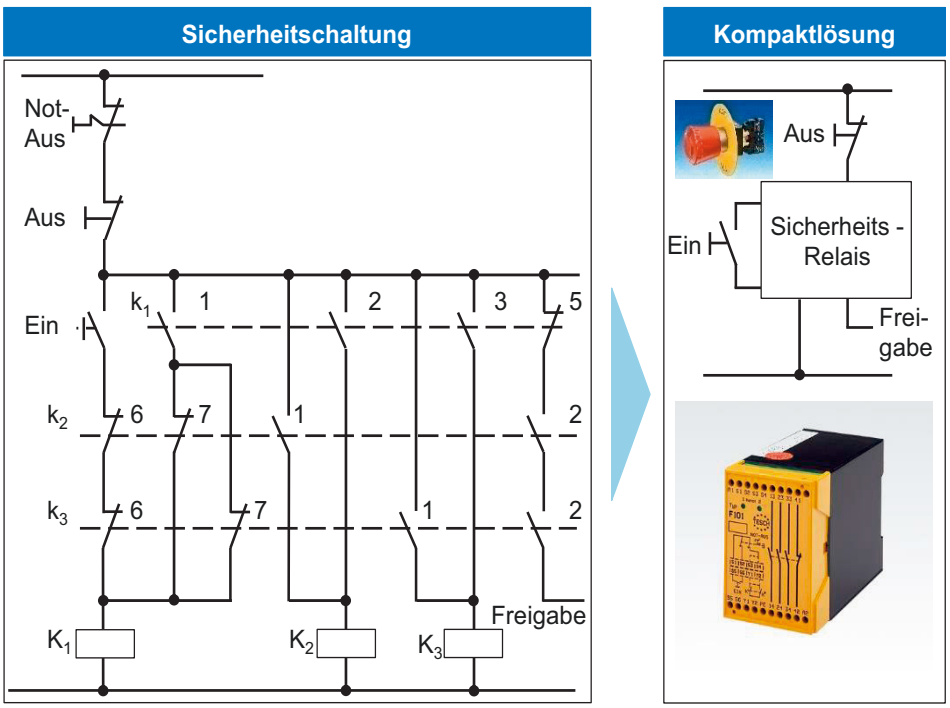


Bild 10.36 Not-Aus-Kreis in sicherer Relaistechnik. Nach [KOCH93].

Bei Betätigung der Ein-Taste schaltet das Relais K1 und geht über die parallelen Öffner k2.7 und k3.7 in Selbsthaltung über. Gleichzeitig werden die Relais K2 und K3 betätigt und gehen ebenfalls in Selbsthaltung. Die Selbsthaltung von K1 wird durch Öffnen von k2.7 und k3.7 wieder aufgehoben. K1 kann jedoch nur dann abfallen, wenn K2 und K3 angezogen haben. Bei der Betätigung der Aus-Taste oder des Not-Aus-Schalters fallen die Relais K2 und K3 wieder ab. Sollte eines dieser Relais im Fehlerfall nicht abfallen, wird über die in Reihe liegenden Öffner k2.6 und k3.6 ein erneutes Anziehen von K1 und damit das Wiedereinschalten der Anlage verhindert.

10.4.6 Fehlersichere Prozessankopplung

Da bei konventionellen Steuerungen etwa 90 % aller Ausfälle auf Fehler an den Prozessschnittstellen zurückzuführen sind [LEIS87], ist Redundanz in diesem Bereich von besonderer Bedeutung. Die Fehlererkennung betrifft hier sowohl die Ein- und Ausgangskanäle der Steuerungsrechner als auch die im Prozess eingesetzten Signalgeber und Stellglieder, wie die folgenden Abschnitte beispielhaft zeigen.

10.4.6.1 Sichere Auswertung von Prozesseingängen

Zum sicheren Einlesen von Prozesseingängen können mechanisch zwangsgeführte Relais und Schalter eingesetzt werden, die durch zwei gegensinnige Schalterkontakte eine gesicherte Auswertung von Schalterinformationen ermöglichen. Bild 10.37 zeigt als Beispiel eine einfache Schaltung in Relais-Technik zur Auswertung eines Positionsschalters.

Während bei der einfachen Schalterauswertung, im Bild 10.37 links, nur die Schaltkontakte selbst zur weiteren Verarbeitung verwendet werden, erhält die redundante, überwachbare Schaltung im Bild rechts zusätzliche Bauelemente. Im ersten Fall kann ein defekter oder „klebender" Tastschalter nicht entdeckt werden. Anders verhält es sich bei der zweiten Lösung, bei der ein Positionsschalter mit Öffner- und Schließerkontakt verwendet wird. Die mechanische Zwangsführung dieser Kontakte hat zur Folge, dass zwar beim Umschalten beide Kontakte kurzzeitig geöffnet, niemals jedoch gleichzeitig geschlossen sein können. Zur Auswertung der Kontakte dienen zwei Hilfsrelais K1 und K2, von denen im fehlerfreien Fall nur eines stromführend ist. Sind durch Kurzschlüsse oder Unterbrechungen beide Relais stromführend, wird der Freigabekontakt unterbrochen. Die Rückkopplung der Relais K1 und K2 in Verbindung mit der Freigabesignalschaltung erfüllt zwei Forderungen an die Auswerteschaltung. Zum einen soll beim Schaltwechsel kein Fehler für die Freigabe der Maschine durch das kurze gleichzeitige Öffnen der Kontakte entstehen, zum anderen soll die Schaltinformation erst dann weitergeleitet werden, wenn der Schaltkontakt geschlossen, der Wechselvorgang also beendet ist.

Während so neben der Schalterfunktion auch beliebige Kurzschlüsse und Unterbrechungen an den Schalterkontakten oder den Steuerungsanschlüssen erkannt werden können, ist die Erkennung mechanischer Defekte an den Prozesseingängen (z. B. Abbrechen eines Taststiftes) oft nur durch eine redundante Ausführung der Eingabeelemente möglich.

Bei programmierbaren Steuerungen werden die Verknüpfungen, die bei der Relaissteuerung durch die Verdrahtung realisiert sind, als Anweisungen in Form eines textuellen Programms definiert. Bild 10.38 zeigt die Umsetzung der beschriebenen Schalterabfrage in ein SPS-Programm, wobei die Steuerung zwei Eingänge für Öffner- und Schließerkontakt des Schalters benötigt.

Anstelle der Hilfsrelais werden nun Merker verwendet. Der Merker M10 dient als Zustandsmerker für einen schweren Fehler, der genau dann vorliegt, wenn beide Kontakte gleichzeitig geschlossen sind (E1 = 1 und E2 = 1). Sind beide Kontakte offen, wird die Schalterabfrage wiederholt, da gerade ein Zustandswechsel des Schalters stattfindet oder aber ein Kabelbruch vorliegt (vgl. auch Bild 10.39). Nur bei den Kombinationen E1 = 1 / E2 = 0 oder E1 = 0 / E2 = 1 wird der Merker M1 für den Zustand der Öffner-Schließer-Kombination auf logisch EINS („betätigt") oder logisch NULL („unbetätigt") gesetzt.

Bei der Auswertung redundanter Schaltelemente durch mehrere Steuerungseinheiten, z. B. zwei Mikrorechner, sind weitere Randbedingungen zu beachten (Bild 10.39). Während im fehlerfreien Fall 1 gegensinnige Schalterstellungen vorliegen, sind im folgenden Fall 2 während eines Zustands-

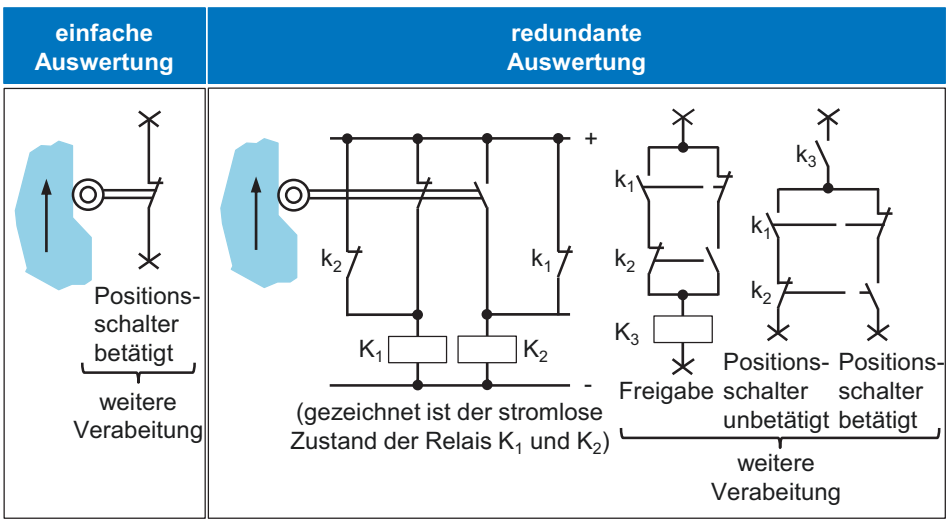
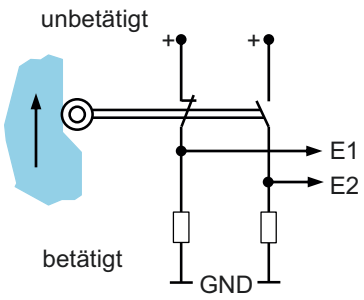


Bild 10.37 Realisierung einer Schalterauswertung in Relaistechnik

Anschluss des Schalters an die Steuerung





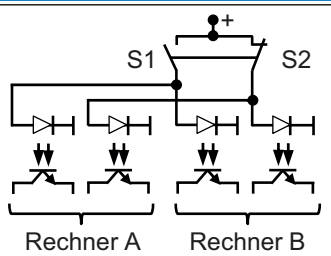
SPS-Schalterabfrage

```
   U   E1   Eingang 1
   U   E2   Eingang 2
   SPB 10   Springe nach 10,
            wenn beide Schalter zu
   UN  E1   Eingang 1 invertiert
   UN  E2   Eingang 2 invertiert
   SPB 5    Springe nach 5, wenn
            beide Schalter offen
   U   E2   Eingang 2
   UN  E1   Eingang 1 invertiert
   =   M1   Zustand "betätigt"
        ¦
   weiterer Ablauf
        ¦
5  Schalterabfrage wiederholen
        ¦
10 S   M10  Beide Schalter
        ¦   geschlossen:
        ¦   Schwerer Fehler!
        ¦
   Aufruf des sicheren Zustandes
```

Bild 10.38 Programmtechnische Umsetzung einer Schalterabfrage

10

Verschaltung von Rechnern und Schaltelementen



S1, S2: Schalterelemente mit mechanisch zwangsgeführten Kontakten

Auswertung der Schalter

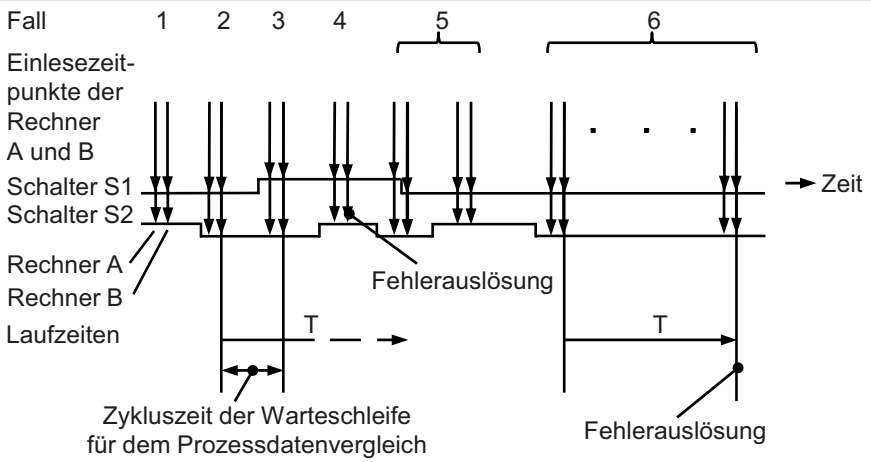


Bild 10.39 Anschluss und Auswertung von Prozesseingängen

wechsels des Schaltelements beide Kontakte kurzzeitig geöffnet. Um dies von einem längerfristigen Kabelbruch unterscheiden zu können, wird mit der Laufzeit T die Dauer des Fehlerzustands überwacht. Während T nach dem Einlesen des korrekten Zustands wieder abgebrochen wird (Fall 3), führt eine Überschreitung der Laufzeit (Fall 6) ebenso zu einer Fehlerauslösung wie im Fall 4, wenn beide Kontakte gleichzeitig geschlossen sind bzw. durch einen Kurzschluss ein solcher Zustand vorgetäuscht wird. Aufgrund der unterschiedlichen Programmlaufzeiten diversitär aufgebauter Einzelrechner kann außerdem der im Bild 10.39 gezeigte Fall 5 auftreten, bei dem die Teilsysteme unterschiedliche Eingangszustände einlesen. Dann erfolgt eine Wiederholung des Einlesevorgangs.

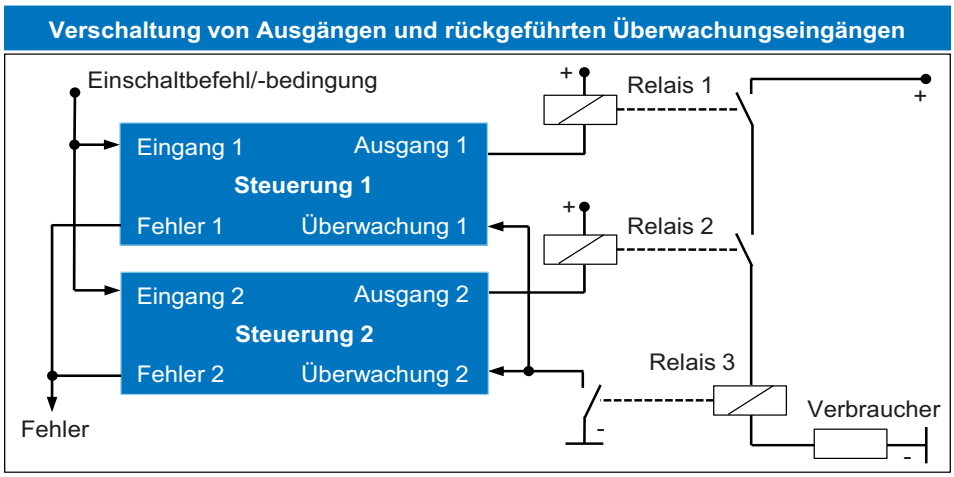
10.4.6.2 Fehlersichere und fehlertolerante Prozessausgänge

Fehler an den Steuerungsausgängen sowie den nachgeschalteten Stellgliedern sind über geeignete Rückführungen in die Steuerungsrechner erkennbar, wie Bild 10.40 beispielhaft zeigt. Jede Steuerung für sich kann durch Sperren des jeweiligen Ausgangs den Stromfluss im Verbraucher unterbrechen. Der aktuelle Zustand des Verbraucherstromkreises wird mit Hilfe von Relais 3 über einen rückgeführten Eingang (Überwachung) an die Steuerungen übermittelt, sodass durch einen mehrstufigen Einschaltvorgang eine Kurzschlusserkennung möglich ist: Nacheinander aktiviert nur jeweils eine Steuerung ihren Ausgang, während der korrespondierende Ausgang der anderen Steuerung gesperrt bleibt. Wird über die rückgeführten Überwachungen trotzdem ein Stromfluss im Verbraucher signalisiert, liegt ein Kurzschluss an den Relais vor, und der Prozess muss umgehend in den sicheren Zustand überführt werden.

Bei der Konzeption fehlertolerierender Steuerungen kommt die Forderung nach einer Ausführung der Stellglieder in 2-von-3-Technik hinzu, sodass neben einem steuerungsinternen Mehrheitsentscheid auch ein Fehler im Ausgangsbereich toleriert werden kann. Bild 10.41 zeigt beispielsweise ein fehlertolerantes Ventil, das nur dann einen Durchfluss in Pfeilrichtung zulässt, wenn die Steuerungsrechner mindestens zwei Magnetspulen aktivieren und die Öffnung somit weit genug nach rechts geschoben wird.

Hierbei wird vorausgesetzt, dass jede Spule nur in einer Richtung mit konstantem Strom gespeist wird oder stromlos ist. Eine Rückstellfeder sorgt dafür, dass sich die Öffnung im stromlosen Zustand in ausreichender Entfernung vom Durchflussrohr befindet. Mit Hilfe der Rückkopplung in Form eines Schalters, im Bild 10.41 rechts, ist diese Anordnung zusätzlich überwachbar: Vor dem Einschalten des Ventils wird zunächst abwechselnd nur je ein Ausgang aktiviert. Wird hierbei über die Rückkopplung bereits eine Freigabe des Ventils signalisiert, was im fehlerfreien Zu-

Bild 10.40 Prinzip eines überwachbaren Fail-Safe-Ausgangs



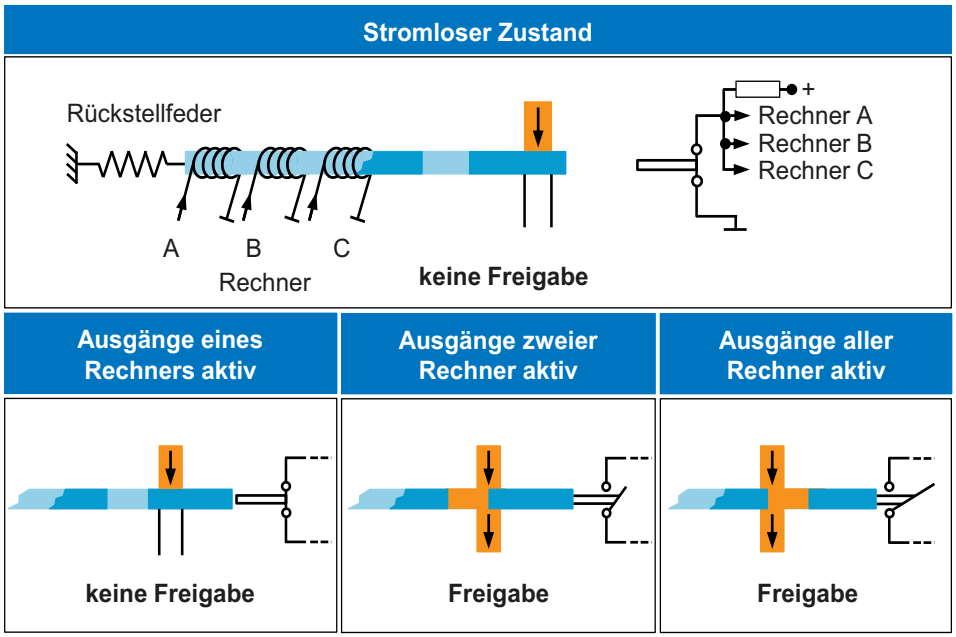


Bild 10.41 Beispiel eines fehlertoleranten Ausgangs mit einem Stellglied in 2-von-3-Technik

stand nur bei mindestens zwei gleichzeitig aktiven Ausgängen der Fall sein darf, so liegt an einem der Ausgänge ein fehlerhafter Kurzschluss vor.

10.5 Motion Control

Um den vielfältigen und hohen Leistungsanforderungen für die Bewegungsteuerung in heutigen Produktionsanlagen gerecht zu werden, sind Steuerungsfunktionen erforderlich, die über den Leistungsumfang der konventionellen Speicher- und Verbindungsprogrammierbaren Steuerungen hinausgehen. Dabei erfordern insbesondere die Echtzeitfähigkeit und Synchronität sowie die durch Interpolationsaufgaben bedingten hohen Rechenleistungen die Verwendung spezifischer Steuerungslösungen. Im Folgenden werden daher Aufbau und Funktionsweise sowie die systemtypischen Eigenschaften von Motion-Control-Systemen vorgestellt.

10.5.1 Grundlagen und Anwendung

Allgemein können unter Motion-Control-Systemen zunächst sämtliche Formen von Bewegungsregelungssystemen verstanden werden. Die Auswertung von Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie das Vorhandensein von Aktorik und Sensorik sind ebenso charakteristisch wie die Echtzeitfähigkeit solcher Systeme. Darüber hinaus zeichnen sich Motion-Control-Systeme durch die Verknüpfung von Logikfunktionen und Technologiefunktionalitäten, wie z. B. Druck- und Temperaturregelung, zu einer Einheit aus. Für die Regelung von Präzisionsantrieben, z. B. in Werkzeugmaschinen, ist eine gleichzeitige Überwachung von Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung üblich und erfordert daher eine kaskadierte Regelkreisstruktur, die eine hohe Dynamik aufweist.

Generell wird bei Motion-Control-Anwendungen zwischen *Regelungen* und *Steuerungen* unterschieden.

Regelungen zeichnen sich durch die Rückführung der Regelgröße und den kontinuierlichen Vergleich dieser mit einer Führungsgröße aus. Dieses Prinzip ermöglicht es, bei geeigneter Reglerauslegung resultierende Regelabweichungen, die aus nicht vorhersagbaren Störgrößen innerhalb der Regelstrecke resultieren, zu minimieren. In Folge dessen ist diese Struktur insbesondere für Präzisionsanwendungen von Bedeutung. Die Realisierung wird heutzutage durch eine Vielzahl an frei konfigurierbaren Baugruppen, z. B. in Form von Servoantrieben, die eine Einheit aus Sensorik und Aktorik darstellen, unterstützt. Durch die Einführung von Feldbussen zur Anbindung der Rückführungen, ist man in der Lage, die Echtzeitfähigkeit der Systeme sicherzustellen. Der Aufbau einer konventionellen bewegungsgeregelten Achse mit Ist-Wert-Rückführung ist in Bild 10.42 dargestellt.

Im Gegensatz zu den Regelungen findet bei *Steuerungen* keine Rückführung der Regelgröße statt. Üblicherweise kommt dieses Prinzip daher lediglich für einfache Anwendungen, z. B. bei Schrittmotoren, zum Einsatz, die eine etwaige Regelabweichung durch den Einfluss von Störgrößen nicht kompensieren können. Durch die weite Verbreitung und den kostengünstigen Zugang zu Servomotoren spielt das Prinzip der reinen Steuerung in heutigen industriellen Applikationen meist eine untergeordnete Rolle.

Die innerhalb des Motion-Controllers ermittelte Differenz zwischen Soll- und Ist-Position wird zunächst in einen

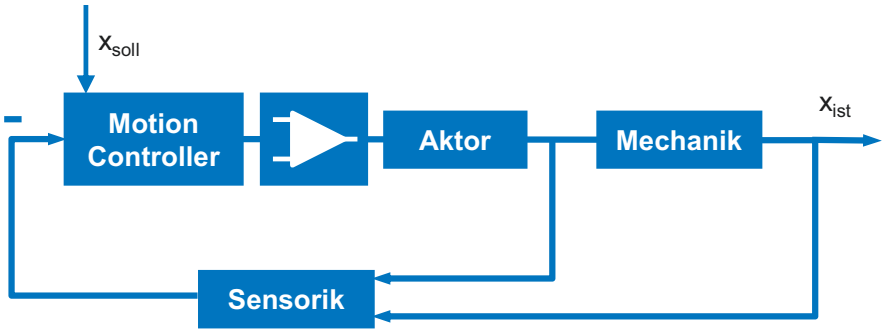


Bild 10.42 Aufbau eines konventionellen Motion-Control-Systems

der Relativbewegung äquivalenten Strom gewandelt und über einen Leistungsverstärker an einen Aktor übertragen. Ausgehend von dem anliegenden Strom überträgt der Aktor wiederum eine entsprechende Kraft auf die mechanischen Übertragungsglieder des Systems. Die resultierende Verlagerung wird daraufhin sensorisch erfasst und zum Motion-Controller zurückgeführt. Durch diese kontinuierliche Regelungsstrategie kann die verbleibende Regelabweichung minimiert werden. Insbesondere die hohen Anforderungen an die Übertragungsgeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Gliedern des Systems grenzen die Motion-Control-Systeme dabei gegenüber einfachen Regelsystemen ab.

10.5.2 Aufbau und Funktionsweise von MC-Systemen

Obwohl die in der IEC 61131 definierten Funktionsumfänge eine Grundlage zur Standardisierung von Motion-Control-Systemen darstellen, existieren unterschiedliche Grundarchitekturen, die sich durch applikationsspezifische Vor- und Nachteile auszeichnen. Im Folgenden werden daher die unterschiedlichen Formen der Systemarchitektur vorgestellt.

10.5.2.1 Systemarchitektur von MC-Systemen

Systeme mit einem zentralen Motion Controller, der ausschließlich die Regelung einer einzelnen Achse realisiert, dienen heutzutage lediglich der Verwendung in Applikationen, die eine Verarbeitungsgeschwindigkeit im Sub-Millisekundenbereich erfordern. Die hohe Verfügbarkeit an Rechenleistung aktueller Prozessoren sowie der mit der Verwendung zentraler Systeme einhergehende Flexibilitätsverlust bedingen, dass diese Form der Systemarchitektur nur noch in Hochgeschwindigkeitsanwendungen wie z. B. Verpackungsmaschinen zum Einsatz kommt, Bild 10.33 a [GEVA06].

Dezentral aufgebaute Systeme weisen demgegenüber durch die parallele Ansteuerung mehrerer Achsen eine deutlich höhere Flexibilität auf. Die Verknüpfung der einzelnen Achsen wird durch die Verwendung von echtzeitfähigen Feldbussystemen realisiert. Die Forderungen nach Synchronität solcher Systeme bedingen aufgrund der gesteigerten Komplexität erhöhte Aufwände bei Auslegung und Inbetriebnahme, die bei einer Konzeptionierung der Systemarchitektur zu berücksichtigen sind. Als Beispiel für dezentral aufgebaute Systeme können heutige CNC-Steuerungen mit digitalen Antriebsreglern aufgeführt werden, die ihrerseits sämtliche Reglerparameter steuerungsintern verwalten, Bild 10.43 b [GEVA06].

Eine weitere Möglichkeit bietet die Verwendung speicherprogrammierbarer Steuerungen in Kombination mit erweiterten Spezialmodulen. Wie bereits beschrieben ist die Rechenleistung konventioneller SPS, nicht ausreichend, um umfangreiche Interpolationsaufgaben durchzuführen. Durch den Einsatz geeigneter Erweiterungen, wie z. B. der Simotion C240, kann dieses Problem umgangen werden. Die erhöhten Kosten sowie eine begrenzte Kompatibilität zwischen herstellerspezifischen Komponenten stellen ihrerseits deutliche Nachteile dieser Architektur dar, Bild 10.43 c [GEVA06].

Des Weiteren existieren echtzeitfähige PC-basierte Lösungen, die sich durch vergleichsweise hohe Rechenleistungen und Speicherkapazitäten auszeichnen. Um durch die dezentrale Anordnung keinen Nachteil gegenüber konventionellen Systemen zu generieren, ist allerdings die Verwendung eines echtzeitfähigen Bussystems zwingend erforderlich, Bild 10.43 d [GEVA06].

In Bild 10.43 sind die verschiedenen Systemarchitekturen zusammenfassend dargestellt.

10.5.2.2 Feldbussysteme für Motion Control

Wie zuvor beschrieben können die Vorteile einer dezentralen Struktur nur unter Verwendung eines echtzeitfähigen Feldbusses genutzt werden. Da konventionelle Feldbussysteme wie z. B. PROFIBUS oder CANopen diese Anforderung im Allgemeinen nicht erfüllen, haben sich für den Antriebsbereich Spezialsysteme etabliert. Insbesondere die Verwendung von Ethernet-basierten Bussystemen bietet eine kostengünstige Möglichkeit zur Realisierung einer echtzeitfähigen Verbindung. Die verschiedenen Ethernet-Feldbussysteme unterscheiden sich wiederum herstellerabhängig in ihren Funktionsprinzipien. Deshalb muss bei der Konzeptionierung eines Motion-Control-Systems die Kompatibilität einzelner Komponenten gesondert betrachtet werden. EtherCAT, SERCOS III, PROFINET, Ethernet

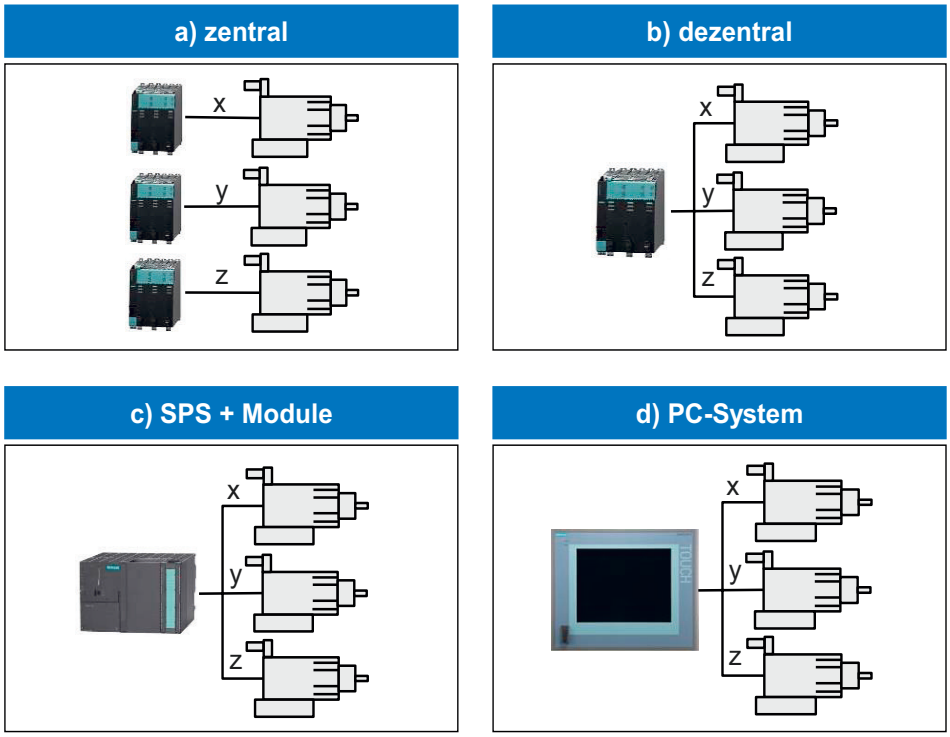


Bild 10.43 Unterschiedliche Systemarchitekturen für MC-Systeme. Nach SIEMENS

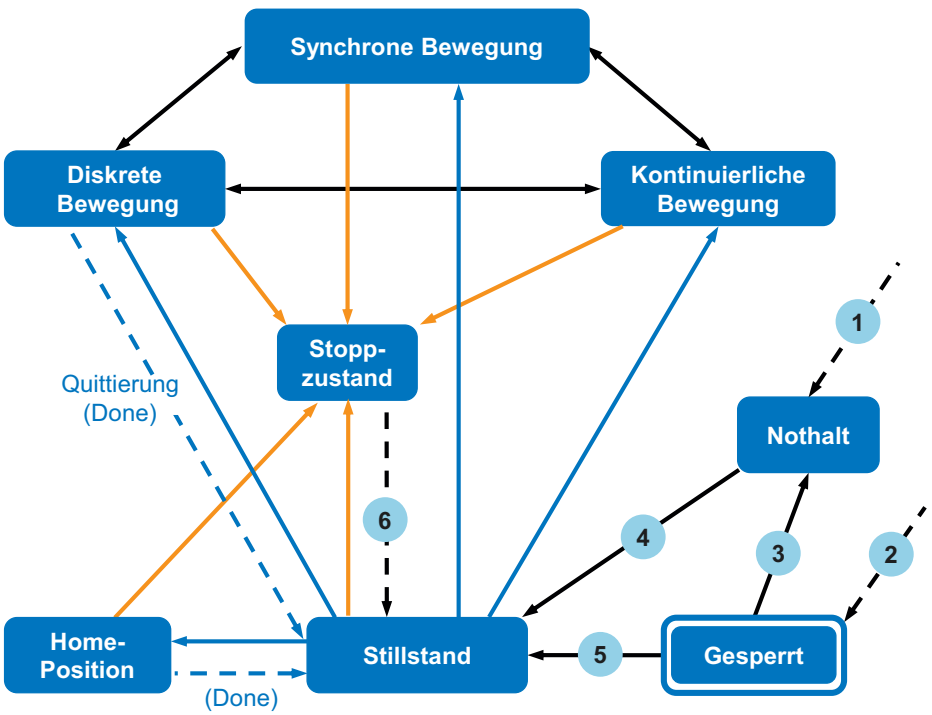


Bild 10.44 Definierte Bewegungszustände des PLCopen Motion Control Standards. Nach PLCopen

1) Ein Fehler ist in einem beliebigen Zustand aufgetreten
2) Die Freigabe wurde in einem beliebigen Zustand weggenommen
3) Freigabe wurde bei einem anliegenden Achsfehler gegeben
4) Reset wurde bei vorhandener Leistung und fehlerfreier Achse bestätigt
5) Freigabe wurde bei vorhandener Leistung und fehlerfreier Achse gegeben
6) Achse wurde erfolgreich angehalten und wechselt in den Stillstand

Powerlink und VARAN stellen dabei die am weitesten verbreiteten Systemprofile dar.

Neben den Ethernet-basierten Technologien sind darüber hinaus auch Multimedia-Busse wie z. B. IEEE 1394 (Firewire) geeignet, um die Systemkommunikation aufzubauen [GEVA06].

10.5.3 Programmierung

Nachdem zuvor die Grundlagen der Anwendung und Systemarchitektur von Motion-Control-Systemen beschrieben worden sind, wird im Folgenden auf die Programmierung und Projektierung der Systeme eingegangen.

IEC 61131

Ein Großteil der in der IEC 61131-3 festgelegten Standards zur Programmierung von Steuerungen finden auch in der Implementierung von Motion-Control-Systemen Anwendung (vgl. ► Kap. 10.2 und 10.3). Die im Rahmen der herstellergebundenen Projektierungsumgebung bereitgestellten Funktionsbausteine weisen allerdings meist plattformspezifische Eigenschaften auf. Darüber hinaus werden innerhalb der Projektierungssoftware häufig weitere Sprachen zur Programmierung angeboten, die eine intuitive Bedienung ermöglichen sollen.

PLCopen

Der Funktionsbaukasten von PLCopen stellt demgegenüber den Versuch der Etablierung einer vollständig standardisierten Funktionsbibliothek dar, die herstellerunabhängig verwendet werden kann. Hierfür wurden zunächst allgemeine Antriebszustände definiert, die als Grundlage für komplexe Bewegungs- bzw. Steuerungsprofile verwendet werden können, ◘ Bild 10.44. Im Folgenden wird das Zustandsdiagramm kurz erläutert.

Der Zustand „Gesperrt“ entspricht dem Initialzustand der Achse. Durch Freigabe und Ausführen des Reset-Befehls kann dieser Zustand verlassen werden. Liegt bei Ausführung des Reset-Befehls ein Achsfehler vor, geht das System in den „Nothalt“, vgl. Ziffer 3. Der „Nothalt“ lässt sich von jedem beliebigen Zustand erreichen, vgl. Ziffer 1, und kann nur bei fehlerfreier Achse bzw. einer Wegnahme der Freigabe verlassen werden, vgl. Ziffer 2 bzw. 4. Wechselt das System erfolgreich in den „Stillstand“, vgl. Ziffer 4, 5 bzw. 6, können von hier aus sämtliche Bewegungszustände erreicht und zwischen diesen gewechselt werden. Aus dem Stillstand kann auch die Routine zum Anfahren der „Home-Position“ erreicht werden. Ebenso wie bei einer diskreten Bewegung wird das Erreichen der Soll-Position bestätigt (d. h. quittiert) und wieder in den Stillstand gewechselt. Alle Bewegungszustände können jederzeit mit einem Stopp-Befehl in den Stopp-Zustand überführt werden (gelbe Pfeile). In diesem Zustand wird die Achse kontrolliert angehalten und anschließend in den Stillstand gewechselt, vgl. Ziffer 6.

Die im ◘ Bild 10.44 bezifferten Zustandsübergänge können wie folgt beschrieben werden [PARK13]:

1. Ein Fehler ist in einem beliebigen Zustand aufgetreten.
2. Die Freigabe wurde in einem beliebigen Zustand weggenommen.
3. Freigabe wurde bei einem anliegenden Achsfehler gegeben.

◘ **Bild 10.45** Projektierungssoftware SIEMENS Simotion Scout. Nach SIEMENS

SIMOTION SCOUT		SCOUT Optionspakete
Projektverwaltung	**Programmieren**	**Drive Control Chart (DCC)**
■ Workbench ■ Verwaltung aller Geräte (Steuerung, Antriebe, …) ■ Integrierte Bibliotheksfunktionen	■ Kontaktplan (KOP) ■ Funktionsplan (FUP) ■ Structured Text (ST) ■ Motion Control Chart (MCC)	■ Grafische Projektierung und Erweiterung der Gerätefunktionalität ■ Darstellung regelungstechnischer Strukturen
Projektieren/ Parametrieren	**Test und Inbetriebnahme**	**CamTool**
■ Hardware und Netzwerkkonfiguration ■ Erstellung technologischer Objekte ■ Erstellung von Kurvenscheiben (Basis)	■ Diagnose für Test und Inbetriebnahme (Trace) Achssteuertafel ■ Antriebs- und Inbetriebnahmewerkzeug STARTER	■ Grafischer Kurvenscheibeneditor ■ Erstellung und Optimierung von Kurvenscheiben

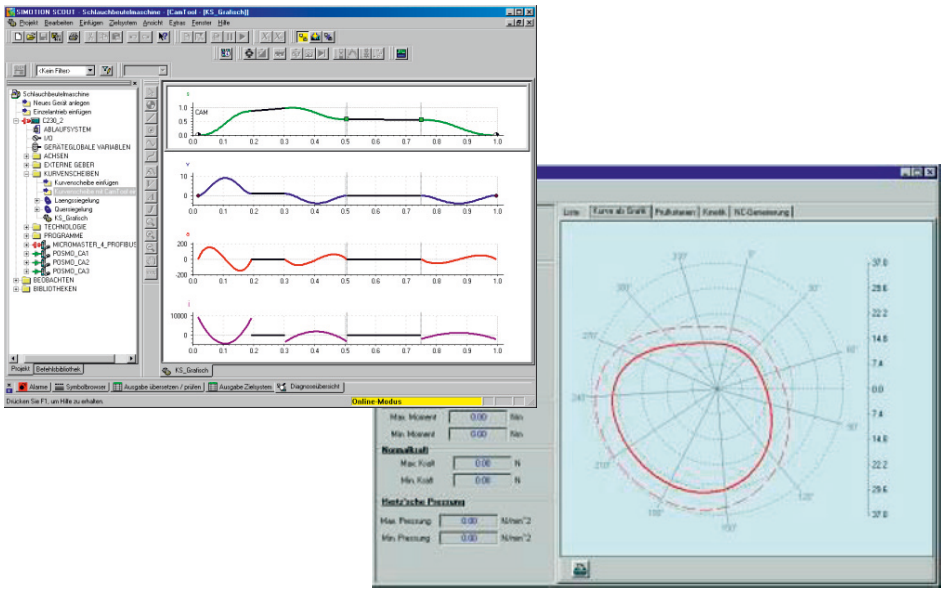


Bild 10.46 Elektronische Kurvenscheibe in SIEMENS Simotion Scout. Quelle: SIEMENS

4. Reset wurde bei vorhandener Leistung und fehlerfreier Achse bestätigt.
5. Freigabe wurde bei vorhandener Leistung und fehlerfreier Achse gegeben.
6. Achse wurde erfolgreich angehalten und wechselt in den Stillstand.

Ausgehend von den Bewegungs- bzw. Steuerungsprofilen sind in der PLCopen-Motion-Control-Spezifikation eine große Zahl an Bausteinen und Funktionen definiert, die durch die einheitliche Struktur zu einer Vielzahl an Produkten unterschiedlicher Herstellern kompatibel sind.

10.5.3.1 Projektierung von Motion-Control-Systemen

Bei der in Bild 10.45 dargestellten Projektierungssoftware SIEMENS Simotion Scout können sowohl die aus der IEC 61131-3 bekannten Sprachen ST, KOP und FUP als auch die Motion Control Chart zur Programmierung verwendet werden.

Neben der klassischen Programmierung ermöglichen die Projektierungsumgebungen häufig eine Funktionsüberprüfung des Systems und beinhalten erweiterte Softwarewerkzeuge zur Inbetriebnahme und Systemdiagnose. Darüber hinaus existieren meist grafisch visualisierte Zusatzanwendungen, wie z. B. die elektronische Kurvenscheibe, die es dem Anwender ermöglichen, auf bekannte Strukturen zurückzugreifen und bestehende Motion-Control-Lösungen in die neue Systemumgebung zu integrieren, Bild 10.46, vgl. ► Kap. 8.4.

Abkürzungsverzeichnis

AS	Ablaufsprache
AWL	Anweisungsliste
BDE	Betriebsdatenerfassung
CPU	Central Processing Unit
DB	Datenbaustein
DIN	DIN-Norm
DIN EN	DIN EN-Norm
EDM	Engineering Data Management
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FB	Funktionsbaustein
FC	Funktion
FUP	Funktionsplan
HiL	Hardware-in-the-Loop
HMC	Human Machine Communication
HMI	Human Machine Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
KOP	Kontaktplan
LED	Leuchtdiode
MC	Motion Control
MTTF	Mean Time To Failure
NC	numerische Steuerung
OB	Organisationsbaustein
PA	Prozesssabbild
PL	Performance-Level
PLC	Programmable Logic Controller → vgl. SPS
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
SFC	Sequential Function Chart

SiL	Software-in-the-Loop
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
ST	Strukturierter Text
VDI	Verein deutscher Ingenieure
VPS	Verbindungsprogrammierte Steuerungen

Literaturverzeichnis

[BECK14] Beckhoff: SPS und Motion Control auf dem PC. Verl, 2014. Firmenschrift

[BIEL90] Bielefeld, H.: Speicherprogrammierbare Steuerungen in der Prozeßleittechnik. Berlin: VDE-Verlag, 1990

[BRUG99] Bruggink, B.: Programming PLCs using Sequential Function Chart. Diss. Universität Nijmegen, 1999

[DIN08] Norm DIN EN ISO 13849-1 (2008). Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze

[DIN14a] Norm EN 60204-1, VDE 0113-1 (2014). Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

[DIN14b] Norm DIN EN 60848 (2014). GRAFCET – Spezifikationssprache für Funktionspläne der Ablaufsteuerung

[DIN14c] Norm DIN EN 61131-3 (2014). Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 3: Programmiersprachen

[DIN90] Norm DIN VDE 0801 (1990). Grundsätze für Rechner in Systemen mit Sicherheitsaufgaben

[DIN94] Norm DIN 19226 (1994). Begriffe zum Verhalten von Schaltsystemen

[EBER12] Eberhardt, O.: Die EU-Maschinenrichtlinie. Renningen: expert, 2012

[EURO06] Europäische Union: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union, 2006

[FREN87] Frentzen, B.: Entwurf redundanter Steuerungssysteme – Ein Beitrag zur Steigerung der Sicherheit programmierbarer Steuerungen. Diss. RWTH Aachen, 1987

[GEVA06] Gevatter, H.-J.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion. (Reihe: VDI). 2., vollst. bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006

[HERF10] Herfs, W. J.: Modellbasierte Software in the Loop Simulation von Werkzeugmaschinen. Diss. RWTH Aachen, 2010

[HÖLS84] Hölscher, H.; Rader, J.: Mikrocomputer in der Sicherheitstechnik. Köln: Verlag TüV Rheinland, 1984

[INTE15] Intel: Collaboration Accelerates Collaboration Accelerates the Internet of Things and Industry 4.0. USA, 2015. Case Study Beckhoff, Firmenschrift

[JOHN09] John, K.-H.; Tiegelkamp, M.: SPS-Programmierung mit IEC 61131-3. Konzepte und Programmiersprachen, Anforderungen an Programmiersysteme, Entscheidungshilfen. (Reihe: VDI). 4., neubearbeitete. Aufl. Dordrecht: Springer, 2009

[KEGE14] Kegel, G.: Pressekonferenz des ZVEI-Fachverbands Automation zur Hannover Messe 2014. Hannover

[KEGE16] Kegel, G.: Pressekonferenz des ZVEI-Fachverbands Automation zur Hannover Messe 2016. Hannover

[KEGE19] Kegel, G.: Pressekonferenz des ZVEI-Fachverbands Automation zur Hannover Messe 2019. Hannover

[KOCH93] Koch, T.: Zustimmungsschalter. (Reihe: Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb 681). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 1993

[LEIS87] Leist, K.: Sicherheitsgerichtete speicherprogrammierbare Steuerungen. In: Automatisierungstechnische Praxis, 1987, Nr. 6, S. 267–275

[MITT91] Mittmann, R.: International standardisierte SPS-Programmierung nach IEC 1131 zum Vorteil für Anwender und Hersteller. (Reihe: VDI Berichte). Düsseldorf: Springer, 1991

[OEST86] Oestreicher, T.: Rechnergestützte Projektierung von Steuerungssystemen. Diss. TH Karlsruhe, 1986

[PARK13] Parker: PLCOpen State Machine. URL: https://www.parkermotion.com/dmxreadyv2/faqsmanager/faqsmanager.asp?question=plcopen-state-machine. [Stand: 07.06.2017]

[PILZ13] Pilz GmbH: Das Sicherheitskompendium. Ostfildern, 2013. Firmenschrift

[PLAG90] Plagemann, B.: Speicherprogrammierbare Steuerungen. Heidelberg: Hüthig Verlag, 1990

[SEIF92] Seifert, H.-J.: Modellgestützte Diagnose komplexer Produktionssysteme – Ein Beitrag zur Erhöhung der Verfügbarkeit kapitalintensiver Fertigungsanlagen. Diss. Univ. Bochum, 1992

[SIEM10] Siemens AG: Simatic. Nürnberg, 2010. Firmenschrift

[SIEM93] Siemens AG: STEP 5 Handbuch. Nürnberg, 1993. Firmenschrift

[SOSS89] Sossenheimer, K. H.: Entwickeln von Instrumentarien zur rationellen Planung und Steuerung der Inbetriebnahme komplexer Produkte des Werkzeugmaschinenbaus. Diss. RWTH Aachen, 1989

[TRÖS11] Tröster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure. (Reihe: Oldenbourg Lehrbücher für Ingenieure). 3., überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2011

[VDI91] Richtlinie VDI 2854 (1991). Sicherheitstechnische Anforderungen an automatisierte Fertigungssysteme

[WECK90] Weck, M.; et al.: Wege zur Verkürzung der Inbetriebnahme- und Stillstandszeiten komplexer Produktionsanlagen. In: Weck, M.; Eversheim, W.; König, W.; Pfeifer, T. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: VDI-Verlag, 1990

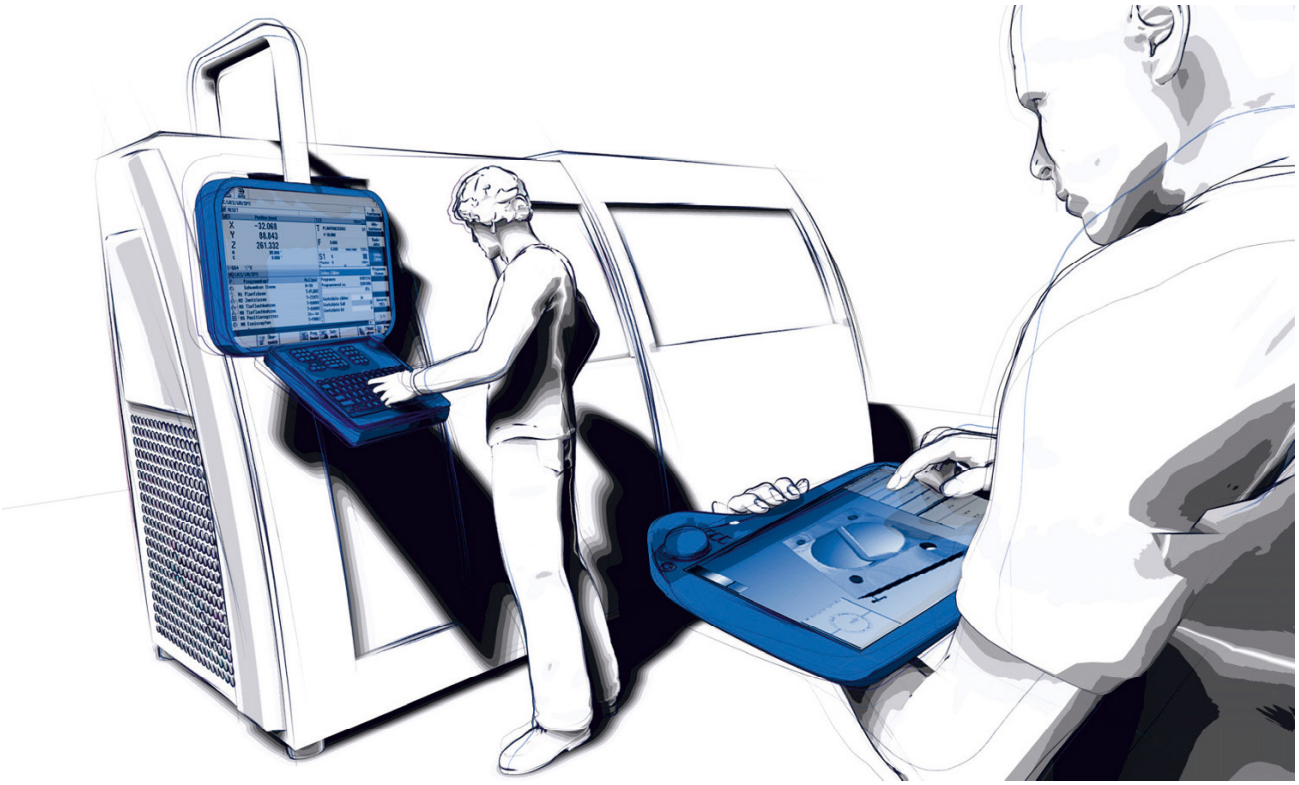
[WEIß16] Weiß, T.; Habermann, M.: STEP7-Workbook. Einführung in die STEP7-Programmiersprache : mit TIA Portal, STEP7 V5.x und WinSPS-S7. 4. Aufl. Bretten: MHJ-Software GmbH & Co. KG, 2016

[WELL14] Wellenreuther, G.; Zastrow, D.: Automatisieren mit SPS – Theorie und Praxis. (Reihe: Studium). 5. korrigierte und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2014

[ZAST95] Zastrow, D.; Wellenreuther, G.: Steuerungstechnik mit SPS. Wiesbaden: Vieweg, 1995

[ZVEI19] ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.: Elektroindustrie in Zahlen. Frankfurt am Main, 2019

Kapitel 11



Numerische Steuerungen

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Dr.-Ing. Alexander Epple, Christian Fimmers M. Sc., Dipl.-Inform. Michael Königs und Marian Wiesch M. Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better



Komplexe Aufgaben leicht gemacht

Eine CNC-Steuerung muss immer etwas intelligenter sein als die Herausforderung, der sie gegenüber steht. Dabei hilft es natürlich, den schnellsten dedizierten Prozessor der Welt eingebaut zu haben, sodass Präzision und Geschwindigkeit gleichermaßen davon profitieren. Überzeugen Sie sich selbst, wie viel mehr Sie aus Werkzeugmaschinen herausholen können – mit den vorausdenkenden CNC-Steuerungen von Mitsubishi Electric.

www.Mitsubishi-CNC.de

Numerische Steuerung

11.1 Geschichtliche Entwicklung numerischer Steuerungen – 414

11.2 Aufbau und Funktionsbeschreibung numerischer Steuerungen – 415

11.2.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung – 415

11.2.2 Hardware und Schnittstellen einer NC-Steuerung – 417

11.2.3 Software einer NC-Steuerung – 422

11.2.4 Funktionsweise einer NC-Steuerung – 423

11.2.5 Funktionsumfang moderner NC-Steuerungen – 425

11.2.6 Offenheit von Steuerungssystemen – 431

11.3 Werkstückprogrammierung in der NC-Fertigung – 438

11.3.1 Aufbau eines satzbasierten NC-Programms – 439

11.3.2 Aufbau eines objektorientierten NC-Programms – 441

11.3.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte – 442

11.4 NC-Programmierverfahren – 445

11.4.1 Manuelle NC-Programmierverfahren – 446

11.4.2 Maschinelle NC-Programmierverfahren – 455

11.4.3 Digitalisierung von Werkstückgeometrien zur NC-Datengenerierung – 484

11.5 Benutzerschnittstellen an Werkzeugmaschinen – 497

11.5.1 Bedienfelder an Werkzeugmaschinen – 497

11.5.2 Manuelle Prozessführung – 499

11.5.3 Benutzerorientierte Darstellung prozessund systembezogener Kenngrößen – 504

Abkürzungsverzeichnis – 508

Formelzeichenverzeichnis – 508

Literaturverzeichnis – 509

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_11

Eine wesentlich höhere Flexibilität als die im ► Kap. 10 behandelten Ablaufsteuerungen bieten sogenannte numerische Steuerungen (engl.: numerical control, kurz: NC). Für ein Werkstück werden Art und Reihenfolge der Fertigungsschritte in einem NC-Programm festgelegt, das die Steuerinformationen in Form von alphanumerischen Zeichen enthält. Global betrachtet zählt die NC-Steuerung somit zur Familie der Ablaufsteuerungen, wobei die einzelnen Steuerschritte durch NC-Sätze (als alphanumerische Zeichen) vorgegeben werden. In modernen numerischen Steuerungen müssen nicht nur logische Verknüpfungen, sondern auch komplexe Rechenoperationen durchgeführt werden [KAMP70; KIEF99; NN99; SAUT87; SIMO71; SPUR91; SPUR94]. Die Realisierung des Kernstücks heutiger, moderner NC-Steuerungen erfolgt daher in Mikroprozessortechnik.

11.1 Geschichtliche Entwicklung numerischer Steuerungen

Erste Konzepte für eine numerische Werkzeugmaschinensteuerung erstellte Parsons im Jahr 1949. Beauftragt durch die U.S. Air Force entwickelte er eine Rechenmaschine, um eine automatische Bearbeitung der immer komplizierter werdenden Flugzeugintegralteile zu ermöglichen [SPUR93b]. Mit Hilfe von Parsons' Ideen wurde 1952 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) die erste numerische Steuerung für Werkzeugmaschinen auf der Basis von Elektronenröhren und elektromechanischen Relais entwickelt. Mit Hilfe der Dateneingabe über binär codierte Lochstreifen konnte eine Fräsmaschine eine simultane Bewegung in drei Achsen ausführen [KIEF99].

Ab 1960 wurden die teuren und empfindlichen Relais- und Röhrensteuerungen, die bis zu diesem Zeitpunkt jedoch keine Verbreitung finden konnten, durch NCs in Transistortechnik ersetzt. Diese Ausführungen numerischer Steuerungen (bis etwa 1975) waren vollständig mit festverdrahteten, diskreten Halbleiterbauelementen der digitalen Informationsverarbeitung (vgl. ► Kap. 10.2) aufgebaut und wurden als verbindungsprogrammierte NC-Steuerungen bezeichnet. Für jede Anwendung (Drehen, Fräsen usw.) mussten entsprechende, zugeschnittene Lösungen entwickelt werden. Änderungen und Erweiterungen der Steuerungsfunktionen waren ausschließlich mit aufwendiger Modifikation der Steuerungshardware möglich [NN99].

Steuerungen für einfache Bearbeitungsaufgaben wurden teilweise auch manuell mit codierten Steckern über ein Programmierfeld programmiert. Ähnlich einem Kreuzschienenverteiler wurden je Achse numerisch die Position und die Vorschubgeschwindigkeit sowie die Maschinenfunktionen eingegeben.

Änderungen von Programmteilen mussten durch Umstecken der Außenverdrahtung erfolgen (vgl. ► Kap. 10.3.2). Die Bearbeitungsaufgabe ließ sich archivieren, indem eine Schablone in Form einer gelochten Plastikfolie vor dem Einfügen der Stecker auf das Datenmodulfeld gelegt wurde, die nach der Programmierung mit den Steckern abgezogen und aufbewahrt werden konnte.

Mit zunehmender Etablierung numerischer Steuerungen stiegen die anwenderseitigen Anforderungen an Verfügbarkeit, Flexibilität, Wartungsfreundlichkeit, Funktionsumfang und Bedienbarkeit der Steuerungen sowie an ihre einfache Anpassbarkeit an die jeweilige Maschinenart. Diese Anforderungen konnten von festverdrahteten Steuerungen nur mit großem Aufwand erfüllt werden. Mit der Entwicklung hochintegrierter elektronischer Bauelemente (IC-Technik) bot sich ab 1968 eine einfachere und wirtschaftlichere Lösung zur Realisierung solch komplexer Steuerungen an. Seit 1972 werden als zentrales Bauelement ein oder mehrere Rechner verwendet (zunächst bis etwa 1977 Minicomputer, danach zunehmend Mikrocomputer). Somit entstand die sogenannte CNC-Steuerung (Computerised Numerical Control).

Die Konzeption der NC-Steuerungen auf Rechnerbasis besteht in der Produktion großer Stückzahlen von einheitlicher und zuverlässiger Computerhardware. Durch Implementierung unterschiedlicher Systemprogramme kann diese dann sowohl für Fertigungsaufgaben als auch an die spezielle Maschine angepasst werden. So kann die Steuerungssoftware nachträglich noch mit zusätzliche Funktionen, die dem Anwender optional angeboten werden, erweitert werden. Dabei sind keine wesentlichen Änderungen der Hardware erforderlich. Bis heute ist die Bedeutung der numerischen Steuerung für Werkzeugmaschinen aufgrund der zunehmenden Funktionalität stetig angestiegen. In ◘ Bild 11.1 sind heutige Anforderungen an die numerische Steuerung innerhalb einer Werkzeugmaschine dargestellt.

Seit Ende der 1970er Jahre enthalten alle NC-Steuerungen Mikroprozessoren. Der Begriff „CNC-Steuerung" war in der Übergangszeit sinnvoll, um zwischen festverdrahteten NC-Steuerung und Rechnersteuerung zu unterscheiden. Heute jedoch sollte die Bezeichnung „NC-Steuerung" anstelle von CNC-Steuerung durchgängig verwendet werden.

Die Wettbewerbsfähigkeit von Werkzeugmaschinenherstellern und -anwendern wird in hohem Maße von Leistungsfähigkeit und Preis der eingesetzten Steuerung bestimmt. Gerade auf dem deshalb so entscheidenden Markt der Steuerungstechnik drohten jedoch Anfang der 1990er Jahre die europäischen Hersteller den Anschluss zu verlieren. Japanische Produkte beherrschten insbesondere bei NC-Steuerungen sowohl im Hinblick auf die Technologie als auch auf die Stückzahlen den Weltmarkt. Seitdem hat sich der Markt der zeitweise über 60 europäischen Steuerungshersteller, welche auch überwiegend auf dem europäischen Markt vertreten waren, erheblich konsolidiert. Nach zahlreichen Übernahmen und Zusammenschlüssen sind im Jahre



Bild 11.1 Anforderungen an die numerische Steuerung innerhalb der Werkzeugmaschine. Nach [DIN96]

2015 noch wenige namhafte europäische Hersteller mit numerischen Steuerungen auf dem Weltmarkt vertreten. Darüber hinaus existieren einige kleinere Unternehmen mit eher regionaler Bedeutung.

Von der rasanten Entwicklung der Personal-Computer für den Büro- und Heimanwendermarkt profitierte auch die Steuerungstechnik. Mit kommerziell verfügbarer PC-basierter Hardware und Software konnten Steuerungshersteller ihre Investitionen zur Einführung neuer Produkte erheblich senken. Dadurch ist die Bedeutung der Software im Vergleich zur Hardware erheblich gestiegen. Über die Rolle des reinen Systemanbieters hinaus nutzen Steuerungshersteller vermehrt ihr vorhandenes Know-how, um kundenindividuelle Dienstleistungen anzubieten.

Hardware- und Softwarestandards, standardisierte Schnittstellen sowie offene Steuerungssysteme, die flexibel erweiterbar sind, werden von Anwendern immer stärker gefordert. Insbesondere die Integrationsfähigkeit einer Steuerung in Netzwerke und übergeordnete Systeme hat zur Jahrtausendwende enorme Bedeutung erlangt.

11.2 Aufbau und Funktionsbeschreibung numerischer Steuerungen

11.2.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung

Die wesentliche Aufgabe der NC ist die Steuerung der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück. Weg- und Geschwindigkeitsanweisungen werden in Form eines NC-Programms (Teileprogramm) festgelegt, welches die Steuerinformationen in Form alphanumerischer Zeichen enthält [DIN96].

Die Erstellung eines NC-Programms kann je nach Organisationsform auf zwei unterschiedliche Arten stattfinden. Im ersten Fall werden die NC-Programme in der Arbeitsvorbereitung mit Hilfe maschineller NC-Programmiersysteme erstellt und in die Steuerung übertragen (vgl. ▶ Kap. 11.4.2). Bei dieser Lösung gibt man die Daten des NC-Programms über USB-Stick oder Netzwerkanbindung (Distributed Numerical Control (DNC), vgl. ▶ Kap. 14.1.2.2) in die Steuerung ein. Zusätzlich können bereits eingelesene Programme über das Bedienfeld nachträglich verändert bzw. korrigiert werden.

Der zweite Weg zur Eingabe einfacher Bearbeitungsaufgaben ist die Programmerstellung bzw. -überarbeitung durch den Maschinenbenutzer an der Steuerung selbst. Hier bieten grafisch unterstützte Verfahren wie WOP (Werkstattorientierte Programmierung, vgl. ▶ Kap. 11.4.2.4) die Möglichkeit zur komfortablen Programmeingabe sowohl in der Arbeitsvorbereitung als auch vor Ort an der Maschine.

Die eingegebenen Informationen des NC-Programms und die zu verarbeitenden Korrekturen werden in der Steuerung decodiert (*Interpreter*) und nach *geometrischen* und *technologischen Daten* sowie *Schaltfunktionen* getrennt weiterverarbeitet, Bild 11.2. Geometrische Daten sind alle Angaben über die zu verfahrenden Werkzeug- und Werkstückwege, aus denen schließlich die gewünschte Geometrie des Werkstücks entsteht. Technologische Informationen sind z. B. Funktionen zur Werkzeugauswahl sowie zur Auswahl der Spindeldrehzahl oder der Schnittgeschwindigkeit.

Die Schaltfunktionen gelangen als Schaltbefehle in die sogenannte *Anpasssteuerung* der Werkzeugmaschine, in der sie mit den von der Werkzeugmaschine kommenden Rückmeldungen verknüpft und in Steuerbefehle für die zu schaltenden Aggregate umgesetzt werden. Der größte Teil der An-

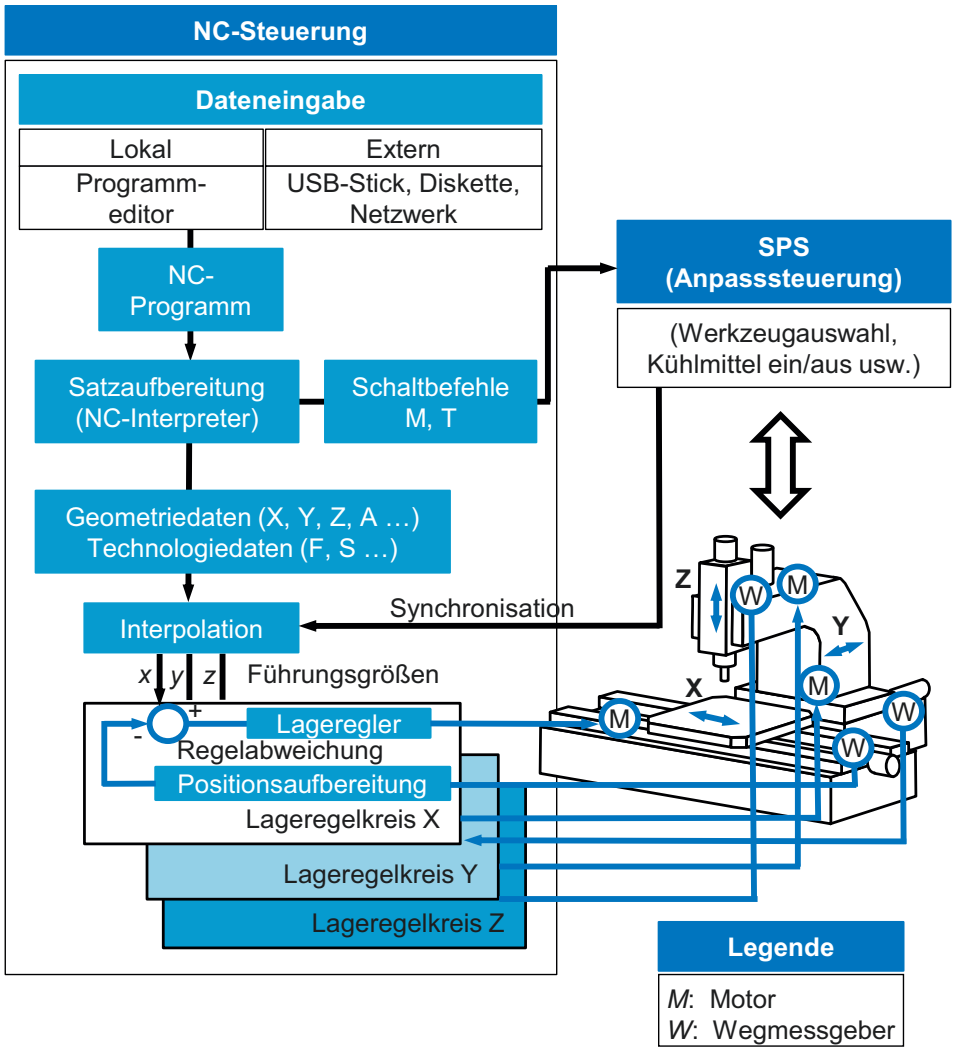


Bild 11.2 Struktur einer numerischen Steuerung

passsteuerung wird heutzutage von einer SPS realisiert (speicherprogrammierbare Steuerung, vgl. ▶ Kap. 10.3). Die Verknüpfungen bestehen zum großen Teil aus Verriegelungs- bzw. Sicherheitsschaltungen, damit widersprüchliche und den Maschinenbenutzer sowie die Maschine gefährdende Aktionen (z. B. „Vorschub ein" bevor „Spindel ein" usw.) nicht ausgelöst werden können. Mit Hilfe der Anpasssteuerung können maschinenunabhängige Funktionen der NC-Steuerung auf maschinenspezifische Geräte abgebbildet (angepasst) werden.

Ein *Interpolator* berechnet für einen vorgegebenen Wegabschnitt die zu koordinierende Bewegungsfolge in den Achsen nach Richtung und Geschwindigkeit und erzeugt somit die *Führungsgrößen* für die Antriebe der Achsen [SAUT87]. Durch Überlagerung der einzelnen Achsbewegungen entsteht dann eine Werkzeugbewegung entlang der programmierten Werkstückkontur (vgl. ▶ Kap. 12.1).

Die Programmierung der zu erzeugenden Kontur geschieht durch die Angabe von Konturendpunktkoordinaten und der Art der Verbindung zwischen dem jeweiligem Anfangs- und Endpunkt als Wegbedingung (z. B. Gerade, Kreisbogen). Je nach Verlauf der Bewegung sind Steuerungen unterschiedlicher Komplexität für deren Realisierung geeignet. Man unterscheidet diesbezüglich zwischen Punkt-, Strecken- und Bahnsteuerungen [DIN96; [KAMP70]. Punkt- und Streckensteuerungen sind als eigenständige Steuerungen heute nicht mehr im Einsatz. Sie werden teilweise nur noch als Module innerhalb von SPS-Steuerungen verwendet.

Punktsteuerungen werden für einfache Positioniervorgänge eingesetzt, wie z. B. bei der Bohrbearbeitung oder beim Punktschweißen. Bei Punktsteuerungen darf das Werkzeug während des Positioniervorgangs nicht im Eingriff sein, da der programmierte Endpunkt der Werkzeugbewegung auf einem nicht definierten Weg angefahren wird.

Bei *Streckensteuerungen* wird der Endpunkt einer Bearbeitungsstrecke auf einem geraden Weg angefahren, wobei das Werkzeug beim Verfahren im Eingriff sein kann. Mit einfachen Streckensteuerungen kann nur auf achsparallelen, mit erweiterten Streckensteuerungen auf beliebigen Geraden

verfahren werden. Streckensteuerungen eignen sich z. B. für einfache Dreh- und Fräsbearbeitungen oder zur Steuerung von Transferstraßen.

Werkzeug- und Tischbewegungen zur Erzeugung beliebiger Konturen sind nur mit *Bahnsteuerungen* möglich. Jede moderne NC-Steuerung ist heute mit einem Bahninterpolator ausgerüstet und somit eine Bahnsteuerung. In der Regel können diese Bahnsteuerungen Geraden und Kreisbögen, teilweise sogar Spline-Segmente ausführen. Die Bewegungen in den einzelnen Achsen stehen in einer strengen funktionalen Abhängigkeit zueinander. Bahnsteuerungen werden im Werkzeugmaschinenbau für Dreh-, Fräs- und Schleifmaschinen, Laserstrahl- und Brennschneidanlagen, Nibbelmaschinen, Senk- und Drahterosionsmaschinen, Wasserstrahlschneidanlagen, Stereolithografiemaschinen u. a. m. eingesetzt.

Bevor die Achssollwerte von der Steuerung an die Antriebe ausgegeben werden, müssen sie an die aktuelle Werkstück- und Werkzeugposition angepasst werden. So erfolgt beispielsweise die NC-Programmierung unabhängig von der aktuellen Spannposition des Rohteils auf dem Tisch einer Fräsmaschine. Die aktuelle Lage des Werkstücknullpunktes zum Maschinennullpunkt muss daher zusätzlich eingegeben und über eine Koordinatentransformation von der Steuerung berücksichtigt werden (vgl. ► Kap. 12.2).

Ähnliche Korrekturberechnungen werden durchgeführt, wenn Länge und Durchmesser des Werkzeugs von den programmierten Daten abweichen. Programmiert wird die gewünschte Werkstückkontur losgelöst von der aktuellen Werkzeuggeometrie, d. h. unabhängig von Radius- und Längen-Offset. Die aktuellen Werkzeuggeometriedaten werden erst vor der Bearbeitung manuell oder via DNC in die Steuerung übertragen. Die Steuerung berechnet dann die Werkzeugmittelpunktbahn und gibt diese im Interpolationstakt an die Achsregler aus.

11.2.2 Hardware und Schnittstellen einer NC-Steuerung

Steigende Anforderungen an numerische Steuerungen hinsichtlich Automatisierung und Präzision des Prozesses führten anfangs zu einer Aufteilung der Steuerungsaufgaben auf verschiedene Steuerungen bzw. Baugruppen, da zunächst die Leistungsfähigkeit einzelner Prozessoren nicht ausreichte. Die Entwicklung auf dem Mikroprozessorsektor unterstützte diese Vorgehensweise, indem vermehrt Prozessoren mit Spezialeigenschaften (z. B. numerische Co-Prozessoren oder Mehrprozessorsysteme) auf den Markt kamen [SOSO90].

Diese Situation hat sich jedoch – bedingt durch die rasante Entwicklung der Halbleitertechnik – insbesondere im Bereich der Personalcomputer grundlegend gewandelt. Standardkomponenten aus der PC-Welt sind heute leistungsfähig und aufgrund der hohen Stückzahlen besonders kostengünstig. Seit Mitte der 1990er Jahre werden sie verstärkt auch in numerischen Steuerungen eingesetzt.

Die Hardware wird aufgrund der speziellen Anforderungen in der Steuerungstechnik in der Regel vom Steuerungs-

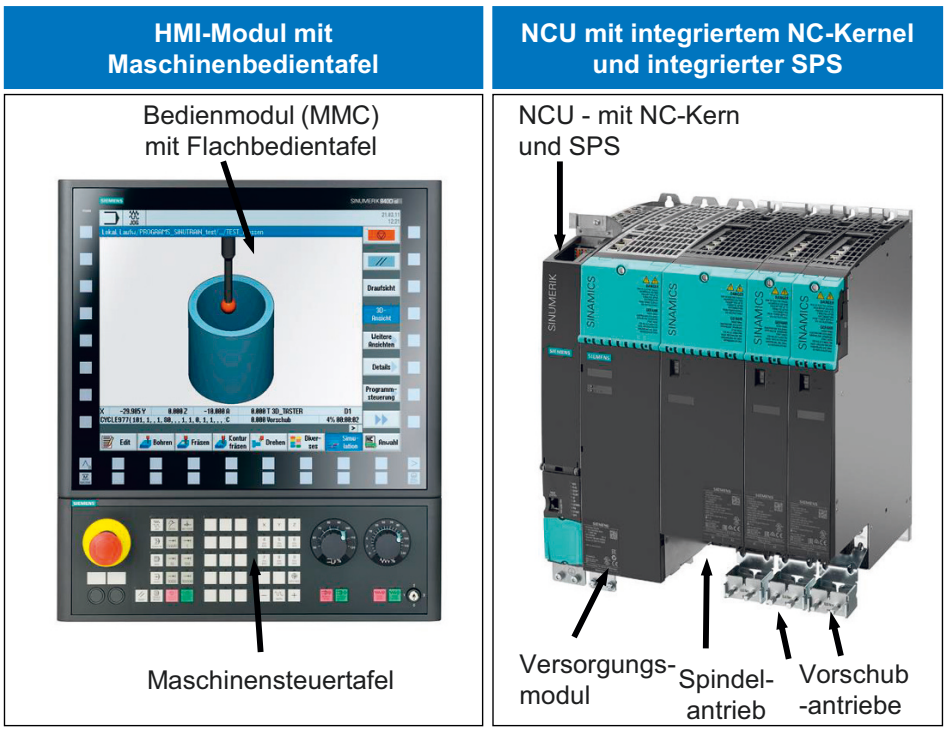


Bild 11.3 Komponenten einer numerischen Steuerung. Nach SIEMENS

hersteller selbst entwickelt und produziert. Allerdings kommen auch hierbei Standardprozessoren und -bauelemente zum Einsatz. Für spezielle Aufgaben – insbesondere Schnittstellen zu externer Hardware (SERCOS, PROFIBUS etc.) – werden sogenannte ASICs (Application Specific Integrated Circuit, anwendungsspezifisch entwickelte integrierte Schaltungen) eingesetzt, die bereits bei mittleren Stückzahlen wirtschaftlich sind.

Bild 11.3 zeigt die Komponenten einer NC-Steuerung der höheren Leistungsklasse [SIEM16]. Die Steuerung verwaltet maximal 93 Vorschubachsen bzw. Spindeln, die auf bis zu 30 parallele Kanäle verteilt werden können. Zu den Hardwarekomponenten gehören:

- ein MMC-Modul (Man Machine Control) mit integriertem Industrie-PC und einer Bedientafel mit TFT-Farbdisplay und NC-Volltastatur als zentrale Anzeige- und Eingabeeinheit
- die Maschinensteuertafel zur Bedienung der Maschine von Hand, zur Vorgabe der Bewegungsart und der Override-Werte sowie zur Definition individueller Tastaturbelegungen durch den Maschinenhersteller (z. B. Ausführung eines bestimmten NC-Satzes bei Tastenbetätigung)
- eine NCU-Baugruppe (Numerical Control Unit) mit integrierter NC und SPS. Die Mehrprozessor-Baugruppe NCU wird direkt in das digitale Umrichtersystem integriert und mit den Antriebsmodulen verbunden. Ein-/Ausgangsbaugruppen zur Maschinensteuerung können über Profibus/Profinet direkt an die NCU angeschlossen werden.

Alle Komponenten werden über ein serielles Bussystem miteinander vernetzt, an das auch weitere Steuerungskomponenten angeschlossen werden können.

Heute wird speziell im oberen Leistungsbereich noch vielfach verteilte Hardware mit je einem Prozessor für Bedienung, NC- und PLC-Funktionalität eingesetzt. Dafür sprechen die klare Trennung zwischen Echtzeit- und Bedienbereich aus Gründen der Sicherheit und Zuverlässigkeit. Teilweise ist diese Aufteilung auch historisch bedingt durch eine nicht ausreichende Leistungsfähigkeit einzelner Prozessoren. Letzteres ist jedoch schon bei Prozessoren, die jenseits von 500 MHz getaktet werden, keine Frage mehr.

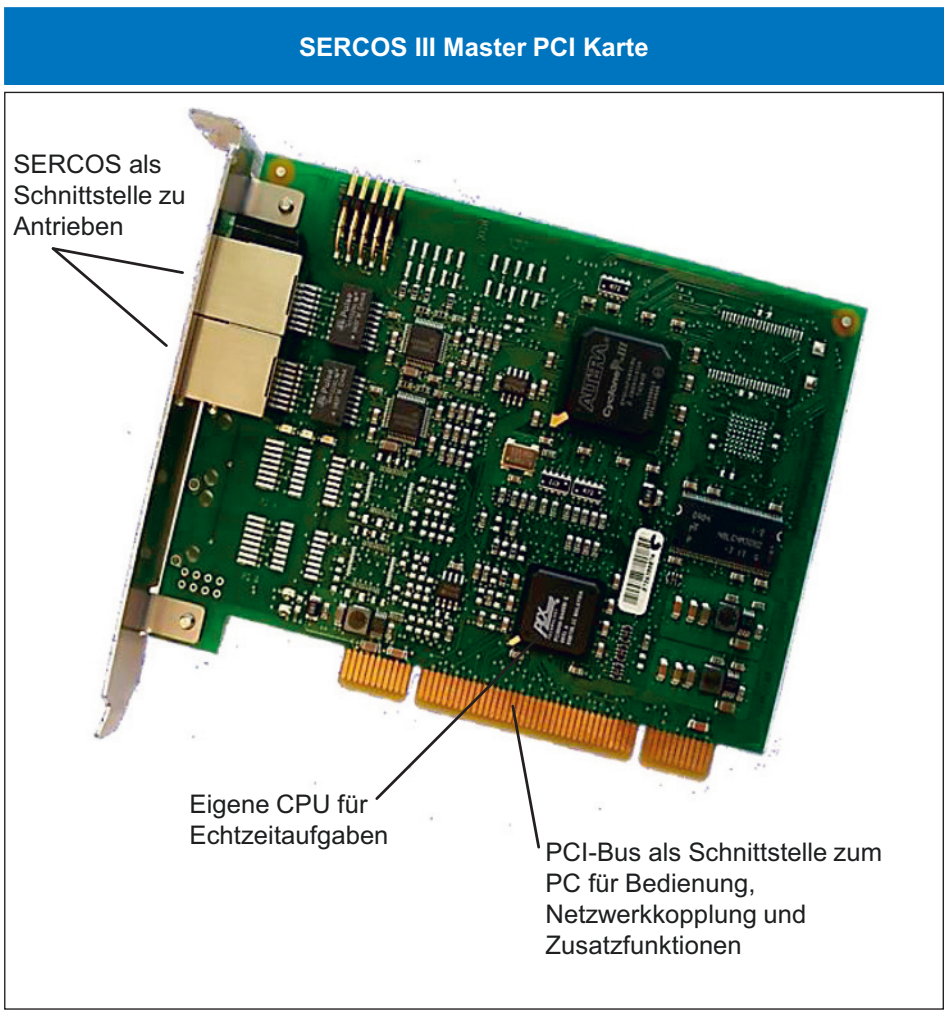


Bild 11.4 SERCOS III Master PCI-Karte. Nach Bosch Rexroth

Bild 11.4 zeigt eine SERCOS III Master PCI-Karte, die es ermöglicht, einen Standard-Büro-PC, direkt an die Antriebsverstärker anzuschließen. Die Trennung der einzelnen Bereiche Bedienung, NC und PLC findet hier nur noch auf Softwareebene statt. Voraussetzung dazu ist ein leistungsfähiges Echtzeitbetriebssystem mit prioritätengesteuertem Multitasking. Denkbar ist die Verwendung von Linuxderivaten mit echtzeitfähigem Kernel.

11.2.2.1 Interner Aufbau

Wie bereits dargestellt, besteht die Hardware einer numerischen Steuerung je nach Ausführung aus unterschiedlichen Baugruppen. Historisch bedingt lieferte die Wahl spezieller Hardware die Grundlage für die Leistungsfähigkeit einer Steuerung. In vielen Steuerungen findet man eine klassische Aufteilung in drei Hardwarekomponenten:

- *Bedienbereich-Hardware:*
  für alle Bedien- und Anzeigefunktionen; nicht echtzeitfähig, in der Regel PC-basierte Hardware mit Windows-Betriebssystemen;
- *NC-Kern-Hardware:*
  zur Ausführung geometrischer Berechnungen und der Bahnsteuerung nach den Vorgaben des NC-Programms; echtzeitfähig, in der Regel spezielle Hardware mit Echtzeitbetriebssystem;
- *SPS-Hardware:*
  zur maschinenseitigen Anpassung der Steuerung (Anpasssteuerung); echtzeitfähig, in der Regel spezielle Hardware mit einer Firmware zur zyklischen Ablaufsteuerung.

Die SPS war im Gegensatz zu den beiden anderen Hardwarebereichen von Anfang an für Maschinenhersteller frei programmierbar. Aus der Historie heraus haben sich diese darauf spezialisiert, ihre eigene Software in die SPS zu integrieren. In der Folge wurden mangels Alternative teilweise komplexe Verwaltungsaufgaben wie Werkzeugverwaltung, Palettenmanagement oder Auftragsabwicklung in die eigentlich für logische Verknüpfungen und Abläufe vorgesehene SPS integriert. Erst mit dem Aufkommen offener Steuerungssysteme besteht die Möglichkeit der Bereinigung dieser Fehlentwicklungen (vgl. ▶ Kap. 11.2.6). Komplexe Verwaltungsaufgaben können im Bedienbereich realisiert werden. Dies entlastet den SPS-Bereich zugunsten seiner ursprünglichen Echtzeitaufgaben im Bereich der Maschinensteuerung und bringt einen erheblichen Performancegewinn.

Mit zunehmender Verbreitung und immer kürzeren Innovationszyklen der Halbleitertechnik verliert jedoch die Hardware an Bedeutung. Innerhalb kürzester Zeit verdoppeln kommerziell verfügbare Prozessoren ihre Leistungsfähigkeit. Andererseits werden die Leistungsfähigkeit und damit auch der Umfang der Software immer größer. Hiermit steigt der Bedarf, aufwendig entwickelte Software wiederzuverwenden und unabhängig von der Hardware einsetzen zu können.

Eine logische und softwareorientierte Gliederung der Steuerungsaufgaben nach Funktionsbereichen erscheint heute daher sinnvoller als die klassische Aufteilung in hardwareorientierte Strukturen. Eine solche Gliederung nach Funktionsbereichen bezeichnet man als Referenzarchitektur [OSAC00]. Moderne Steuerungen sind nach diesen Architekturansätzen modular aufgebaut und besitzen definierte Schnittstellen zwischen einzelnen Modulen. Einzelne Softwaremodule können so in Steuerungen unterschiedlicher Leistungsklassen eingesetzt und wiederverwendet werden. In der Frage, welche Funktionalität (Software) auf welcher Hardware realisiert wird, haben Steuerungshersteller und Anwender mehr Freiheiten. Im Folgenden werden die wesentlichen Funktionsbereiche einer numerischen Steuerung erläutert.

Funktionsbereich HMC

Der Funktionsbereich HMC (engl. Human Machine Control, Bedienung) umfasst sämtliche Funktionen zur Bedienung und Datenhaltung der Steuerung. Hierzu gehört die Visualisierung der Prozess- und Stammdaten, die Programmierung von NC-Werkstückprogrammen mittels eines Texteditors oder WOP-Systems sowie die Verwaltung der unterschiedlichen Betriebsdaten.

Funktionsbereich MC

Der Funktionsbereich MC (engl. Motion Control, Bewegungssteuerung oder NC-Kern) beinhaltet die NC-Datenaufbereitung und Interpolation der Lagesollwerte für jeden sogenannten NC-Kanal. Durch die mehrkanalige Auslegung können unterschiedliche Achsverbände voneinander unabhängige Bewegungen ausführen. Jeder Kanal repräsentiert dabei ein eigenständiges System mit mehreren Achsen und eigenem NC-Programm sowie eigener Satzaufbereitung und Interpolation. Die Programme der einzelnen Kanäle können parallel bearbeitet, aber auch miteinander synchronisiert werden. Bild 11.5 zeigt schematisch die Struktur einer Steuerung mit vier Kanälen zur Verwaltung von sechs Achsen. In diesem Beispiel sind je zwei Kanäle zu je einer Bearbeitungsgruppe zusammengefasst. Kanäle innerhalb einer Bearbeitungsgruppe werden in der Regel zeitgleich und immer in der gleichen Betriebsart gestartet.

Funktionsbereiche AC und SC

Die Funktionsbereiche AC (engl. Axes Control, Achsansteuerung) und SC (engl. Spindle Control, Spindelansteuerung) verwalten eine oder mehrere Gruppen von Achsen oder Spindeln. Aus Sicht der Softwarearchitektur beinhalten sie die komplette Regelungstechnik, auch wenn diese auf separater Hardware im Antriebsverstärker untergebracht ist.

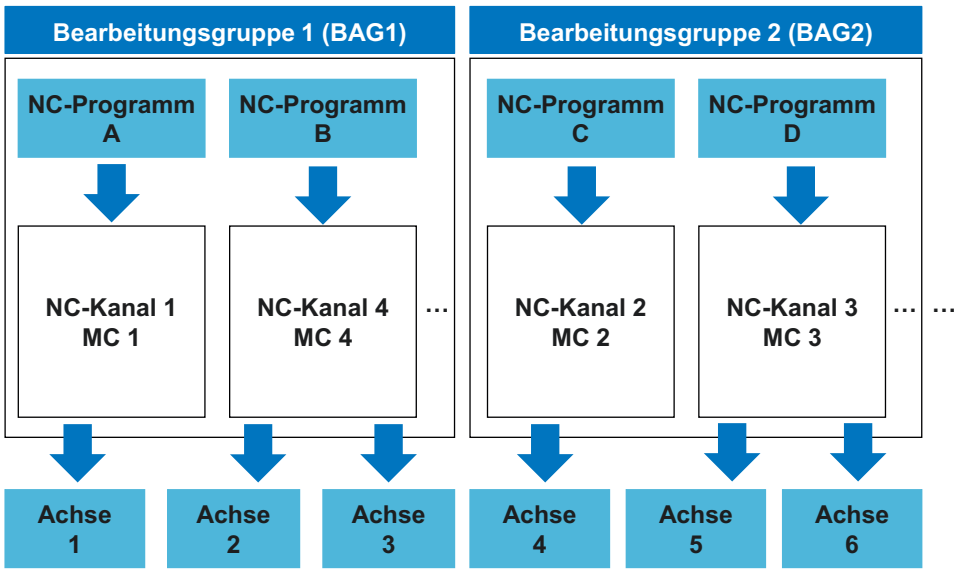


Bild 11.5 Mehrkanalstruktur im NC-Kern. Nach SIEMENS

Funktionsbereich LC

Der Aufgabenbereich LC (engl. Logic Control, Anpasssteuerung) bildet die Schnittstelle zwischen der Steuerung und der Maschine. Die Anpasssteuerung übernimmt die Ausführung der maschinenspezifischen Funktionsabläufe und logischen Verknüpfungen, wie z. B. Überwachung von Schutztüren oder die Steuerung der Kühlmittelzufuhr. Zusätzlich findet über diese Schnittstelle eine Synchronisation zwischen MC und LC statt. Im Rahmen der Satzaufbereitung werden Schaltbefehle im NC-Programm über sogenannte T- und M-Befehle der Anpasssteuerung zur Ausführung übertragen. Des Weiteren werden hier auch Eingaben der Maschinensteuertafel verarbeitet.

Weitere Funktionsbereiche

Zusatzfunktionen wie Organisations- und Planungsaufgaben einer numerischen Steuerung können weiteren Funktionsbereichen zugeordnet werden (vgl. ▶ Kap. 11.2.5.2):

- *Werkzeugverwaltung:*
  zur Speicherung und Verwaltung aller Werkzeugdaten (Werkzeugnummer, Geometrien, Verschleißdaten etc.);
- *Auftragsverwaltung:*
  zur Verwaltung von Fertigungsaufträgen und zur Verwaltung des Materialflusses von Werkstück und Werkzeug;
- *Transportgerätesteuerung:*
  zur Ausführung von Werkzeugtransport und Werkzeugwechsel sowie Palettentransport und Palettenwechsel innerhalb einer Werkzeugmaschine.

11.2.2.2 Externe Schnittstellen

Zur Integration einer numerischen Steuerung in das produktionstechnische Umfeld stehen eine Reihe unterschiedlicher, kommunikationstechnischer Schnittstellen zur Verfügung. Grundsätzlich kann zwischen Schnittstellen zu über- und untergeordneten Systemen sowie zum Maschinenbenutzer unterschieden werden.

Durch die starke Verbreitung von Netzwerktechnologien in der Produktion wird kaum eine NC-Steuerung in einem für sich abgeschlossenen System betrieben. Die Schnittstellen umfassen sowohl echtzeitfähige Verbindungen zu Feldgeräten wie Sensoren und Aktoren oder anderen Steuerungen als auch weniger echtzeitfähige Schnittstellen zum Unternehmensnetzwerk (Diagnose, Auftrags- und Betriebsmittelplanung, vgl. ▶ Kap. 14.2).

In Bild 11.6 sind die funktionalen Schnittstellen einer numerischen Steuerung in Relation zum Ebenenmodell der Fertigung dargestellt (vgl. ▶ Kap. 14.2).

Übergeordnete Systeme sind Rechner auf der Zellen- bzw. Leitebene, deren Aufgabe zum einen die Versorgung der Steuerung mit NC-Programmen, Werkzeugdaten und zum anderen – falls erforderlich – eine Fernsteuerung (Programm-Start/-Stopp) ist. Bei dieser Betriebsart spricht man von DNC, die bei automatisierten Fertigungssystemen wie Flexiblen Fertigungssystemen (FFS) und Flexiblen Fertigungszellen (FFZ) eingesetzt wird (vgl. ▶ Kap. 14.3).

Auf der gleichen Ebene befindet sich die Schnittstelle zum Maschinenbenutzer in Form von Grafikbildschirm, Tastatur, Handrädern, Drehschaltern usw., die einen manuellen, direkten Betrieb der Steuerung und Maschine ermöglicht (vgl. ▶ Kap. 11.5). Die untergelagerte Aktor-/Sensorebene wird durch Lage-, Geschwindigkeits- oder Stromsollwerte für die Antriebe (Verstärker) sowie Schaltfunktionen gesteuert und liefert Ist-Werte (Messgeber), Prozessdaten (z. B. Temperaturveränderungen) und etwaige Fehlermeldungen zurück.

Nachdem die funktionalen Schnittstellen einer NC beschrieben worden sind, sollen im Folgenden die physikali-

schen Schnittstellen erläutert werden. In Bild 11.7 sind typische Peripheriegeräte und physikalische Schnittstellen einer NC abgebildet [INDR99]. Für die Verbindung zu übergeordneten Zellen- bzw. Leitrechnern haben sich heute Ethernet und TCP/IP als Standard durchgesetzt. Bei älteren Steuerungen wurden häufig serielle Schnittstellen (RS-232, RS-422) als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen verwendet. Auch bei der Vernetzung numerischer Steuerungen untereinander wird heute vorwiegend Ethernet eingesetzt. Liegen spezielle Sicherheits- oder Echtzeitanforderungen vor, kommen Feldbussysteme wie INTERBUS oder PROFIBUS-DP zum Einsatz.

Feldbussysteme werden auch für digitale Ein- und Ausgänge genutzt, um die Verbindung zu Aktoren und Sensoren herzustellen. Auch Handräder und weitere Bediengeräte werden über diesen Bus angeschlossen.

Die Antriebe zur Bewegung der Achsen und Spindeln der Maschine werden in der Regel über digitale Schnittstellen wie z. B. SERCOS verbunden. Bei Low-Cost-Steuerungen wird nach wie vor die früher übliche analoge 10-V-Schnittstelle verwendet (▶ Kap. 2.2.3).

11.2.3 Software einer NC-Steuerung

Die wesentliche Aufgabe einer NC-Steuerung ist die Interpretation der Eingangsinformationen in Form alphanumerischer Zeichen (NC-Programm) und Aufbereitung der entsprechenden Weg- bzw. Schaltinformationen für jede Achse bzw. jedes Stellglied der Werkzeugmaschine. Der Einsatz der frei programmierbaren Mikroprozessortechnik seit Anfang der 1970er Jahre ermöglichte die Umsetzung der einzelnen Funktionen einer NC-Steuerung durch herstellerspezifische NC-Funktionsprogramme (z. B. Interpreter, Interpolator), die anfangs sehr aufwendig in Assembler programmiert wurden und heutzutage komfortabel in einer Hochsprache wie beispielsweise C oder C++ entwickelt werden.

Durch die steigende Leistungsfähigkeit der NC-Hardware wurden Möglichkeiten geschaffen, die eine effektivere Entwicklung der NC-Software erlauben. Dies ist nicht zuletzt durch die Integration von Standard-PC-Karten in moderne Steuerungen erreicht worden. In Folge dessen hat sich der preiswerte und umfangreiche Softwaremarkt der PC-Welt eröffnet. Neben der Softwareerstellung auf der Steuerung findet jedoch in der Regel die Entwicklung auf sogenannten Hostrechnern statt. Hier bieten Workstations oder leistungsfähige PCs mit hoher Prozessorleistung und Speicherausstattung wesentlich komfortablere Möglichkeiten in der Entwicklungs- und Testphase. Nach Fertigstellung der Funktionsprogramme können diese auf die Hardware der NC-Steuerung (Ziel-System) übertragen werden. Diese Methode der Programmierung wird im Allgemeinen als Cross-Entwicklung bezeichnet.

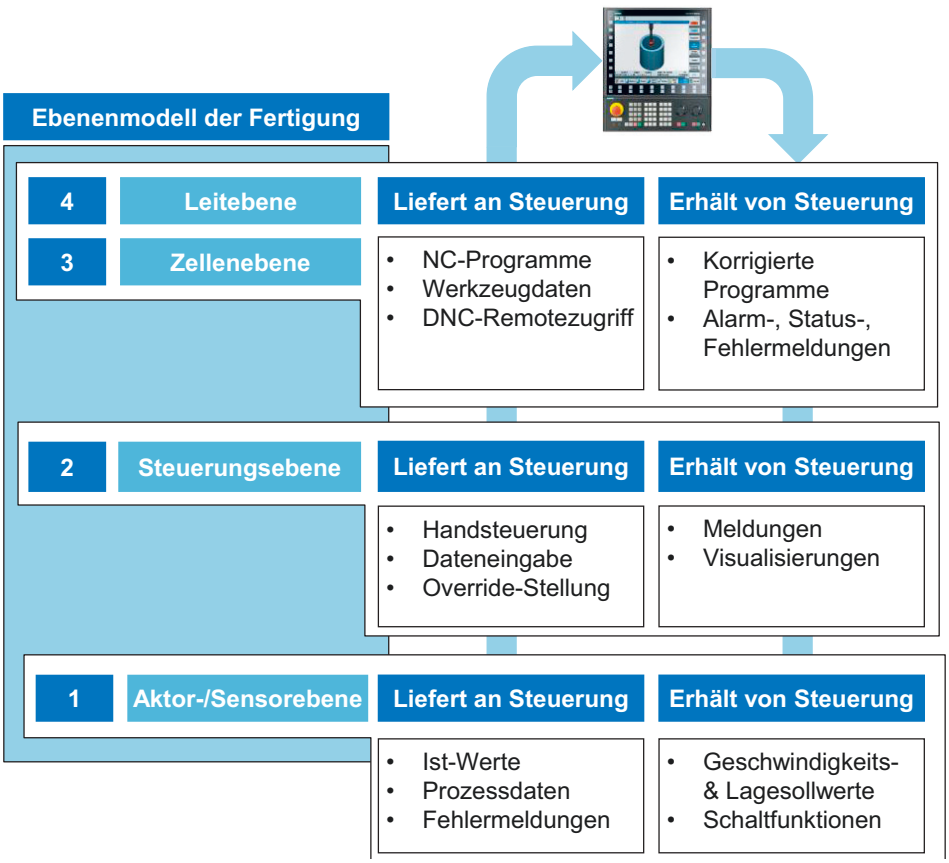


Bild 11.6 Funktionale Schnittstellen einer numerischen Steuerung im Ebenenmodell der Fertigung

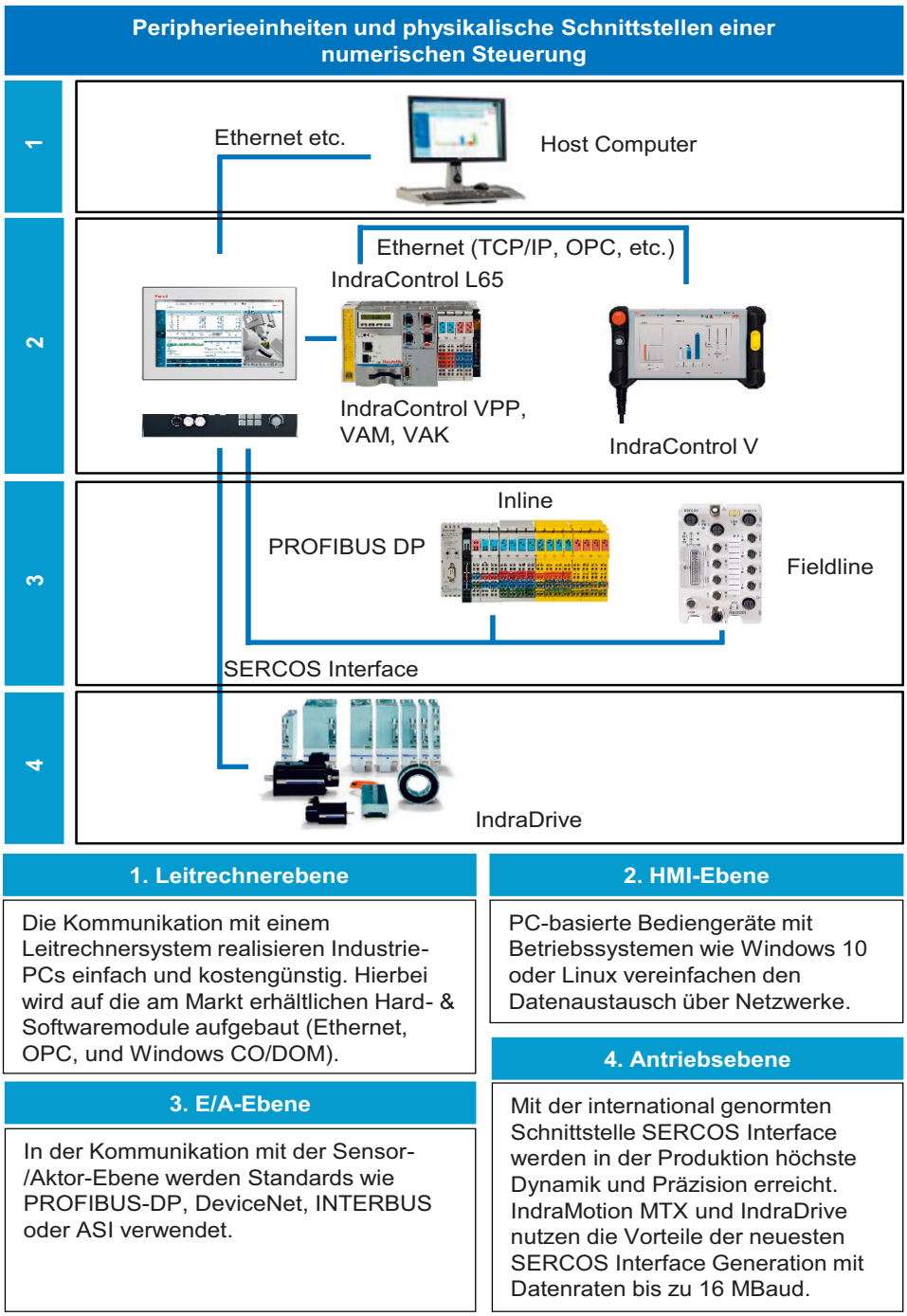


Bild 11.7 Peripherieeinheiten und physikalische Schnittstellen einer numerischen Steuerung. Nach Bosch Rexroth

Im Folgenden soll die *Software-Struktur* einer numerischen Steuerung beschrieben werden, Bild 11.8. Den Hauptanteil der Software stellen die NC-Funktionsmodule dar, welche im Wesentlichen die Funktionalität der Steuerung verkörpern. Funktionsmodule sind hier z. B. die NC-Kern-Programme, wie Interpreter oder Interpolator, aber auch Zusatzfunktionen wie Fehlerüberwachungsfunktionen, ein NC-Programmeditor, ein Simulationssystem oder ein Werkzeugverwaltungssystem.

Zentrale Schnittstelle zwischen Hardware und Funktionsmodulen ist das *Betriebssystem* der Steuerung, welches neben der Speicherverwaltung und der Ein- und Ausgabeverwaltung zusätzlich die Synchronisation der einzelnen Prozesse übernimmt [KREB92]. Das Betriebssystem lässt sich in einen hardwareabhängigen und einen hardwareunabhängigen Teil aufspalten, Bild 11.8. Ein für NC-Steuerungen geeignetes Standard-Betriebssystem muss multitaskingfähig sein, da mehrere Funktionsmodule (Tasks), wie z. B. Interpreter und Interpolator, zur gleichen Zeit aktiv sein müssen. Zusätzlich ist Echtzeitfähigkeit erforderlich, d. h. ein Task mit hoher Priorität wird verzögerungsfrei verarbeitet und verdrängt eventuell andere Tasks mit niedriger Priorität.

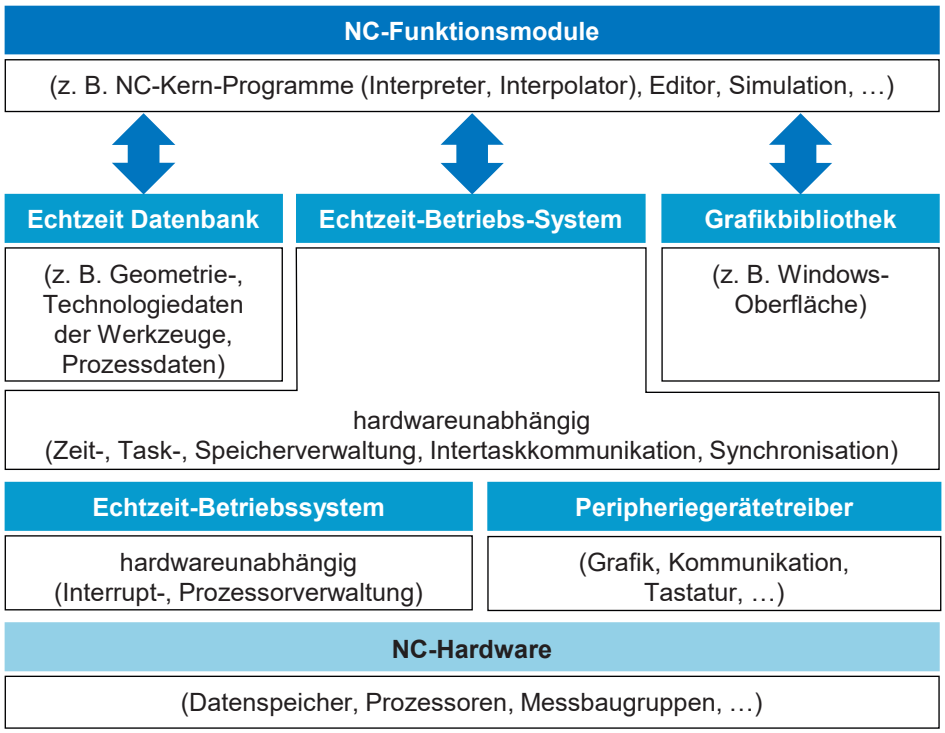


Bild 11.8 Softwarebausteine einer numerischen NC-Steuerung

So ist z. B. ein Task zur Online-Kollisionsüberwachung hinsichtlich seiner Priorität höher zu bewerten als ein Task zur Darstellung von Informationen auf dem Bildschirm. Durch die Echtzeitfähigkeit wird eine verzögerungsfreie, deterministische Reaktion bestimmter Prozesse auf äußere Ereignisse in einer definierten Zykluszeit sichergestellt. Sogenannte Peripheriegerätetreiber stellen die softwaretechnische Ankopplung zu den Peripherieeinheiten der Steuerung, wie z. B. Antriebe oder Bildschirm, her.

Eine leistungsfähige Hardware ermöglicht weiterhin die Einbindung sogenannter Systemsoftware, die unabhängig von der Funktionalität der NC realisiert werden kann und als Plattform für die NC-Funktionsprogramme zu verstehen ist. Grafik-Bibliotheken und Echtzeit-Datenbanken werden in der Regel vom Betriebssystem zur Verfügung gestellt. Echtzeit-Datenbanken bieten nicht nur eine offene Schnittstelle (z. B. SQL als ISO-Norm) zur Datenhaltung (z. B. Werkzeugdaten, technologische Daten, usw.), sondern gewährleisten auch den gesicherten Zugriff auf zeitkritische Daten (z. B. Korrekturwerte).

11.2.4 Funktionsweise einer NC-Steuerung

Im Folgenden wird die NC-Kernfunktionalität anhand des Informationsflusses beschrieben, der sich – beginnend mit der Interpretation des NC-Programms – ergibt.

Die Funktionsweise einer numerischen Steuerung wird zum einen von der NC-Kernfunktionalität und zum anderen von Zusatzfunktionen bestimmt. Die NC-Kernfunktionalität, die in diesem Abschnitt beschrieben wird, ist zur Steuerung einer Werkzeugmaschine unbedingt erforderlich und ist in vergleichbarer Form in jeder Steuerung vorhanden. Zusatzfunktionen, wie z. B. Programmierung oder Werkzeugverwaltung, sind technologie- bzw. anwenderspezifisch und somit nicht in jeder Steuerung zu finden. Die Zusatzfunktionen werden im ▶ Kap. 11.2.5 beschrieben.

Bild 11.9 stellt exemplarisch den Datenfluss innerhalb einer NC-Steuerung dar. Alle Funktionen, wie z. B. Interpolation oder Transformation, werden heutzutage durchweg mittels einer Hochsprache (z. B. C oder C++) als Software in die Steuerung integriert. In der Regel sind Anzahl und Reihenfolge der unterschiedlichen Teilfunktionen steuerungsspezifisch und variieren je nach Strategie des Herstellers [KLEI95].

Eingangsdaten der Steuerung sind neben dem NC-Programm Arbeitszyklen, Werkzeugdaten und Bediendaten.

11.2.4.1 NC-Interpreter

Der NC-Interpreter hat die Funktion eines Syntaxanalysators (Parser), der die unterschiedlichen Formate der NC-Programme bzw. Eingabedaten in eine einheitliche, intern lesbare Form übersetzt. Dadurch können unterschiedliche Datenformate, wie einfache NC-Programme nach DIN 66025 [DIN83b] oder auch komplexe Flächeninformationen, z. B. nach VDAFS (Verein Deutscher Automobilhersteller Flächen Schnittstelle, vgl. ▶ Kap. 11.4.2), oder STEP-NC (vgl. ▶ Kap. 11.3.2), von ein und derselben Steuerung verarbeitet werden.

Der NC-Interpreter übergibt dem Funktionsblock *Geometriedatenverarbeitung* zu jedem NC-Satz die Lage der

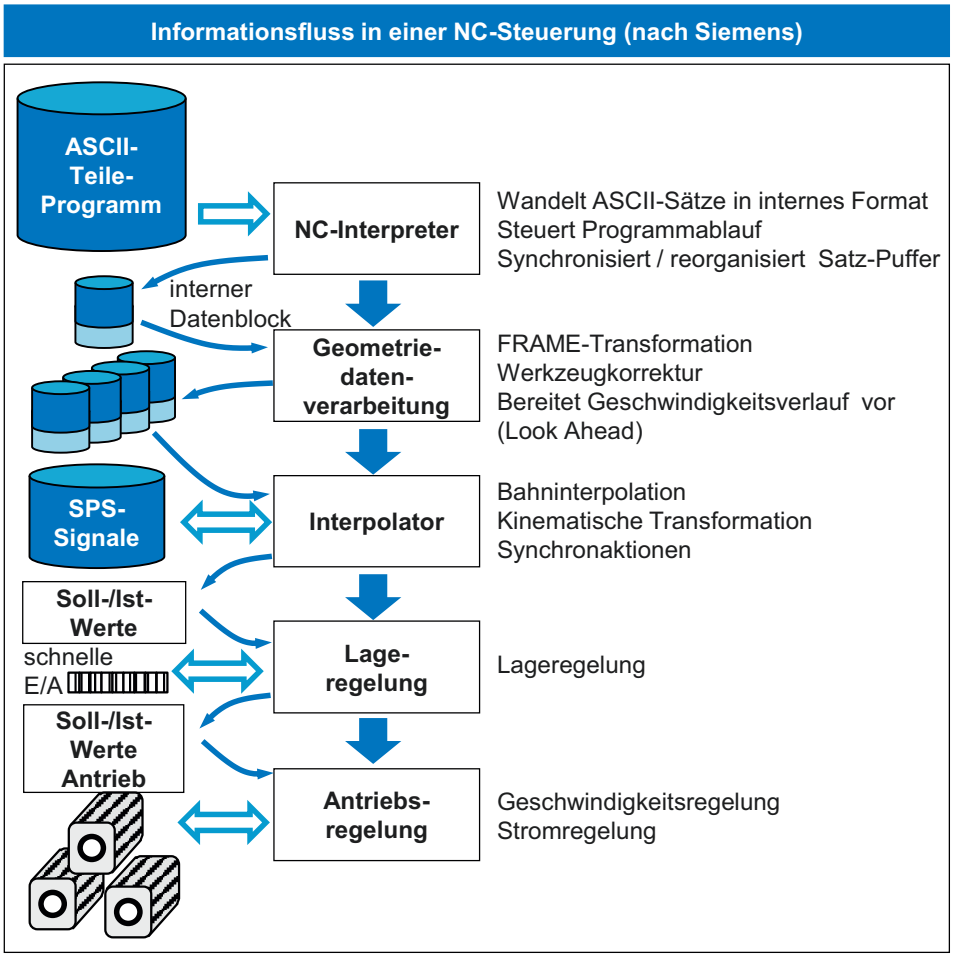


Bild 11.9 Informationsfluss in einer NC-Steuerung. Nach SIEMENS

Bahneckpunkte, die geforderte Bewegungsart (z. B. Geraden- oder Kreisbewegung) und die notwendige Vorschubgeschwindigkeit.

Schaltfunktionen wie Werkzeugwechsel oder Werkstückbeschickung werden später an die Anpasssteuerung (meist in Form einer SPS) übertragen, müssen aber natürlich mit den Geometriedaten synchronisiert werden. So muss beispielsweise sichergestellt werden, dass ein Werkzeugwechsel als Schaltbefehl an die SPS erst ausgeführt werden darf, wenn der letzte Geometriedatensatz mit dem Vorgänger-Werkzeug vollständig ausgeführt wurde.

11.2.4.2 Geometriedatenverarbeitung

Im Bild 11.9 sind die Funktionen Geschwindigkeitsführung, geometrische Transformationen und Korrekturberechnungen zu einem Funktionsblock zusammengefasst.

Jede einzelne Funktion besteht wieder aus Teilfunktionen, wobei Reihenfolge und Ausführung von Steuerung zu Steuerung unterschiedlich realisiert sein können.

Um eine NC-Programmierung unabhängig vom Maschinentyp und der tatsächlichen Werkzeuggeometrie zu ermöglichen, finden innerhalb der Steuerung sogenannte *geometrische Transformationen* statt (vgl. ▶ Kap. 12.2). Hier wird zum einen eine Nullpunktverschiebung realisiert, welche die Lage des Werkstücknullpunkts relativ zum Maschinennullpunkt beschreibt und somit die weitere Transformation zwischen Werkstück- und Maschinenkoordinaten ermöglicht. Zum anderen erlaubt die Werkzeugkorrektur, die im Allgemeinen aus einer Werkzeuglängen- und Werkzeugradiuskorrektur besteht, die Berechnung der notwendigen Äquidistanten zu der programmierten Bahn in Abhängigkeit von den aktuellen Werkzeugdaten. Dadurch wird die Unabhängigkeit der NC-Programmierung von der genauen Länge und dem Durchmesser des später einzusetzenden Werkzeugs sichergestellt.

Im Rahmen der *Geschwindigkeitsführung* werden die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der programmierten Vorschubgeschwindigkeit den jeweiligen Randbedingungen angepasst (vgl. ▶ Kap. 12.1.1). Bei großen Geschwindigkeitsänderungen, z. B. beim Umfahren kleiner Radien, sind die Antriebe aufgrund ihrer begrenzten Dynamik nicht in der Lage, der vorgegebenen Bewegung zu folgen. In diesen Fällen nimmt die Steuerung automatisch die Bahngeschwindigkeit zurück, damit die Werkstückmaßtoleranzen eingehalten werden. Zur weiteren Optimierung der Geschwindigkeitsführung verfügen moderne Steuerungen über eine Look-Ahead-Funktion. Mittels dieser Überwachungsfunk-

tion werden mehrere NC-Sätze (ca. 10 bis 100) im Voraus daraufhin analysiert, ob das Geschwindigkeitsprofil eingehalten bzw. verbessert werden kann (vgl. ► Kap. 12.1.2.2).

11.2.4.3 Interpolation

Aufgabe der *Interpolation* ist die Berechnung von Zwischenpunkten, die auf einem vom NC-Programm definierten Bahnabschnitt liegen. Somit wird die Bahnbewegung, die aus der gleichzeitigen Bewegung mehrerer Achsen entsteht, stückweise auf die einzelnen Achsen aufgeteilt, sodass die Achsen abhängig voneinander ihre Positionen verändern. Hier finden einfache Verfahren wie Geraden- und Kreisinterpolation, aber auch aufwendigere Arten wie Spline-Interpolationen Verwendung (vgl. ► Kap. 12.1.4) [KIEF99]. Weitere Aufgaben der Interpolation sind die Berücksichtigung des von der Geschwindigkeitsführung vorgegebenen Geschwindigkeitsprofils sowie bei nicht kartesischen Maschinen die *kinematische Transformation* der Koordinaten auf die einzelnen Maschinenachsen.

Des Weiteren müssen innerhalb der Interpolation sowohl externe Einwirkungen, wie eine Korrektur des Vorschubs oder der Spindeldrehzahl (Override), als auch statische und dynamische Verlagerungen mittels *Kompensationsberechnungen* berücksichtigt bzw. ausgeglichen werden. Unter Verwendung eines Drehschalters zur Vorschubkorrektur ist der Maschinenbenutzer in der Lage, die programmierte Bahngeschwindigkeit zu beeinflussen (in der Regel zwischen 0 und 120 %). Aufgabe der Kompensationsberechnung ist es, die Geschwindigkeitsänderung während der Bearbeitung zu verrechnen, ohne geometrische Abweichungen am Werkstück auftreten zu lassen. Zusätzlich sind eventuelle Verlagerungen aufgrund statischer Belastungen oder thermischen Verzugs der Maschinenstruktur, wie der thermischen Verlängerung der Spindel, das Umkehrspiel der Spindelmutter, der Spindelsteigungsfehler oder Werkzeugverschleiß im Prozess ständig zu kompensieren (vgl. ► Kap. 12.3).

11.2.4.4 Achsregelung

Je nach Ausführung der Steuerung werden von der Geometriedatenverarbeitung die einzelnen Vorschubantriebseinheiten entweder mit Lage-, Geschwindigkeits- oder Stromsollwerten versorgt. Das zurzeit überwiegend eingesetzte Regelprinzip ist die kaskadenförmige Lageregelung. Den inneren Regelkreis bildet die Motorstromregelung, mit einem P- oder PI-Regler. Dieser überlagert ist der Drehzahlregelkreis, der seine Führungsgröße vom Lageregler erhält. Die verwendeten Regler sind im Allgemeinen PI- bzw. PID-Regler für den Drehzahl- sowie P-Regler für den Lageregelkreis (vgl. ► Kap. 3.2).

Bei einigen NC-Steuerungen findet die *Lageregelung* in digitaler Form steuerungsintern statt, d. h. es werden Geschwindigkeitssollwerte an die Antriebe weitergegeben. Geschwindigkeits-, Stromregler und je nach Ausführung auch der Lageregler arbeiten auf der Antriebsseite in den Servomodulen (vgl. ► Kap. 2.2.2). Der beschriebene Informationsfluss innerhalb der NC, d. h. von der Interpretation eines NC-Programms bis zur Ausgabe der Achssollwerte, findet jeweils in einem NC-Kanal statt. Mit jedem NC-Kanal werden mehrere Achsen oder Spindeln in einem Achsverbund asynchron oder synchron betrieben. Die NC-Kanäle können in Betriebsartengruppen aufgeteilt werden, ◘ Bild 11.5. Weitere NC-Achsen können z. B. zur Steuerung von Revolver, Werkzeugmagazin, Werkstück-/Werkzeugpaletten, Reitstock, Pinole, Abstechschlitten oder Werkstück- und Werkzeuglader definiert werden.

11.2.5 Funktionsumfang moderner NC-Steuerungen

Neben den beschriebenen Basisaufgaben der NC-Steuerung, nämlich der Interpretation und Ausführung eines Teileprogramms, sind durch die gestiegenen Anforderungen der Maschinenhersteller und Endanwender zusätzliche Funktionen in die NC integriert worden. Diese Funktionen sind technologie- bzw. anwenderspezifisch und erweitern bzw. erhöhen den Einsatzbereich und den Bedienkomfort der Steuerung. Somit erleichtern diese Funktionen nicht nur die Bedienung und Programmeingabe vor Ort, sondern ermöglichen auch die datentechnische Einbindung der Werkzeugmaschine bzw. Fertigungszelle in ein Fertigungssystem. Standard-Funktionen werden in der Regel vom Steuerungshersteller selbst implementiert, wohingegen Zusatzfunktionen, die in hohem Maße vom Anwender abhängig sind, vom Maschinenhersteller in die Steuerung integriert werden. Im Folgenden werden Funktionen, die sowohl von Steuerungs- als auch von Maschinenherstellern angeboten werden, beschrieben.

11.2.5.1 Standard-Funktionen

In ◘ Bild 11.10 sind mögliche Funktionalitäten von NC-Steuerungen dargestellt. Je nach Anwendung und Konfiguration der Steuerung ist jedoch nicht der komplette Funktionsumfang zum Betrieb erforderlich.

Programmierung

Zur Teileprogrammierung an der Steuerung werden verschiedene Programmierwerkzeuge angeboten, die von einem einfachen alphanumerischen Texteditor über halb- und vollautomatische NC-Programm-Generierungssysteme bis zu einem grafisch-orientierten WOP-System ein breites Profil hinsichtlich Preis und Funktionalität aufweisen. Die Syntax für die Programmierung basiert auf der DIN 66025 [DIN83b; DIN88], wobei der verfügbare Sprachumfang häufig durch herstellerspezifische Erweiterungen ergänzt wird. In ► Kap. 11.4 erfolgt eine ausführliche Beschreibung der verschiedenen Programmierverfahren.



Bild 11.10 Funktionsumfang einer numerischen Steuerung

Grafikunterstützte Bearbeitungssimulation

Eine zusätzliche Funktion ist die grafische Bearbeitungssimulation am Bildschirm zur Kontrolle bzw. Optimierung von NC-Programmen an der Steuerung, ohne dass die Maschine die einzelnen Operationen tatsächlich ausführen muss. Dadurch kann die Rüstzeit der Maschine bzw. die Einfahrzeit des NC-Programms reduziert werden. Insofern kommt der grafischen Simulation eine große Bedeutung zu, die bei werkstattorientierter Programmierung üblicherweise auf der NC oder bei maschineller Offline-Programmierung in der Arbeitsvorbereitung angewendet wird. Je nach Anforderung kommen für die Modellierung und Darstellung 2D- oder 3D-Modelle zum Einsatz.

Die Simulation verfolgt zwei Ziele: Zum einen bewerkstelligt sie eine Überprüfung des NC-Programms hinsichtlich möglicher Kollisionen im Maschinenraum bei Verfahrbewegungen und beim Werkzeugwechsel sowie eingeschränkt eine Kontrolle der Maße und Konturen (z. B. Erkennen von Hinterschneidungen). Zum anderen bietet die Simulation die Möglichkeit zur Verfahrwegoptimierung. Hierbei werden unnötige Verfahrbewegungen (z. B. Luftschnitte) erkannt und eliminiert bzw. mit Eilgangbewegungen überbrückt, um

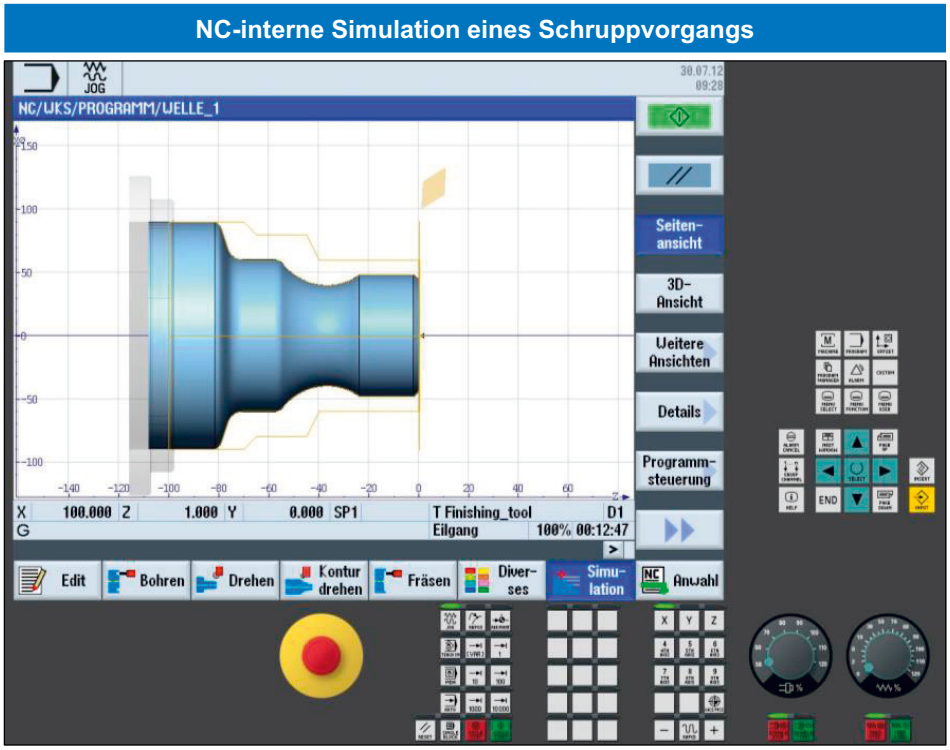


Bild 11.11 Bildschirmaufnahme der Simulation eines Schruppvorgangs. Nach SIEMENS

dementsprechend Stückzeiten zu verkürzen [PFEI93; SIEM99; WECK91].

Bild 11.11 zeigt beispielhaft die Simulation eines Schruppvorgangs beim Drehen. Die Darstellung kann mit Hilfe einer Lupenfunktion jederzeit vergrößert bzw. verkleinert werden. Während und nach der Simulation werden alle aktuellen Daten, wie Satznummer, im Eingriff befindliches Werkzeug (T), Soll- und Istweginformationen (X, Y), Vorschub (F), Spindeldrehzahl (S), Schnittgeschwindigkeit (v), Drehrichtung (M) sowie aktuelle und gesamte Programmlaufzeit, visualisiert. Zusätzlich kann die grafische Kontur zu jedem Zeitpunkt zur Kontrolle der Geometrieeingabedaten dargestellt werden. In der 3D-Darstellung kann das Werkstück in jeder Phase beliebig im Raum gedreht werden.

Im Handbetrieb wird durch die Simulation parallel zur Arbeit mit den Handrädern eine reale Abbildung des Fertigungsprozesses in Echtzeit ermöglicht, was insbesondere für schwer beobachtbare Innenbearbeitungen und aufgrund der Sichtbehinderung durch Kühlschmiermittel ein Vorteil ist.

Eine realistische Nachahmung des Bearbeitungsprozesses erfordert eine möglichst genaue Nachbildung der Werkzeuge, Werkzeughalter und -träger sowie die zeitlich korrekte Bewegung der einzelnen Schlitten während der gesamten Bearbeitung des Werkstücks.

Die grafische Simulation stellt ein wichtiges Instrument zur Erkennung von Kollisionen dar. Leistungsfähige Simulationssysteme gestatten die Simulation für unterschiedliche Maschinentypen und Bearbeitungen durch Zugriff auf eine Maschinen- und Werkzeugdatei, in der die Geometriedaten für Werkzeugrevolver, Arbeitsraum mit Spindel, Spannmittel, Werkzeuge usw. hinterlegt sind.

Häufig sind Bearbeitungssimulationen bereits Bestandteil kommerziell verfügbarer Offline-Programmiersysteme oder WOP-Systeme (vgl. ► Kap. 11.4).

Funktionen zur Überwachung und Diagnose

Um einen fehlerfreien Ablauf des Bearbeitungsprozesses zu gewährleisten bzw. Schäden an Maschine, Werkstück und Werkzeug zu vermeiden, werden Überwachungs- und Diagnosefunktionen eingesetzt. Diese Funktionen, die entweder direkt auf der NC-Steuerung oder auch auf zusätzlichen Geräten implementiert sind, untergliedern sich in die Bereiche zur Überwachung der Maschine (z. B. Überwachung der Antriebsdynamik, der geometrischen Genauigkeit und der Schmierung, ► Kap. 6.5.2), der eigenen Soft- und Hardware (z. B. NC-Selbsttest, Überprüfung von Leitungen und Schaltern, vgl. ► Kap. 6.5.2) und des Bearbeitungsprozesses (z. B. Werkzeugbruch, Werkzeugverschleiß, Werkstückmaße, Oberflächengüte, vgl. ► Kap. 6.3).

Die reine Überwachung wird in der Regel durch mehr oder weniger aufwendige Diagnosefunktionen zur Fehlerlokalisierung ergänzt. Eine ausführliche Abhandlung über die unterschiedlichen Strategien und Verfahren zur Überwachung und Fehlerdiagnose findet im ► Kap. 6 statt.

Mess- und Korrekturfunktionen

Bei hohen Qualitätsanforderungen sind während des Zerspanungsprozesses ständig Achswegkorrekturen durchzuführen. Ein Grund sind mechanische Unzulänglichkeiten der Maschine, Verschleiß der Werkzeuge oder temperaturbedingte Verlagerungen der mechanischen Maschinenstruktur. Statische Fehler wie Spindelsteigungsfehler oder Umkehrspiel werden in der Regel an der Maschine während der Inbetriebnahme einmal vermessen und in einem Korrekturspeicher abgelegt.

Für ständig variierende Maße, wie z. B. die Aufspannposition des Werkstücks (Spanntoleranzen), Werkzeugverschleiß oder temperaturbedingte Spindelverlängerung, werden sogenannte Messzyklen angewandt. Mit Hilfe von Messgeräten, Sensoren und Messtastern werden die maßlichen Veränderungen des Werkstücks bzw. Werkzeugs sowie Verlagerungen der Maschine erfasst und entsprechende Korrekturwerte ermittelt, die dann von der Steuerung zur Maßkompensation verarbeitet werden können. In ► Kap. 12.3 erfolgt eine ausführliche Darstellung dieser Thematik.

Benutzerschnittstelle

Unter dem Begriff der Benutzerschnittstelle werden sämtliche Hilfsmittel zusammengefasst, die dem Benutzer der NC-Steuerung zur Verfügung gestellt werden. Sie lässt sich in die zwei Bereiche Bildschirm und Elemente zur manuellen Steuerung (z. B. Schalter, Tastatur, Handrad) unterteilen.

Die leichte Anpassbarkeit der Benutzeroberfläche ist ein Kennzeichen für die Qualität und Offenheit einer Steuerung. Hinter dem Begriff der „offenen Steuerung“ verbirgt sich u. a. der Trend, dem Maschinenhersteller möglichst viel Freiheit bei der Konfiguration der Oberfläche zu gewähren. Hierbei ist neben der eigentlichen Gestaltung der Oberfläche die Möglichkeit zur freien Spezifikation der Daten von Bedeutung, die aus dem Prozess bzw. Informationsfluss innerhalb der NC visualisiert werden sollen. Moderne Oberflächen sind fensterorientiert, basieren fast ausschließlich auf dem Betriebssystem MS-Windows, verfügen über Softkeys sowie frei belegbare Funktionstasten und sind auf Flachbildschirmen realisiert. Die Thematik der Benutzerschnittstelle wird ausführlicher im ► Kap. 11.5 behandelt.

Externe Kommunikation – Netzwerkintegration

Der Funktionsumfang der externen Kommunikation hat entscheidenden Einfluss auf die Integrierbarkeit der NC in das produktionstechnische Umfeld. Von der einfachen analogen Schnittstelle über den digitalen Feldbus sowie Aktor-/Sensorbus bis zum lokalen Netzwerk finden alle genannten Anschlussmöglichkeiten Verwendung. Selbst die Ferndiagnose via gesicherter Internetverbindung wird genutzt. Die entsprechenden Kommunikationsprotokolle und -mechanismen, die bei einer numerischen Steuerung eingesetzt werden, sind in eigenen Abschnitten beschrieben (vgl. ► Kap. 14.3.3, ► Kap. 14.3.2.2 und ► Kap. 2.2.3).

Maschineninbetriebnahme und Konfiguration

Bei der Maschineninbetriebnahme wird die NC-Steuerung den Merkmalen der Werkzeugmaschine und den Bedürfnissen des Benutzers angepasst. Dazu wird die Steuerung hinsichtlich Achsen, Spindeln, Handrädern, Messsystemen, Re-

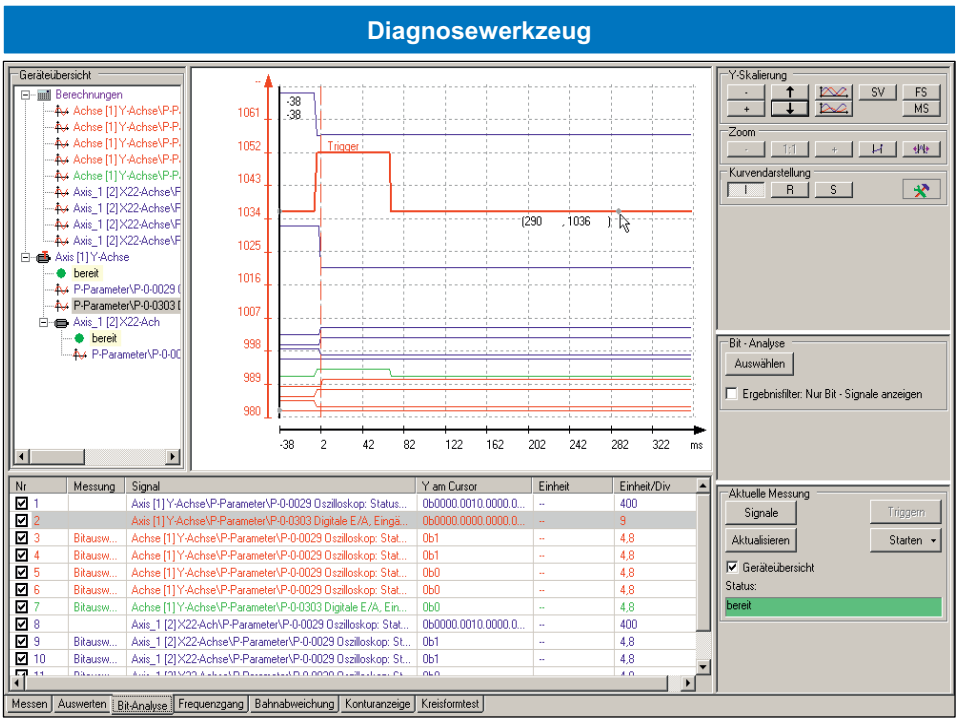


Bild 11.12 Diagnosewerkzeug. Nach Bosch Rexroth

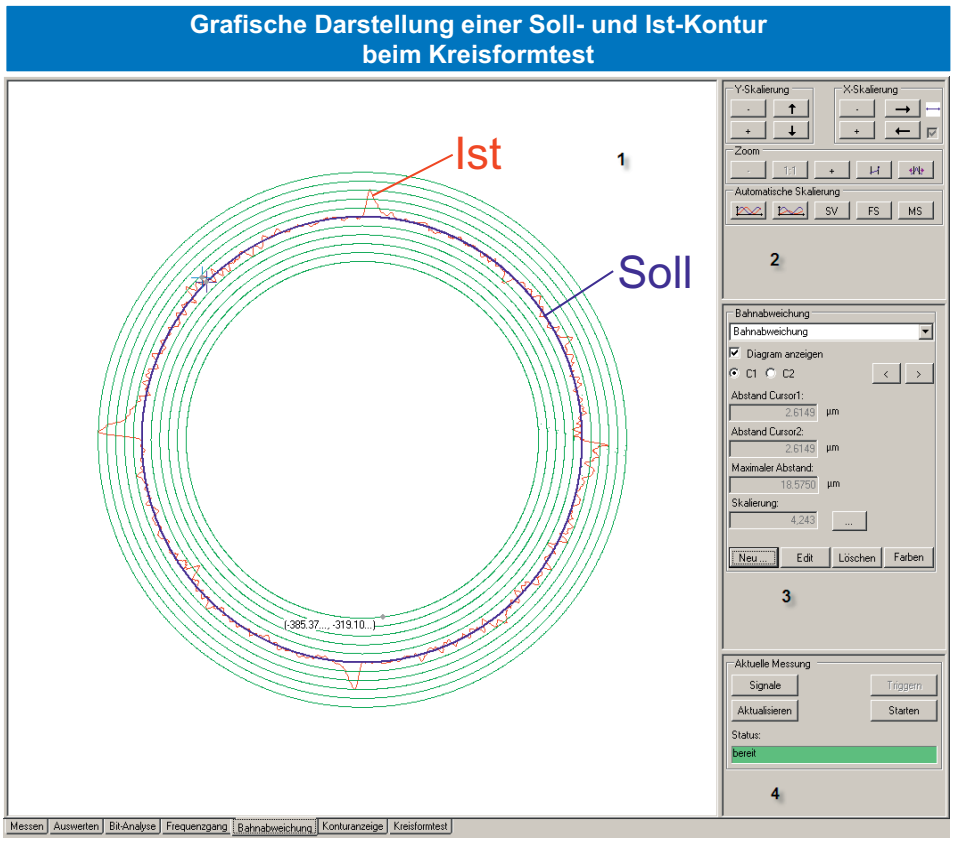


Bild 11.13 Grafische Darstellung einer Soll- und Ist-Kontur. Nach Bosch Rexroth

gelkreisen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Interpolationsarten parametriert.

Für die Inbetriebnahme sowie zur Maschinendiagnose werden von einigen Steuerungsherstellern besondere Hilfsfunktionen mit grafischer Auswertung angeboten. Zur Optimierung der Reglereinstellung kann z. B. das Verhalten eines Achsregelkreises bei unterschiedlichen Regelparametern auf dem Bildschirm der Steuerung dargestellt werden, Bild 11.12 [ROBE99].

Offsetabgleich und K_v-Faktor-Einstellung (Maß für die Verstärkung im Regelkreis) zur Achsoptimierung lassen sich damit einfach durchführen. Die zu überprüfende Maschinenachse wird mit einer definierten Weg-Zeitfunktion von der Steuerung angesteuert und die Reaktion des Antriebes in Form der Ist-Bewegung auf dem Steuerungsbildschirm zur Anzeige gebracht. Hierzu werden die Lagemesssysteme der Vorschubachsen ausgelesen. Eine Dokumentation der Regelkreiseinstellung in Abhängigkeit der Werkstückmaße ermöglicht im späteren Einsatz eine optimierte Reglervorgabe. Die grafische Darstellung der Soll- und Ist-Kontur zeigt bei genügender Auflösung der Wegmesssysteme dynamische Abweichungen bis in den µm-Bereich.

Bild 11.13 zeigt den Ist- und Sollverfahrweg für ein Werkstück auf dem Bildschirm. Hierbei können beliebige Vergrößerungen (z. B. Konturbereich des Quadrates) zur Anzeige gebracht werden.

Für einen definierten Punkt der Soll- und Ist-Kontur werden die Soll- und Ist-Position sowie die Soll- und Ist-Geschwindigkeit ausgegeben. Darüber hinaus sind Soll- und Ist-Geschwindigkeit, Soll- und Ist-Beschleunigung und der Schleppabstand für den gesamten Konturverlauf grafisch darstellbar.

Die Güte der Reglereinstellungen, die Konturtreue oder auch die Vorschubgeschwindigkeiten sind den geforderten Genauigkeitsansprüchen entsprechend anpassbar bzw. überprüfbar.

Weitere Funktionen numerischer Steuerungen

Eine Erweiterung des Funktionsumfangs von NC-Steuerungen kann durch die Integration von Softwaremodulen zur Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE / MDE) vorgenommen werden. Erfassungsdaten werden aufgeteilt in *Auftragsdaten* (Auftragsdauer, Einrichtzeit, Stückzahl, Ausschuss usw.), *Personaldaten* (Anwesenheit, Arbeitsstunden) und *Maschinendaten* (Produktionszeit, Stillstandszeit, Fehlerursachen, Fehlerzeiten usw.). Durch die statistische Auswertung der Daten kann eine Schwachstellenanalyse der Organisation und der Maschinen durchgeführt werden (vgl. ► Kap. 6.5).

Weitere Funktionalität bietet die *NC-Programmverwaltung*, die neben der Verwaltung von Informationen über NC-Haupt- und Unterprogramme (z. B. Sach-Nr., Versions-Nr., Status, Laufzeit) auch den notwendigen Fertigungshilfsmit-

telbedarf (Werkzeuge, Vorrichtungen, Messmittel) für die Bearbeitung eines Werkstücks auf Abruf bereitstellt. Es werden Funktionen zur Kollisions- und Arbeitsraumüberwachung angeboten, die der Programmierer auf bestimmten Vorschubwegen setzen kann, um die Maschine gegen Kollision zu sichern. Weiterhin sind gesteuerte Getriebeumschaltung, Bausteine zur Einhaltung konstanter Schnittgeschwindigkeiten sowie Spindelgenauhalt in mehreren definierten Positionen zum automatischen Werkstück-, Werkzeug- oder Spannmittelwechsel im Zusammenhang mit den Zusatzfunktionen für NC-Steuerungen zu nennen.

11.2.5.2 Funktionen zur Steuerung automatisierter Produktionszellen

Zur Erhöhung der Produktivität einer Fertigung ist unter anderem eine sinnvolle Verkettung der Maschinen untereinander und eine geeignete Automatisierung der Materialhandhabung der einzelnen Maschinen erforderlich. Ziel eines hoch automatisierten Produktionssystems ist es, durch eine hohe Flexibilität eine hohe Auslastung zu erreichen, die einen benutzerarmen Drei-Schicht-Betrieb ermöglicht. Um eine autarke Bearbeitung eines Auftragsvorrats unterschiedlicher Teile über einen gewissen Zeitraum ohne notwendige Eingriffe des Benutzers zu ermöglichen, muss der Standard-Funktionsumfang einer numerischen Steuerung, wie er vom Steuerungshersteller angeboten wird, ergänzt werden. Diese maschinenspezifischen Funktionen werden in der Regel vom Maschinenhersteller entwickelt und in die Steuerung integriert.

Eingangsinformationen einer NC zur Steuerung einer Fertigungszelle sind – über die NC-Programme hinaus – Daten über Werkzeuge, Paletten und Aufträge, die von der Steuerung verwaltet werden müssen. Die unterschiedlichen Aufgaben lassen sich in die Bereiche Auftrags-, Werkzeug- und Palettenverwaltung einteilen und werden dieser Aufteilung entsprechend im Folgenden beschrieben.

Auftragsverwaltung

Neben der eigentlichen Verwaltung der auszuführenden Fertigungsaufträge innerhalb der Fertigungszelle übernimmt die Auftragsverwaltung auch die Auftragsausführung. Die Aufträge werden entweder automatisch von der Leitebene an die Steuerung übergeben oder manuell vom Maschinenbediener vor Ort eingegeben. Nach der Auftragsübernahme ist die Auftragsverwaltung verantwortlich für die Bestandsführung des Materials bzw. der Werkstücke innerhalb der Zelle. In ◘ Bild 11.14 sind beispielhaft einige Daten zur Verwaltung dargestellt. Zusätzlich werden anschließend Bedarfsrechnungen für NC-Programme und Fertigungshilfsmittel (Werkzeuge, Vorrichtungen) pro Auftrag durchgeführt. Optional wird von der Auftragsverwaltung die Auftragsreihenfolge verändert oder festgelegt. Ferner übernimmt sie die Abarbeitung der einzelnen Aufträge wie Laden und Starten der NC-Programme, fertige Werkstücke auslagern oder Rohteile einlagern (vgl. ▶ Kap. 14).

Palettenverwaltung

Verfügt die Werkzeugmaschine über ein eigenes Palettentransportsystem bzw. hat sie mehrere Bearbeitungsplätze, ist eine Verwaltung der Paletten, Vorrichtungen, Puffer- und Bearbeitungsplätze erforderlich. Darüber hinaus ist der Ma-

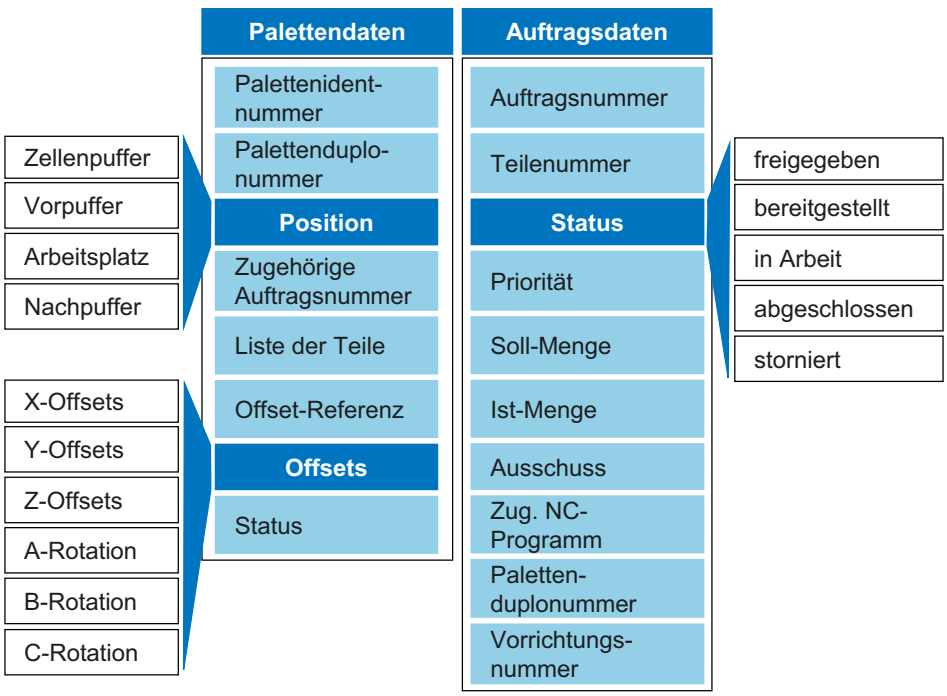


Bild 11.14 Steuerungsinterne Daten zur Auftrags- und Palettenverwaltung

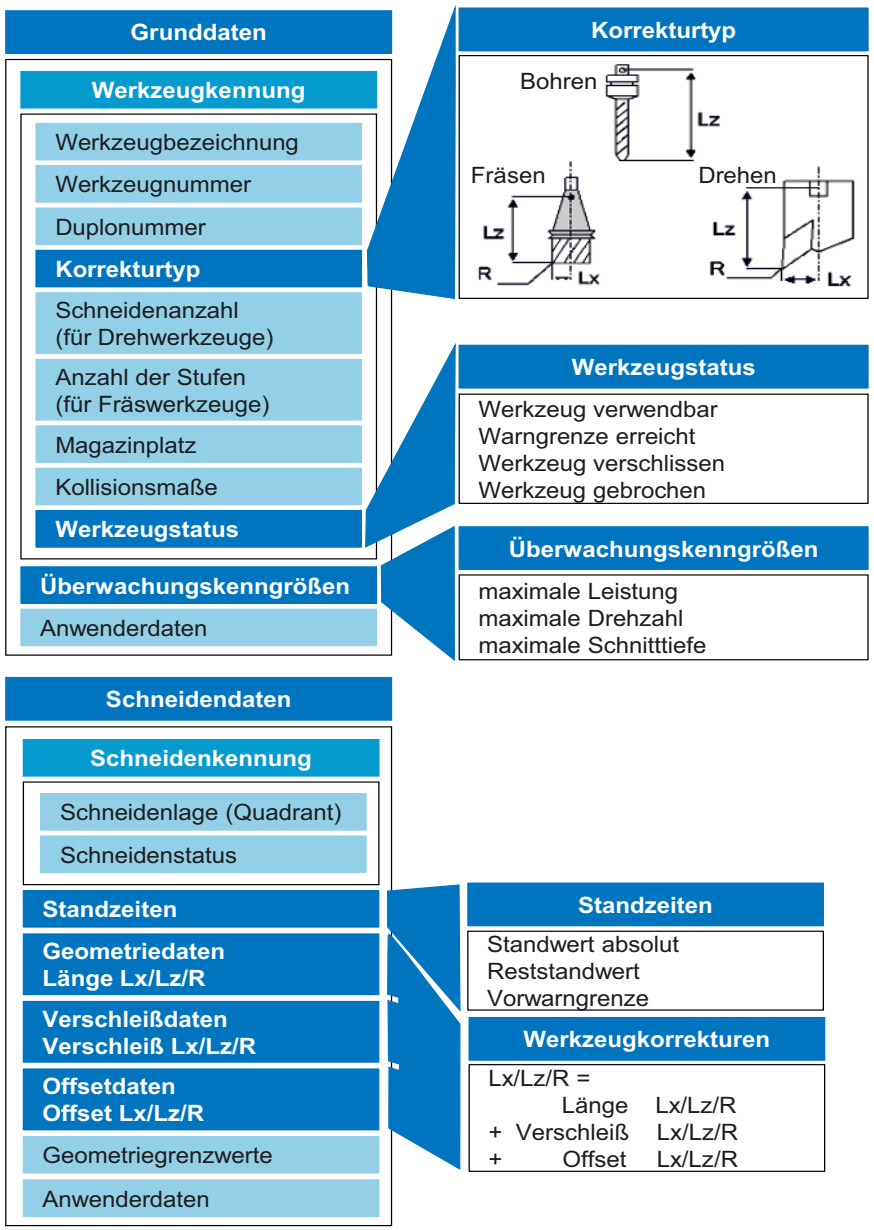
terialfluss von Paletten, Vorrichtungen, Material und Werkzeugen zu steuern.

Paletten sind Transporteinheiten, die ein oder mehrere Werkstücke oder Werkzeuge auf bestimmten vorgeschriebenen Plätzen aufnehmen und zwischenspeichern können. Dadurch können die Werkstücke/-zeuge von und zu einer Maschine mittels eines fahrerlosen Transportsystems, Rollenförderers oder schienengebundenen Transportwagens befördert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Werkstücke durch ein Handhabungssystem von der Palette in die Bearbeitungsposition und umgekehrt zu bewegen.

Aufgabe der Palettenverwaltung ist die Koordinierung des Materialflusses innerhalb der Fertigungszelle, wobei neben dem Ein- und Ausschleusen der Paletten auch Daten über Palettenstellplätze und Paletteninhalte verwaltet werden müssen. Daten einer Palette sind z. B. auf ihr befindliche Werkstücke/-zeuge, Werkstückverschiebungen und Statusinformationen, ◘ Bild 11.14.

Werkzeugverwaltung

Zur Bearbeitung eines Werkstücks (Rohteil) in einem Arbeitsvorgang sind häufig mehrere unterschiedliche Werkzeuge erforderlich. Um einen schnellen Werkzeugwechsel zwischen zwei Bearbeitungsschritten zu ermöglichen, kommen maschinennahe Werkzeugmagazine mit einer geeigneten Werkzeugwechseleinrichtung zum Einsatz. Die Werkzeuge selbst sind in der Regel über Platzcodierung im Werkzeugmagazin, Barcode oder Speicherchips (z. B. RFID-Chips) am Werkzeug eindeutig identifizierbar. Die eigentlichen Informationen wie Geometrie, Korrekturwerte oder



◘ **Bild 11.15** Steuerungsinterne Daten zur Werkzeugverwaltung. Nach Bosch Rexroth

Reststandzeiten für die einzelnen Werkzeuge werden in der NC-Steuerung oder in einer übergeordneten Werkzeugverwaltung gehalten. In Bild 11.15 sind beispielhaft einige Daten zur steuerungsinternen Werkzeugverwaltung dargestellt. Es wird hier unterschieden zwischen den Grunddaten eines Werkzeugs und den spezifischen Informationen einer Werkzeugschneide, da ein Werkzeug aus mehreren Schneiden bzw. Stufen bestehen kann.

Aufgabe der Werkzeugverwaltung ist neben der Datenverwaltung die korrekte Werkzeugauswahl und -bereitstellung für ein NC-Programm, die sich aus dem Einrichteblatt oder dem Arbeitsplan ergibt. Vor der Bearbeitung müssen sich die notwendigen Werkzeuge im Magazin oder Revolver befinden. Während der Bearbeitung wird durch einen einfachen Schaltbefehl im NC-Programm ein Werkzeugwechsel veranlasst, den die Werkzeugverwaltung nach Beendigung des letzten NC-Satzes mit dem Vorgänger-Werkzeug auszuführen hat.

Darüber hinaus überwachen moderne Systeme die Standzeit der Werkzeuge, sodass verschlissene oder defekte Werkzeuge frühzeitig durch Schwesterwerkzeuge ersetzt werden können. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Plätzen im Werkzeugmagazin und des unterschiedlichen Platzbedarfs der verschieden großen Werkzeuge bieten einige Systeme eine Werkzeugmagazinbelegungsplanung an, die die Werkzeuge platzoptimierend in das Magazin einlagert.

Da die Werkzeugverwaltung viele Schaltfunktionen für den Werkzeugwechsel veranlassen muss, ist die Software häufig auch in der SPS implementiert, vgl. ▶ Kap. 10.3. Offene Steuerungssysteme ermöglichen sinnvollere Lösungen. Zum Beispiel erlauben sie eine Trennung zwischen verwaltende Funktionen, die wesentlich einfacher auf einem PC mit Datenbankzugriff realisierbar sind, und reine Schaltfunktionen, welche in der Anpasssteuerung implementiert werden.

Werkzeugvoreinstellgerät



Bild 11.16 Werkzeugvoreinstellgerät. Nach ZOLLER

Bevor man das NC-Programm in die Steuerung eingibt und die Produktion aufgenommen werden kann, sind an der NC-Maschine einige vorbereitende Arbeiten auszuführen. Diese Tätigkeiten werden als „Einrichten" der Werkzeugmaschine bezeichnet. Im Einrichteblatt, welches in Papierform oder im Rechner vorliegen kann, sind unter anderem die benötigten Werkzeuge aufgelistet. Sie werden, bevor sie in das Magazin oder den Revolver der Maschine eingelagert werden, auf einem optischen Werkzeugvoreinstellgerät vermessen, Bild 11.16. Hierbei werden die Werkzeuge entweder beim *Einstellen* auf eine bestimmte Geometrie (Länge und Radius) eingestellt oder es wird beim *Messen* nur die Abweichung der Ist-Geometrie von der Soll-Geometrie aufgenommen.

Im ersten Fall (Einstellen) müssen die Werkzeuge eine entsprechende Einstellmöglichkeit der Länge bzw. des Radius bieten. Bei der zweiten Möglichkeit (Messen) werden die Abweichungen der Soll-Geometrie der NC-Steuerung in Form von Korrekturwerten bzw. Offsets der Werkzeugverwaltung mitgeteilt. Dies kann im einfachsten Fall durch die Eingabe der Korrekturdaten in die jeweilige NC von Hand geschehen oder über Netzwerkkopplung direkt in einer Werkzeugdatenbank abgelegt werden. Sind an den Werkzeugen Speicherchips als Identifikationsdatenträger angebracht, so können die Einstellmaße auch direkt am Werkzeug mitgeführt und vor der Bearbeitung von der Steuerung ausgelesen werden. Eine ergänzende Beschreibung der Fertigungshilfsmittelorganisation in der Werkstatt findet in ▶ Kap. 14.3.2.4 statt.

Die oben beschriebenen Erweiterungen werden in der Regel vom Maschinenhersteller für den Endanwender durchgeführt, da sie wesentlich von der Ausführungsform der Maschine und der Peripherie, wie Roboter, Werkzeug- und Palettenmagazin, beeinflusst werden. Weitere Funktionen zur Steuerung flexibler Fertigungszellen, die über den Funktionsumfang von NC-Steuerungen hinausgehen, werden in ▶ Kap. 14 beschrieben.

11.2.6 Offenheit von Steuerungssystemen

Der Markt fordert heute Maschinen und Anlagen mit ständig steigender Funktionalität. Innovative Konzepte und Rationalisierungsmaßnahmen sollen die Kosten für alle Beteiligten der Wertschöpfungskette senken. Damit verbunden ist der Wunsch der Anwender nach Unabhängigkeit von einzelnen Zulieferern. Um Flexibilität und Qualität in der Fertigung weiter steigern zu können, sind neue zusätzliche Steuerungsfunktionen notwendig. Fertigungstechnologien wie z. B. Hartfeindrehen statt Schleifen oder Laserbearbeitung fordern die Integration prozessspezifischer Funktionalitäten in die NC-Steuerung. Maschinenkonzepte wie z. B. Parallelkinematik (vgl. Band 1, ▶ Kap. 4.3.3) erfordern ebenfalls zusätzliche Funktionalitäten in numerischen Steuerungen. Die Endanwender der Maschinen fordern einheitliche und tech-

nologiespezifische Oberflächen, mit denen eine einfache Integration von Maschinen und Steuerungen unterschiedlicher Hersteller in ihr Fertigungsumfeld sowie maschinenübergreifende Planungs-, Wartungs- und Diagnosemöglichkeiten sichergestellt werden können.

11.2.6.1 Motivation und Ziele offener Steuerungssysteme

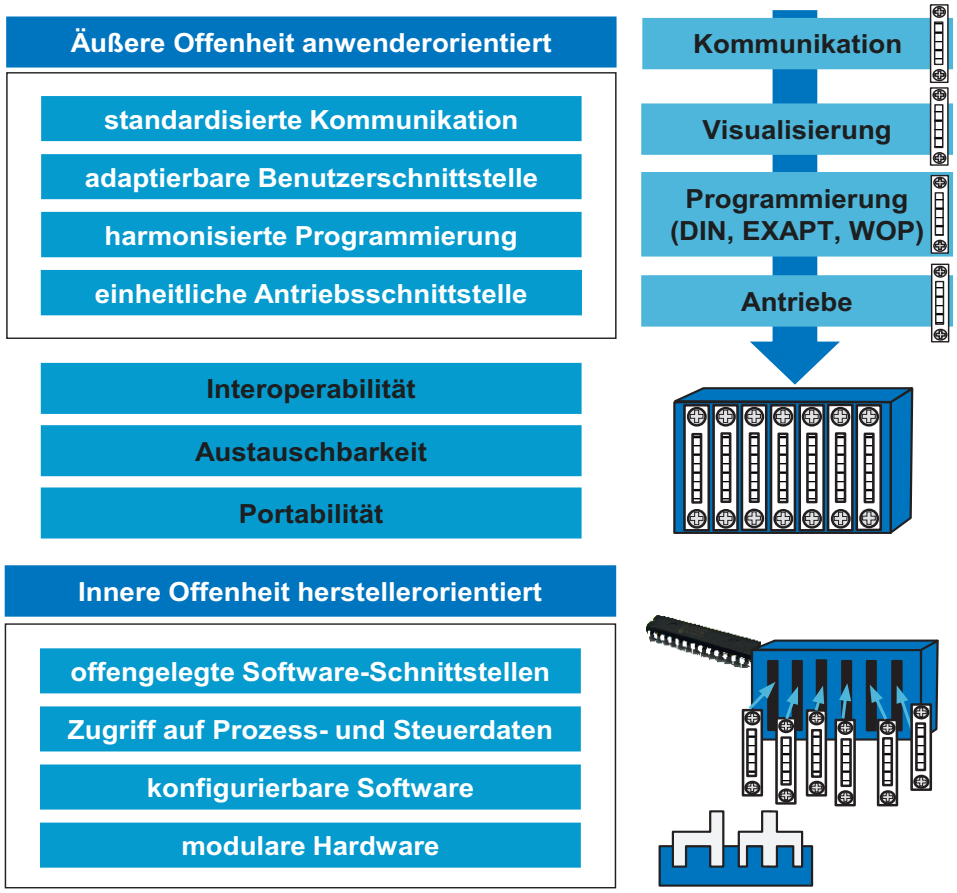
Die Erfüllung der oben beschriebenen Anforderungen kann aufgrund ihrer Vielfalt nicht vom Steuerungshersteller alleine geleistet werden. Mit dem Ziel einer schnellen Reaktion auf Kundenwünsche wandelt sich das herkömmliche Kunden-/Lieferantenverhältnis zu einer für beide wertsteigernden Partnerschaft. Der Anteil des Kunden an der Entwicklung des Steuerungsprodukts wächst zunehmend. Aus diesem Grund hat die Entwicklung offener Steuerungssysteme und die Ergänzung individueller NC-Funktionalitäten an Bedeutung gewonnen und Einzug in den Markt gehalten [WECK93].

Im Vordergrund steht hierbei die Bereitstellung offener Schnittstellen, die eine Integration zusätzlicher Software durch den Kunden in den Steuerungsverbund ermöglicht. Dies bietet dem Kunden flexible Erweiterungsmöglichkeiten der Standardfunktionalität einer NC-Steuerung und somit Gestaltungsfreiheit für innovative Lösungen. Dadurch wird z. B. den Maschinenherstellern die Möglichkeit gegeben, Software wie eine Werkzeugbruchüberwachung einfach in die Steuerung integrieren zu können.

11.2.6.2 Ausprägungen offener Steuerungssysteme

Grundsätzlich kann zwischen der „inneren" und der „äußeren" Offenheit einer Steuerung unterschieden werden, ◘ Bild 11.17 [WECK93]. Die Äußere bezieht sich auf eine Vereinheitlichung bzw. Standardisierung der externen Schnittstellen einer Steuerung, Offenheit wie z. B. eine harmonisierte NC-Programmierung, einheitliche Kommunikationsschnittstellen, eine nach gleichen Grundregeln aufgebaute und erweiterbare Benutzerschnittstelle und eine universelle Antriebsschnittstelle. Die innere Offenheit ermöglicht einen Zugriff auf die Software für die steuerungsinternen Funktionen bzw. die Integration zusätzlicher Module auf der Basis eines festen Regelwerkes. Hieraus ergibt sich, dass die innere Offenheit vorwiegend für Steuerungs- und Maschinenhersteller von Bedeutung ist, während die äußere Offenheit besonders dem Endanwender zu Gute kommt.

Hinsichtlich der *äußeren Offenheit* existieren bereits zahlreiche Normen und De-facto-Standards. Im Bereich der externen Kommunikation wird neben vielen herstellerspezifischen Lösungen auch der Standard MMS (Manufacturing



◘ **Bild 11.17** Innere und äußere Offenheit einer numerischen Steuerung

Message Specification) eingesetzt. Als Schnittstelle zu Sensoren und Aktoren haben sich gleich eine Vielzahl verschiedener Feldbusse etabliert (vgl. ► Kap. 14.3.3). Als Antriebsschnittstelle werden zunehmend digitale Lösungen eingesetzt (z. B. SERCOS, PROFIBUS-MC und Fast Ethernet, vgl. ► Kap. 2.2.3). Auf dem Gebiet der Programmierung ist der Programmaufbau nach DIN 66025 als Standard-Eingabeformat der NC anzusehen, der jedoch nach einstimmiger Meinung für komplexere Bearbeitungen nicht mehr ausreichend ist und einer dringenden Überarbeitung bedarf. Mit der ISO 14649 ist hier ein neuer Standard in Sicht (vgl. ► Kap. 11.3.2).

Hinsichtlich der *inneren Offenheit* bieten einige Hersteller inzwischen eigene Lösungen an, die sich in ihrem Ausmaß jedoch stark unterscheiden, ◘ Bild 11.18. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer *abgestuften Offenheit*, die dem Kunden je nach Anforderungsprofil Eingriffsmöglichkeiten auf verschiedenen Ebenen mit steigender Funktionalität, aber auch mit steigender Komplexität erlaubt.

Viele Hersteller bieten eine offene Schnittstelle im Bedienbereich an. Hiermit kann der Anwender zeitunkritische Software in die Steuerung integrieren und über definierte Schnittstellen auf aktuelle Daten des NC-Kerns zugreifen, ◘ Bild 11.18 oben.

Einige wenige Hersteller gehen noch einen Schritt weiter und stellen dem Kunden eine Funktionsbibliothek zur Integration eigener Software an gezielten Stellen im Datenfluss des NC-Kerns zur Verfügung. Dies ermöglicht einen direkten Zugriff auf Daten des NC-Kerns oder sogar deren Manipulation. Zur Integration eigener Software in den Echtzeitbereich einer Steuerung ist jedoch in der Regel eine aufwendige Entwicklungsumgebung erforderlich. Auf dieser Basis können beispielsweise leicht Anwendungen für externe Korrekturen (z. B. Temperaturkompensation) integriert werden, ◘ Bild 11.18 Mitte [ROBE99; SPUR93b].

Die höchste Ausbaustufe der Offenheit ermöglicht die Integration beliebiger Softwaremodule in den NC-Kern. Der Datenfluss ist parametrierbar, Softwaremodule austauschbar. Diese Variante ermöglicht dem Anwender die größten Freiheiten, erfordert jedoch auch umfangreiche Kenntnisse über die Systemstruktur der Steuerung. Sie wird von wenigen Steuerungsherstellern angeboten und bisher noch selten genutzt, ◘ Bild 11.18 unten [OSAC00; NN99].

Alle verfügbaren offenen Steuerungssysteme beschränken sich bisher auf herstellerspezifische Lösungen. Um alle Vorteile offener Systeme nutzen zu können, ist jedoch eine herstellerübergreifende Standardisierung zwingend erforderlich. Erst dann können Maschinenhersteller, Softwareanbieter und Endanwender ihre Software wiederverwenden und in anderen Steuerungen einsetzen.

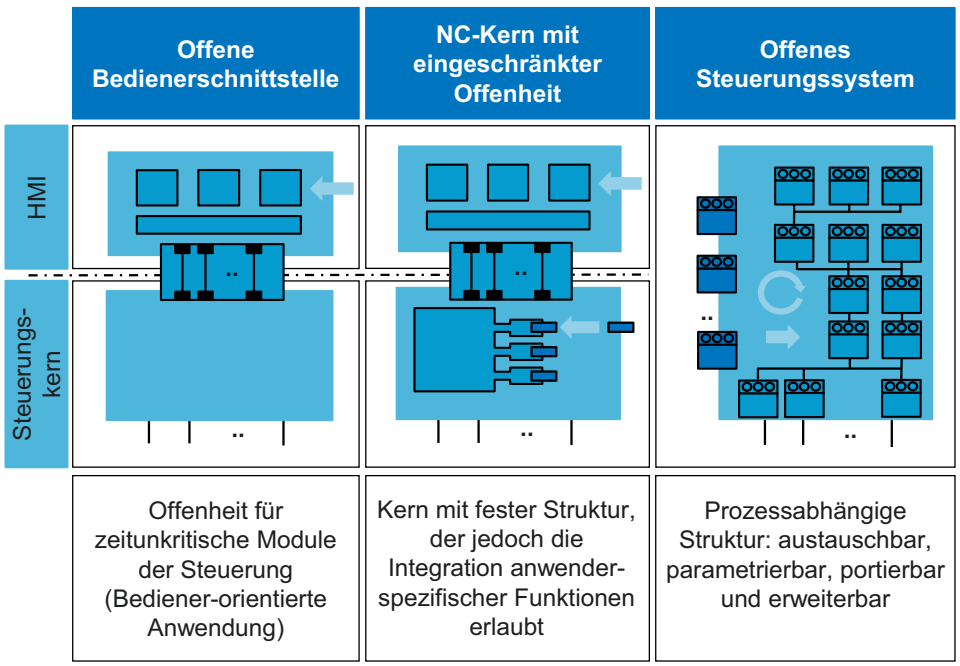


Bild 11.18 Ausprägungen offener Steuerungssysteme. Nach [WECK96]

11.2.6.3 Realisierung offener Steuerungen

Nach starken Forderungen der Anwender haben seit Anfang der 1990er Jahre parallel zu umfangreichen Forschungsaktivitäten offene Steuerungskonzepte Einzug in Produkte gehalten und sind in unterschiedlichen Ausprägungen auf den Markt gekommen. Unterschieden nach der Offenheit im Bedienbereich und im NC-Kern werden im Folgenden die realisierten Konzepte kurz vorgestellt.

Offenheit im Bedienbereich

Eine bei modernen Steuerungen verbreitete Ausprägung der Offenheit ist die Verwendung PC-kompatibler Baugruppen im Bedienbereich. Dies ermöglicht die Integration PC-kompatibler Hardware (z. B. Netzwerkkarten, Soundkarten oder externe Geräte wie Barcode-Leser) in die Steuerung. In Kombination mit dem Einsatz von Standard-Betriebssystemen (heute fast ausschließlich MS-Windows) hat der Anwender die Möglichkeit, Programme aus der Büro-Welt (Office-Programme, Editor, Datenbank, Sprachverarbeitung etc.) in die Steuerung zu integrieren. Die Einflussnahme bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche ist mittlerweile bei fast allen Steuerungen gegeben. In modernen Steuerungen wird ein Konfigurationswerkzeug zur Parametrierung und Projektierung der Benutzeroberfläche angeboten. Unter Verwendung von Standards der Windows-Betriebssysteme (Visual Basic, DDE, COM, OPC etc.) können beliebige Bedienoberflächen erzeugt und in die Steuerung integriert werden. Wichtig für den Anwender ist, dass diese Werkzeuge einfach bedienbar sind und nicht nur von Informatikern, sondern auch von Technologen bedient werden können.

Entwickelt der Anwender eigene Software, die er in den Bedienbereich integrieren möchte, so wird er in den meisten Fällen Zugriff auf Daten des NC-Kerns benötigen. Sei es zur Anzeige von Positionen oder Zuständen der Steuerung, zum Auslesen steuerungsinterner Informationen wie Werkzeugdaten oder gar zum schreibenden Zugriff auf interne Daten. Fast alle modernen Steuerungen bieten diese Möglichkeit in Form von Variablenzugriff an, Bild 11.19. Die Variablen werden in der Regel über einen Namen adressiert und können gelesen sowie teilweise auch geschrieben werden.

Der Zugriff auf die Daten geschieht aus Anwendersicht entweder in Hochsprache (z. B. C, C oder C++), über eine Funktionsbibliothek (engl. Application Programmers Interface, API) oder auf Basis standardisierter Objekte oder Komponenten, z. B. DDE (Dynamic Data Exchange), COM (Component Object Model) oder OPC (OLE for Process Control). Komponenten basieren in der Regel auf Standards aus dem Bürobereich, die von Microsoft vorgegeben werden. Dies hat den Vorteil, dass sie unabhängig von einer speziellen Programmiersprache (Visual Basic, C, C++ oder Java) verwendet und zum Teil sogar direkt aus Office-Anwendungen wie Microsoft Excel angesprochen werden können. Weiter-

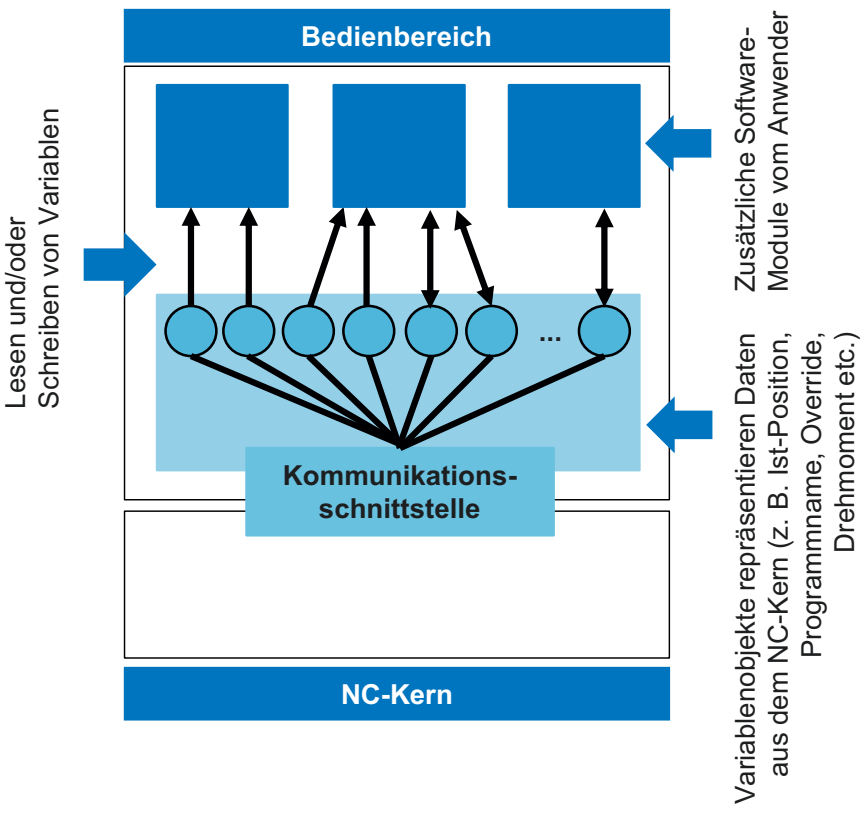


Bild 11.19 Offenheit durch Zugriff auf Daten des NC-Kerns

hin kann der Anwender die zahlreichen am Markt verfügbaren Entwicklungswerkzeuge nutzen.

Offenheit im NC-Kern

Eine Offenheit im NC-Kern zur Integration echtzeitfähiger Anwendungen bieten unter anderem die Steuerungen der Firmen Siemens (SINUMERIK 840D Reihe) und Bosch (IndraMotion MTX) sowie einiger kleinerer Firmen, die einen NC-Kern als Softwarebaukasten im Source-Code anbieten. Durch Integration maschinen- oder prozessspezifischer Software lassen sich diese Steuerungen flexibel an spezielle Anforderungen anpassen. Die Anwender haben in der Regel Zugriff auf alle Standardfunktionen der Steuerung und können diese nutzen, anpassen oder teilweise durch neue Funktionalität ersetzen. Anwendungsbeispiele für die Nutzung der Offenheit im NC-Kern sind:

- Transformation für besondere Kinematiken (z. B. komplexe Parallelkinematiken),
- Online-Kollisionsüberwachung des Arbeitsraumes,
- Abstandsregelung eines Laser-Bearbeitungskopfes,
- Steuerungsintegrierte Prozessüberwachung (Werkzeugbruch- und -verschleißüberwachung),
- Rattervermeidung,
- Thermokompensation,
- Adaptive Vorschubregelung in Abhängigkeit von der Prozesskraft beim Schruppen,
- Ankopplung einer Space-Mouse zur Sechs-Achs-Steuerung.

Die Anforderung, dem Anwender zwar möglichst viele Freiheiten zur Integration seiner Software zu geben, andererseits aber die Zuverlässigkeit und Sicherheit einer Steuerung zu garantieren, erfordert einige Einschränkungen. So wird die

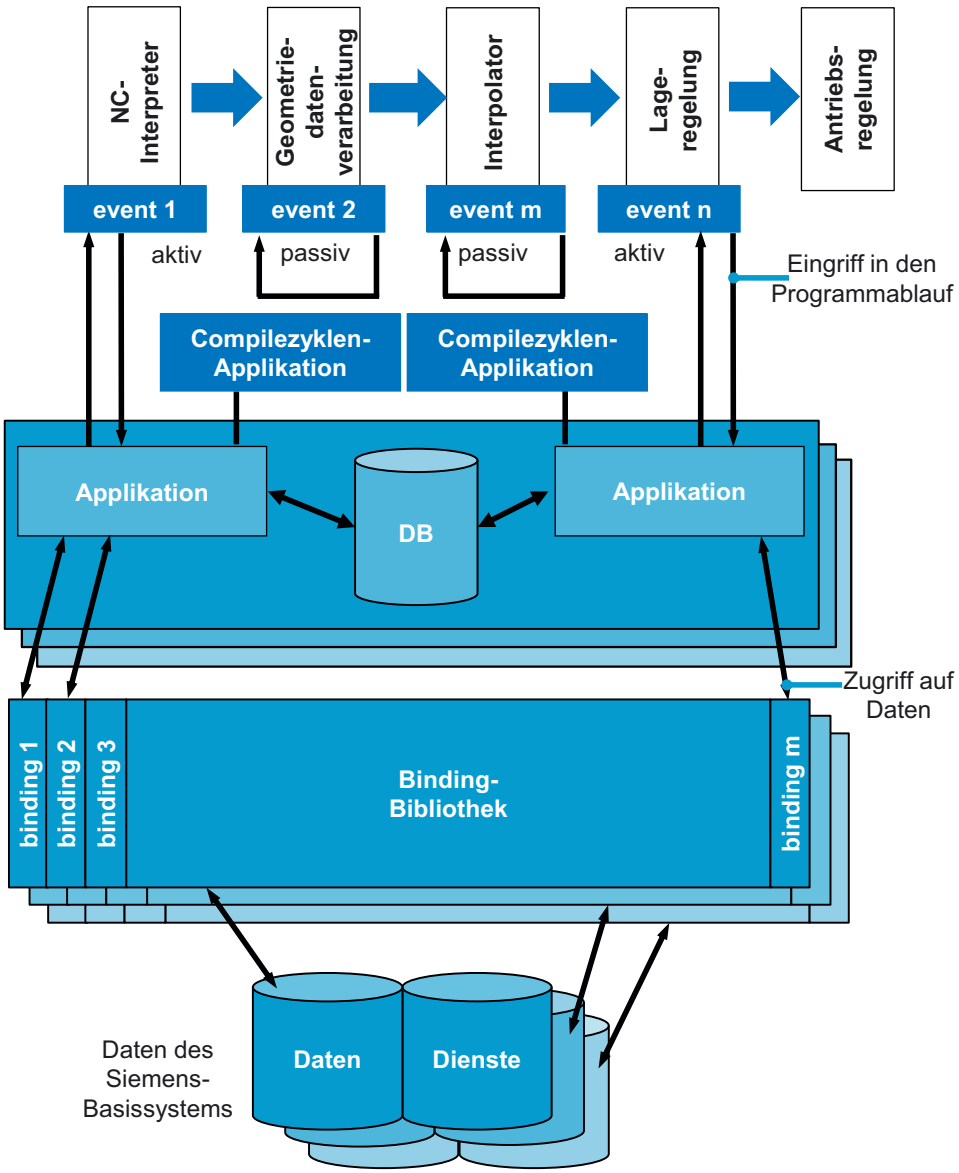


Bild 11.20 Offenheit durch Compilezyklen. Nach SIEMENS

globale Systemstruktur in der Regel vorgegeben und kann vom Anwender nicht geändert werden. Zwei unterschiedliche Systemstrukturen haben sich auf dem Markt durchgesetzt, die im Folgenden kurz beschrieben werden: Compilezyklen und Joblisten.

Compilezyklen

Die von SIEMENS verwendeten sogenannten *Compilezyklen* sind in C++ erstellte Anwendungen die – vom Kunden entwickelt – im NC-Kern eingebunden und über kundenspezifische Daten aktiviert werden können. Die Freigabe der Funktionalität erfolgt durch den Steuerungshersteller. Compilezyklen im NC-Kern bieten die gleiche Echtzeitfähigkeit wie das Basissystem. Sie werden in einer leistungsfähigen Entwicklungsumgebung für die Sprache C++ erstellt. Dabei ist die Infrastruktur des NC-Kerns mit Kommunikation zwischen Tasks, Alarm-Mechanismen, SPS-Signalen, Maschinendaten und internen NC-Sätzen nutzbar.

Ein objektorientierter NC-Kern in C++ bildet das Basissystem der Steuerung. An definierten Stellen im NC-Kern-Softwaresystem gibt es Aussprungstellen (sogenannte *Events*), an denen der Kunde eigene Software in Form von Compilezyklen einhängen kann, Bild 11.20. Events reflektieren die interne Funktionsstruktur des NC-Kerns. Sie bieten über 50 Aussprungstellen aus dem Basissystem der Steuerung. Die notwendigen Daten des Basissystems können über virtuelle Zugriffsmethoden (sogenannte *Bindings*) erreicht werden, die Bestandteil der offenen Schnittstelle sind und dadurch eine Kompatibilität zu allen künftigen Softwareständen garantieren. Gegenwärtig kann über Bindings auf ca. 700 Daten zugegriffen werden [SIEM97].

Joblisten

Eine andere Möglichkeit zur Integration kundenspezifischer Software in den NC-Kern ist das von Bosch entworfene

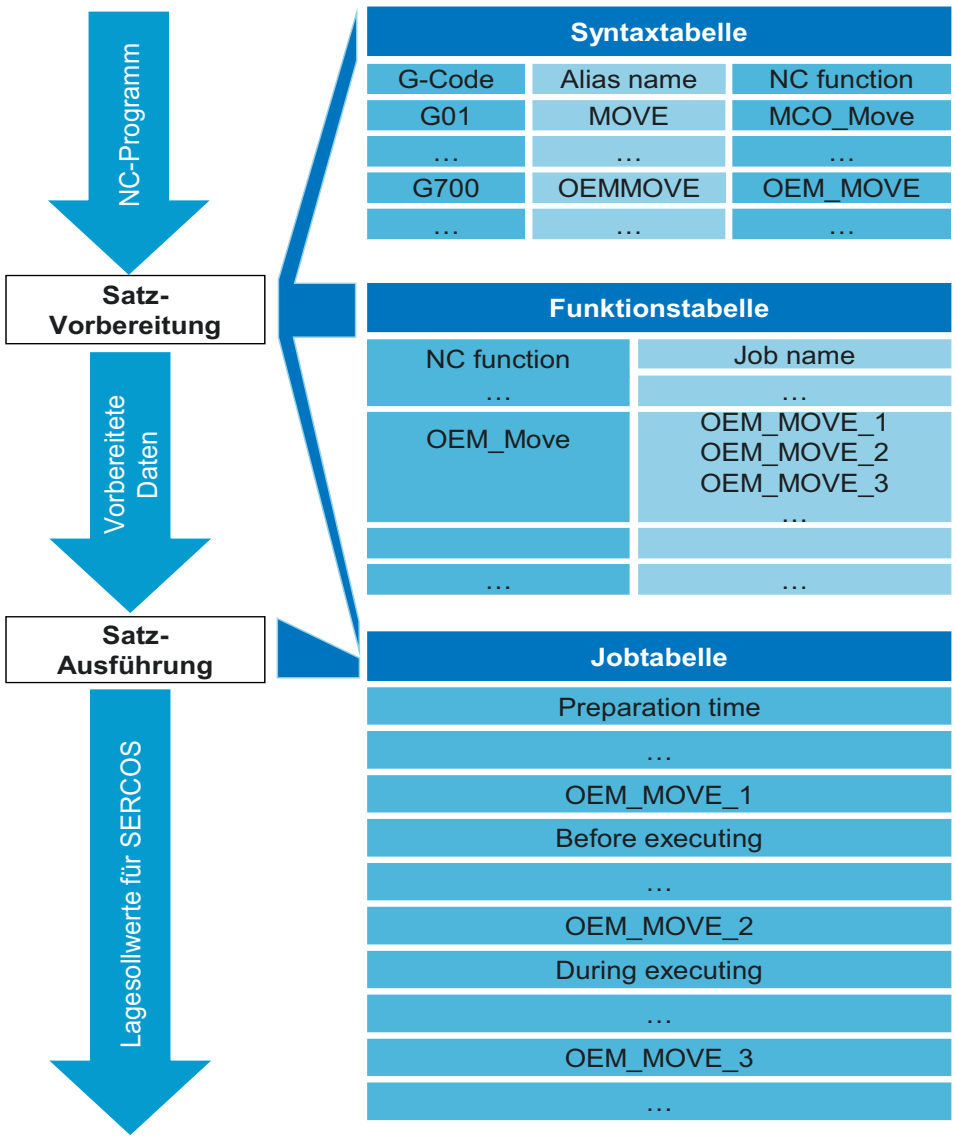


Bild 11.21 Offenheit durch Joblisten. Nach Bosch Rexroth

Konzept der *Joblisten*. Die Modularität der Steuerung wird durch die Aufteilung der Funktionalitäten in kleine, in sich geschlossene Einheiten erzielt.
Sogenannte *Subsysteme* umfassen jeweils einen abgeschlossenen Bereich der Steuerung, wie beispielsweise Satzverarbeitung oder Bewegungserzeugung. Die Kommunikation zwischen den Subsystemen erfolgt über definierte Schnittstellen. Die Funktionen der Subsysteme werden weiter unterteilt in Einzelfunktionen (sogenannte *Jobs*), die als C-Funktionen vom Anwender frei programmierbar sind, ◘ Bild 11.21.

Die Jobs können nun in Konfigurationstabellen einzelnen NC-Funktionen zugeordnet werden. Eine NC-Funktion entspricht einer Anweisung im NC-Programm, deren Funktionalität aus einem oder mehreren Jobs in der sogenannten *Jobliste* zusammengesetzt wird. Jeder Job wird gemäß seiner Priorität an einer bestimmten Stelle während der Satzvorbereitung oder auch während der Satzausführung aufgerufen. Auf Daten der Steuerung kann über eine Funktionsbibliothek (API) zugegriffen werden. Über die Konfiguration der Joblisten hat der Kunde umfangreiche Möglichkeiten, den Ablauf und das Verhalten der Steuerung zu erweitern oder zu modifizieren.

11

11.2.6.4 Herstellerübergreifende Standards für offene Steuerungen

Der Grundgedanke offener Steuerungen besteht darin, eine modulare, flexible Steuerungsarchitektur zu definieren, die es ermöglicht, eine Steuerung den Anforderungen der Anwender entsprechend flexibel anzupassen. Auf der Basis von Softwaremodulen kann eine Steuerung vom Anwender neu konfiguriert werden, indem je nach Anforderung einzelne Softwaremodule erweitert, neue hinzugefügt oder auch durch andere ersetzt werden können. Insbesondere der Anwender hat jedoch ein verständliches Interesse daran, dass offene Schnittstellen herstellerübergreifend standardisiert werden.

◘ Bild 11.22 veranschaulicht an dem Beispiel einer Steuerung, aus welchen Softwaremodulen (Bausteinen) eine Steuerung aufgebaut werden kann. Die Funktionalität der Steuerung wird zunächst in einzelne, funktional zusammengehörende Funktionsbereiche aufgeteilt. Den zentralen Teil der numerischen Steuerung bilden die Funktionsbereiche Human Machine Interface (HMI sowie HMIServer), Motion Control (MC), Axis Control (HAC) und die Kinematik der Maschine (Kinematic). Der Funktionsbereich MC koordiniert die geometrischen Berechnungen und die Bahnplanung innerhalb der Steuerung, der Funktionsbereich HAC koordiniert Gruppen einzelner Maschinenachsen und beinhaltet die Lageregelung, der Funktionsbereich Kinematic übernimmt die Aufgaben der kinematischen Transformation, das HMI umfasst die Bedienoberfläche mit ihren Zusatzfunktionen.

Jeder dieser Funktionsbereiche wird als in sich zusammenhängendes, aber von anderen Modulen weitgehend unabhängiges Softwaremodul implementiert. Damit das Gesamtsystem Steuerung funktionieren kann, ist es jedoch unerlässlich, dass zwischen diesen Modulen Informationen ausgetauscht werden. Beispielsweise wird der Programmablauf innerhalb der MC über das HMI gesteuert (1). Im Gegenzug werden Daten von der MC sowie fast aller übriger Funktionsbereiche vom HMI angefordert und visualisiert (2). Zusätzlich ist diese Beispielsteuerung mit Modulen zur Ansteuerung eines Werkzeugwechslers (TC) und eines Palettenwechslers (PCH) ausgestattet. Auch zwischen diesen Modulen werden Informationen, wie die Anforderung zum

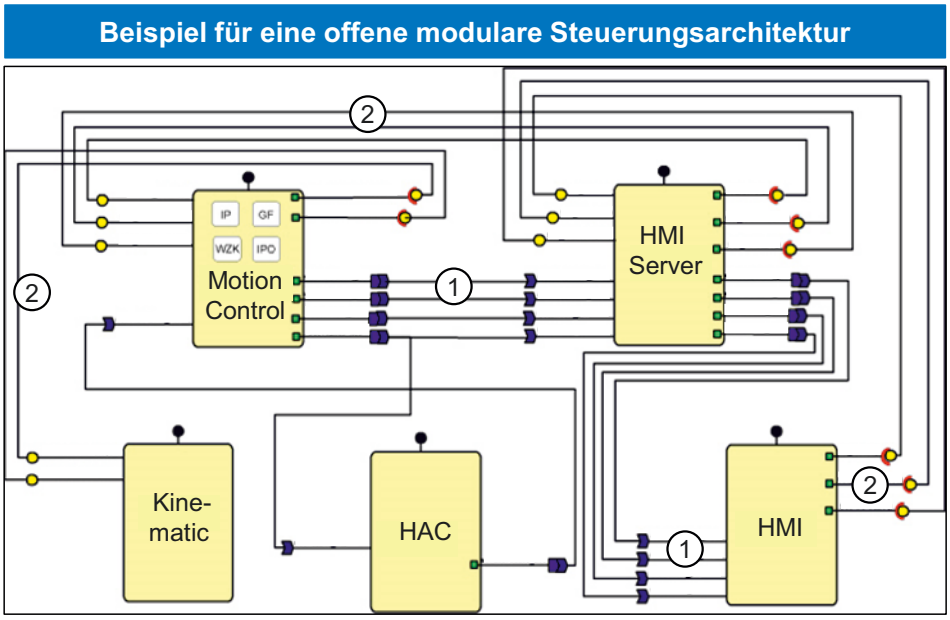


Bild 11.22 Beispiel für eine offene modulare Steuerung

Werkzeugwechsel, ausgetauscht. Die Struktur einer modular aufgebauten Steuerung bedingt somit an vielen Stellen einen Datenaustausch zwischen den einzelnen Modulen. Sowohl die sinnvolle Abgrenzung der einzelnen Funktionsbereiche gegeneinander, als auch die Definition der Schnittstellen zwischen den Funktionsbereichen sind daher Voraussetzungen, um eine herstellerübergreifende Lösung realisieren zu können. Die wesentliche, nicht gelöste Fragestellung ist das funktionierende Zusammenspiel der einzelnen Einheiten, sodass darüber hinaus auch Haftungsfragen bisher ungelöst bleiben.

11.3 Werkstückprogrammierung in der NC-Fertigung

Bei der NC-Programmierung werden alle zur automatisierten Fertigung eines Werkstücks notwendigen Informationen so dargestellt und in einem NC-Programm abgelegt, dass sie von der numerischen Steuerung einer Werkzeugmaschine eingelesen und interpretiert werden können. Zu diesen Informationen gehören geometrische Angaben zur Generierung der Werkstück- und Werkzeugbewegungen, technologische Informationen (z. B. Vorschubgeschwindigkeit und Spindeldrehzahl) sowie Instruktionen, die einen Werkzeugwechsel oder das Schalten von Zusatzfunktionen (z. B. Kühlschmiermittelpumpe, Späneförderer) bedingen.

Das NC-Programm wird entsprechend der Datenverwaltung der NC-Steuerung in unterschiedlichen physikalischen Formen abgespeichert. Während in den ersten NC-Steuerungen noch Lochstreifen eingesetzt wurden, stehen heute moderne Speichermedien (z. B. USB-Sticks und externe Festplatten) zur Verfügung, die auch in der Werkstattumgebung (Staub, Öle, magnetische Felder, Vibrationen etc.) eine sichere Speicherung der Programme ermöglichen. Durch die Anbindung der Maschine an ein Netzwerk lassen sich darüber hinaus NC-Programme innerhalb eines Unternehmens austauschen und zentral auf Servern verwalten.

Die Darstellung der Informationen im NC-Programm ist von der Programmierschnittstelle der jeweiligen NC-Steuerung abhängig. Nicht alle NC-Steuerungen basieren auf dem gleichen Datenmodell und verarbeiten Programme derselben Programmiersprache. Darüber hinaus unterscheiden sie sich in der internen Umsetzung der NC-Programme und in ihrem Funktionsumfang. Neben verschiedenen standardisierten Programmierschnittstellen gibt es daher herstellerspezifische Schnittstellen, mit denen sich die zusätzlichen, nicht standardisierten Funktionen der einzelnen Steuerungshersteller in einem NC-Programm abbilden lassen.

Entsprechend der Komplexität der in einem NC-Programm zu beschreibenden Bearbeitungsaufgabe und der Programmiersprache stehen in der Planung und an der Maschine unterschiedliche, in der Regel rechnergestützte Programmierverfahren zur Verfügung.

Bevor in ▶ Kap. 11.4 auf die verschiedenen Verfahren zur NC-Programmierung eingegangen wird, sollen im Folgenden der Aufbau eines NC-Programms erläutert und die wichtigsten Vereinbarungen hinsichtlich der Maschinenkoordinatensysteme dargestellt werden [KIEF99].

11.3.1 Aufbau eines satzbasierten NC-Programms

Die ersten NC-Programme waren entsprechend der zur Verfügung stehenden Algorithmen, Rechnerleistung und Speichermedien rein sequenziell aufgebaut. Anstatt das Werkstück und die zu seiner Fertigung notwendigen technologischen und organisatorischen Informationen zu beschreiben, enthielten sie eine starre Abfolge einzelner NC-Sätze mit Verfahranweisungen und Schaltbefehlen für eine bestimmte Werkzeugmaschine. Es handelte sich daher um die Programmierung einer NC-Maschine und nicht um die eines Werkstücks. Auf dieser Grundlage ist die wohl am weitesten verbreitete NC-Programmiersprache entstanden, die DIN 66025 bzw. ISO 6983.

Ein NC-Programm nach DIN 66025, der sogenannte „G-Code", besteht aus einer Anzahl von Sätzen, die jeweils einem Bearbeitungsschritt entsprechen. Die Bearbeitungsanweisungen in einem Satz werden durch „Wörter", einer Kombination aus Kennbuchstaben (Adresse) und Ziffernfolge, mit oder ohne Vorzeichen verschlüsselt. Die Bedeutung und die Anordnung dieser Wörter sind im Programmschlüssel der jeweiligen NC-Steuerung festgelegt, dem die DIN 66025 zu Grunde liegt. In ◘ Tab. 11.1 ist die Bedeutung der wichtigsten Wörter nach DIN 66025 zusammengestellt [DIN83b].

Die erste Anweisung in einem NC-Programm ist das Programmanfangszeichen „%". Danach folgen zeilenweise die NC-Sätze, die jeweils durch eine Satznummer „N" eingeleitet und durch das Satzendezeichen „LF" (Line Feed) beendet werden. Jeder Satz kann eine unterschiedliche Anzahl von Wörtern enthalten. Die meisten Funktionen sind selbsthaltende Funktionen, d. h. sie müssen nicht in jedem Satz neu gesetzt werden, sondern gelten so lange, bis man sie in einem neuen Satz überschreibt oder zurücksetzt. Die satzweise geltenden Funktionen sind in ◘ Tab. 11.1 gesondert mit einem Punkt gekennzeichnet.

Mit der Wegbedingung „G" (Geometrieangaben) kann der Programmierer unter anderem die Interpolationsart (linear oder zirkular), die Art der Maßeingabe (mm oder inch, inkrementell oder absolut), die Werkzeugbahnkorrektur, die Nullpunktverschiebung und Arbeitszyklen (Bohrzyklen, Zyklen zum Ausräumen von Taschen usw.) anwählen. Bewegungen in den einzelnen Maschinenachsen werden durch die Weginformation festgelegt. Sie besteht aus einem Buchstaben zur Auswahl der betreffenden Achse (X, Y, Z bei Linearach-

	Kennung	Funktion und Bedeutung
%		Programmanfang
:	1 bis 9999	Hauptsatz
N		Satznummer
/:		Ausblendbarer Hauptsatz
/N		Ausblendbarer Satz
G	00	Eilgang
	01	Geradeninterpolation
	02	Kreisinterpolation im Uhrzeigersinn
	03	Kreisinterpolation im Gegenuhrzeigersinn
	33	Gewindeschneiden
G	* 04	Verweilzeit zeitlich vorbestimmt unter Adresse X in ms
G	17	Ebenenanwahl X – Y
	15	Ebenenanwahl X – Z
	19	Ebenenanwahl Y – Z
G	39	Eckenkorrektur bei Fräserradiusbahnkompensation
G	40	Aufheben der Werkzeugkorrektur
	41	Werkzeugbahnkorrektur links, Werkzeug links vom Werkstück
	42	Werkzeugbahnkorrektur rechts, Werkzeug rechts vom Werkstück
G	53	Keine Nullpunktverschiebung
G	54	Nullpunktverschiebung 1
	55	Nullpunktverschiebung 2
G	70	Eingabesystem Zoll
	71	Eingabesystem metrisch
G	80	Aufheben des Arbeitszyklus
	81 bis 89	Arbeitszyklen
G	90	Absolutmaßeingabe
	91	Kettenmaßeingabe
G	92	Istwertspeicher-Setzen
G	94	Vorschub unter Adresse F in mm/min
	95	Vorschub unter Adresse F in mm/U
D	1 bis 99	Werkzeugkorrekturnummer
X	0 bis ± 99.999,999	Weginformation in mm
	1 bis 99.999,999	Verweilzeit in ms
Y	0 bis ± 99.999,999	Weginformation in mm
Z	0 bis ± 99.999,999	Weginformation in mm
4. Achse	0 bis ± 99.999,999	Weginformation in mm oder in Grad
		Mögliche Adressen A, B, C, U, V, W
R	0 bis n	Parameter (beispielsweise für Unterprogramme)
I	0 bis ± 99.999,999	Interpolationsparameter für X-Achse für Kreisinterpolation
	Oder	Gewindesteigung in mm
	1 bis 2000,000	
J	0 bis ± 99.999,999	Interpolationsparameter für Y-Achse für Kreisinterpolation
	Oder	Gewindesteigung in mm
	1 bis 2000,000	
K	0 bis ± 99.999,999	Interpolationsparameter für Z-Achse für Kreisinterpolation
	Oder	Gewindesteigung in mm
	1 bis 2000,000	
F	0 bis Fmax	Vorschub in mm/min bzw. in mm/U
S	0 bis Smax	Spindeldrehzahl in min^{-1}
T	1 bis 9999	Werkzeugnummer
H	1 bis 999	Hilfsfunktionen
L	01 bis 99	Nummer des aufzurufenden Unterprogramms
M	* 00	Programmierter Halt, unbedingt
	01	Programmierter Halt, bedingt
	02	Programmende ohne Rückspulen, steht im letzten Satz des Programms
	30	Programmende mit Rückspulen bis Programmanfang, sieht im
		letzten Satz des Programms
M	03	Spindeldrehrichtung rechts
	04	Spindeldrehrichtung links
	05	Spindel Halt
M	00 bis 99	Zusatzfunktionen, zum Teil frei belegbar
(		Anmerkungsbeginn
)		Anmerkungsende
LF		Satzende
	Kennung	Funktion und Bedeutung
%		Programmanfang

Tab. 11.1 Auszug aus dem Programmschlüssel der DIN 66025

sen und *A*, *B*, *C* bei Drehachsen, Bild 11.24) und einer Ziffernfolge zur Angabe der Wegstrecke bzw. der Drehwinkel. Beim Verfahren von kreisförmigen Bahnen wird durch die Kreisinterpolationsparameter *I*, *J*, *K* die relative Lage des Kreisbogenmittelpunktes zum Startpunkt des Kreisbogens angegeben.

Zusätzlich zu diesen geometrischen Informationen, die die Werkzeugbewegungen beschreiben, enthält ein NC-Programm technologische Instruktionen zur Werkstückbearbeitung:

Das Wort *F* (Feed) gibt die Vorschubgeschwindigkeit in mm/min oder den (Umdrehungs-)Vorschub in mm/U an. Die Auswahl wird durch die Verwendung des Befehls G94 bzw. G95 getroffen (Tab. 11.1). Die Spindeldrehzahl in min^{-1} wird durch das Wort S (Spindelrotation) programmiert.

Bei Maschinen mit Werkzeugwechsler kann durch den Befehl T (Tool) ein Werkzeug ausgewählt werden. Zu jedem Werkzeug sind unter der zugehörigen Korrekturnummer D oder aber in einer steuerungseigenen Datenbank die Werkzeuggeometriedaten für eine spätere Werkzeugkorrektur abgelegt. Mit diesen Informationen lassen sich bei der Programmabarbeitung der Werkzeugradius, die Werkzeuglänge oder der Werkzeugdurchmesser korrigieren.

Für das Fräsen stellt die Fräserradiuskorrektur eine wichtige Hilfe bei der NC-Programmerstellung dar. Anstelle der Bahn des Werkzeugmittelpunktes wird bei aktiver Korrektur die zu fertigende Werkstückkontur programmiert. Der Steuerung wird über die G-Worte G41 und G42 die relative Lage des Werkzeugs zum Werkstück in Bewegungsrichtung mitgeteilt. Dadurch kann in der Steuerung bei der Generierung der Achsbewegungen der Werkzeugdurchmesser senkrecht zu der Bahnrichtung verrechnet werden. Liegt das zu zerspanende Material rechts von der Werkzeugbahn, wird G41 gesetzt, ansonsten G42.

Bei der Programmierung eines Drehprozesses ist eine solche Unterscheidung nicht notwendig. Eine Vielzahl von Steuerungen nutzt G46 zur automatischen Korrektur des Schneidenradius. Die Richtung, in die sich die Korrektur auswirken soll, ergibt sich aus der steuerungsintern zu speichernden Lage des Drehmeißels, ◘ Bild 11.27.

Die zahlreichen Zusatzfunktionen, wie z. B. Spindel-Rechtslauf-Linkslauf, Getriebestufenumschaltung, Kühlmittel-Ein-Aus oder Programmende, werden durch M-Worte (Miscellaneous functions) angegeben. Die L-Funktion bewirkt einen Aufruf von Unterprogrammen. Sie erspart die Programmierung häufig wiederkehrender Bearbeitungszyklen, wie sie z. B. bei Schnittaufteilungen oder Bohrbildern vorkommen. Es sind dann lediglich die veränderlichen Größen als Parameter (Siemens: R-Parameter) neu zu setzten und an das Unterprogramm zu übergeben.

Das Programmende ist durch die Zusatzfunktion M02 festgelegt. M30 ist eine Funktion, die zu Zeiten der Verwendung von Lochstreifen notwendig war, um diese am Programmende wieder zum Anfang zurückzuspulen. Ursprünglich war der Lochstreifen das gängigste Speichermedium für NC-Programme, da entsprechende Speichermedien noch nicht in der Steuerung zur Verfügung standen oder zu anfällig gegenüber Verschmutzungen und magnetischen Feldern im Werkstattbereich waren.

Heute verfügen NC-Maschinen über interne Speicher und sind in der Lage, komplette Programme oder Programmteile einzulesen und erst zu einem späteren Zeitpunkt auszuführen.

Die Übertragung der Programme in die Steuerung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. In vielen Fällen werden die Programme von Disketten oder USB-Sticks eingelesen. Andere sinnvolle Möglichkeiten der Programmübertragung stellen serielle Schnittstellen (beispielsweise zu werkstattnahen PCs) und der DNC-Betrieb dar. Im DNC-Betrieb, der die Aufgaben der NC-Programmverwaltung und -verteilung beinhaltet, steht ein Rechner mit großer Plattenkapazität direkt über ein LAN (Local Area Network) in Verbindung mit mehreren Werkzeugmaschinen. Die erforderlichen NC-Programme oder Programmteile lassen sich dann über das Netzwerk von den Werkzeugmaschinensteuerungen oder bei alten Steuerungen ohne eigenen Festspeicher über DNC-Terminals anfordern.

11.3.2 Aufbau eines objektorientierten NC-Programms

Gegenüber der DIN 66025 werden in einem objektorientiert aufgebauten NC-Programm die Informationen, die zur Ausführung einer Bearbeitung notwendig sind, nicht sequenziell in einzelne Sätze aufgeteilt, sondern in größeren logischen Einheiten zusammengefasst und strukturiert abgelegt. Das hat den Vorteil, dass zu jedem Zeitpunkt der Bearbeitung nicht nur eine Verfahranweisung (z. B. G01 X…) oder ein Schaltbefehl (z. B. M06) im NC-Programm vorliegen, sondern stets der Zusammenhang zum aktuellen Bauteilmerkmal oder zum gesamten Werkstück hergestellt werden kann. Mit der höherwertigen Programminformation lassen sich in der numerischen Maschinensteuerung intelligente Funktionen, wie Rückzugstrategien, eine Kollisionsüberwachung oder die Umplanung der Bearbeitung für ein neues Werkzeug zur Laufzeit in der Steuerung realisieren.

Ein Beispiel für eine objektorientierte Programmierschnittstelle ist die ISO 14649-FDIS, kurz STEP-NC genannt, die im Rahmen eines internationalen Projektes STEP-NC weiterentwickelt wurde. Das Datenmodell der ISO 14649 ist an das von STEP (ISO 10303) angelehnt. Neben der Sprachdefinition (Part11, Part21) werden auch Teile der geometrischen Beschreibung (IR 42/43) und Featuredefinition (AP214/224) aus STEP übernommen. Diese Datenelemente werden heute schon in modernen CAD/CAM-Systemen verarbeitet und als Austauschformat für Geometrieinformationen eingesetzt. Über ein einheitliches Datenformat von der Planung bis in die Fertigung lassen sich einmal erstellte Produktdaten mehrfach verwenden, ohne sie neu generieren zu müssen. Fehler und Ungenauigkeiten, wie sie beispielsweise bei der Umrechnung von Geometrieinformationen auftreten, werden vermieden. Dieser Gedanke wird vor allem von großen Unternehmen, die an vielen Orten produzieren und damit auch NC-Programme austauschen müssen, vorangetrieben. In ◘ Bild 11.23 ist vereinfacht ein kleiner Ausschnitt des Datenmodells der ISO 14649 in EXPRESS-G dargestellt. EXPRESS ist eine Sprache zur Darstellung von Datenstrukturen. EXPRESS-G ist die entsprechende grafische Darstellungsform.

Die ISO 14649 sieht eine Trennung in geometrische und technologisch operative Daten vor. Weiterhin werden die geometrischen Daten entsprechend ihrer Freiheitsgrade unterteilt in 2½D und 3D Elemente. Im Fall einer 2½D-Bearbeitung wird lediglich in zwei Achsen interpoliert, während die dritte Achse um fest vorgegebene Werte zugestellt wird. Hierzu zählen Elemente wie Bohrungen, Taschen, Nuten etc.: sogenannte Bearbeitungsfeatures (machining_feature). Freiformflächen

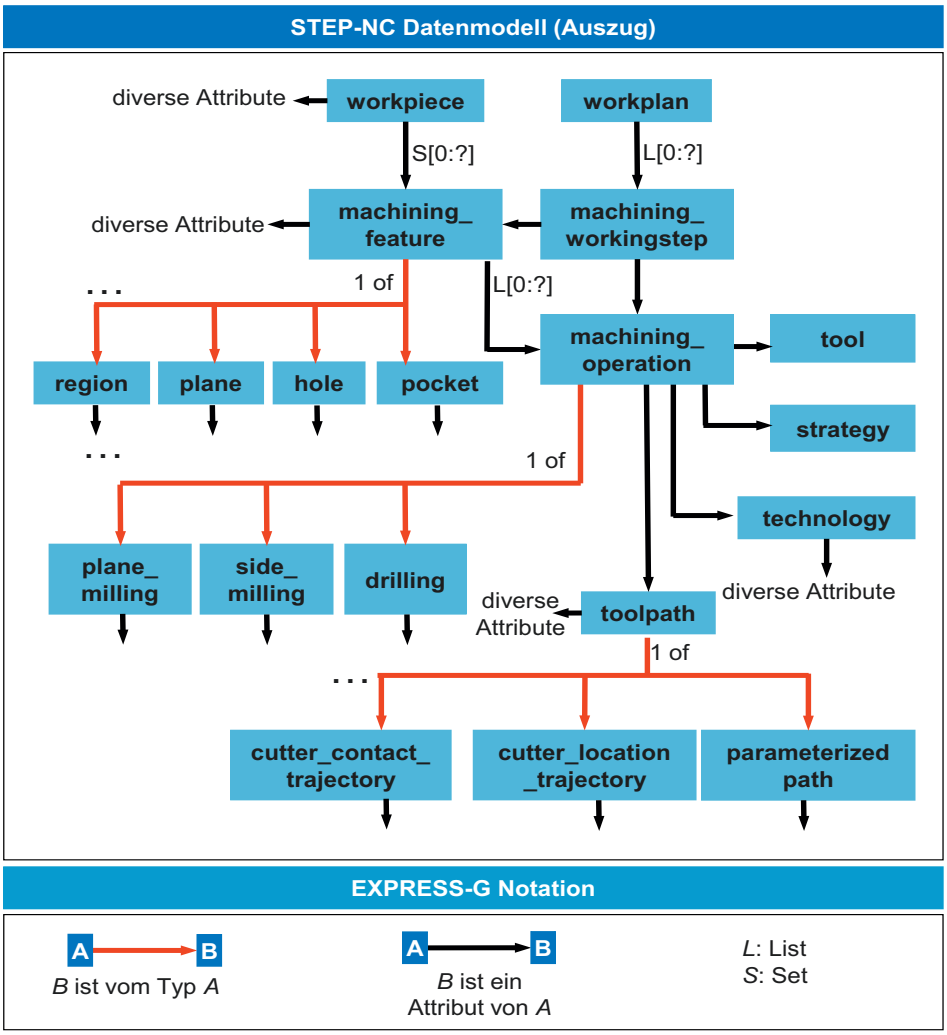


Bild 11.23 Vereinfachtes Datenmodell der ISO 14649

werden durch spezielle Flächenfeatures beschrieben. Das Werkzeug, die Schnittdaten, die Strategie etc. sind dagegen nicht zwangsläufig nur auf ein Bauteilmerkmal anwendbar und werden deswegen global als Operation (machining_operation) in einem eigenständigen Objekt beschrieben. Um spezielle oder optimierte Bahnstrategien zu programmieren, gehört zu der „machining_operation" das Attribut „toolpath". Hierunter werden vorab definierte Werkzeugbahnen gespeichert. Auf diese Weise ist es beispielsweise möglich, die genauen Bearbeitungsbahnen für ein Feature vorzugeben. Anderenfalls werden erst in der Steuerung die Verfahrwege entsprechend der gewählten Strategie berechnet.

Erst über den Arbeitsschritt (machining_workingstep) wird der Steuerung mitgeteilt, welche Operation an einem Feature auszuführen ist, d. h. wie eine Geometrie zu bearbeiten ist. In der Steuerung werden dann die entsprechenden Fertigungsfeatures aufgelöst und Verfahrwege generiert, eine Aufgabe, die, abgesehen von der Zyklenprogrammierung, bislang von CAD/CAM-Systemen übernommen wird [ISO00].

Durch den objektorientierten Aufbau liegt in der Steuerung ein strukturiertes Modell der gesamten Bearbeitungsaufgabe vor. Dieses kann zur visuellen Darstellung oder aber für zusätzliche Funktionalitäten seitens der Steuerung genutzt werden. Die umfassenden geometrischen, technologischen und organisatorischen Informationen liegen als strukturierte Einheiten in einem objektorientierten Format vor. Der Informationsaustausch zwischen CAD-, CAP-, CAM-Systemen und NC-Steuerungen, die eine Schnittstelle für ein solches, umfassendes Datenformat besitzen, wird sicherer, da Datenkonvertierungen zwischen den Systemen entfallen. Änderungen lassen sich besser in allen Systemen nachhalten. Wenn sich beispielsweise beim Einfahren eines NC-Programms Änderungen ergeben, können diese direkt an der Maschine vorgenommen und über das NC-Programm an die Planung zurückgegeben werden [BROU00].

Indem das NC-Programm geometrische und technologisch operative Daten trennt, ist die Beschreibung weitestgehend steuerungsneutral. NC-Programme können zwischen einzelnen Werkzeugmaschinen einfacher ausgetauscht werden. Unterschiede in der Steuerungs- und Maschinenfunktio-

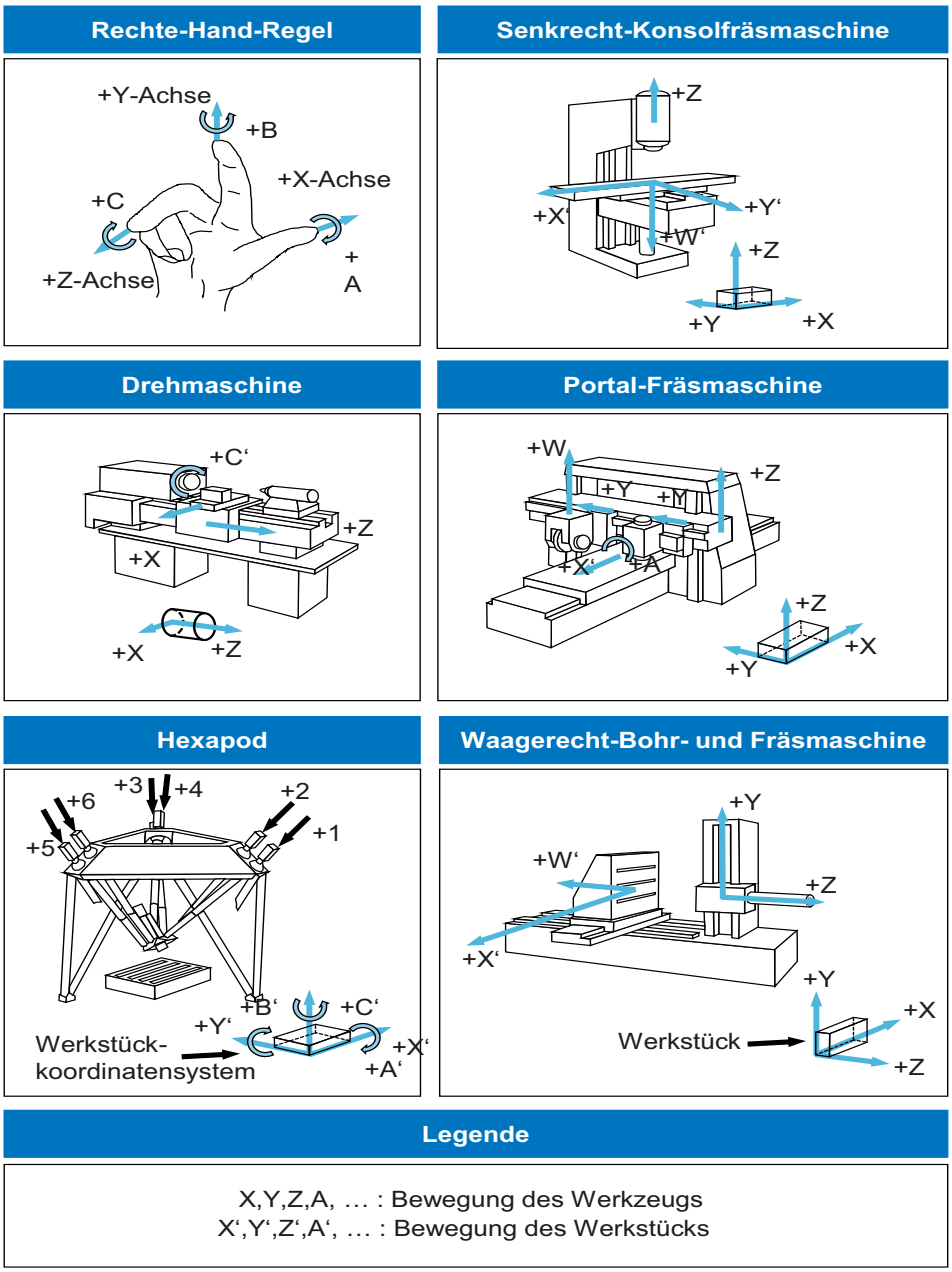
nalität werden durch Programmänderungen an wenigen, einfach aufzufindenden Stellen in den Operationsdefinitionen schnell und einfach realisiert. Beispielsweise hat eine geänderte Schnitttiefe keine Neukalkulation aller Verfahrbewegungen, wie im Fall der Programmierung nach DIN 66025, zur Folge. Stattdessen wird das entsprechende Attribut geändert, und erst zur Laufzeit an der Maschine generiert die Steuerung – welche mitunter besser als jedes CAD/CAM-System an die Maschine angepasst ist – die entsprechenden Bahnen.

Aufgrund des umfangreichen Datenmodells und seiner Vielzahl an Attributen lässt sich das NC-Programm jedoch nur schwer über einen Texteditor editieren. Ein maschinelles Programmierverfahren oder spezielle Browser sind notwendig [BROU00].

11.3.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte

Die Festlegung von Koordinatensystemen und Bezugspunkten im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine ist eine notwendige Voraussetzung für die Beschreibung der Bearbeitungsbewegungen. In Bild 11.24 ist die Lage der Koordinatensysteme, wie sie in der DIN 66217 für konventionelle Werkzeugmaschinen und zusätzlich für eine Parallelkinematik definiert sind, dargestellt. Die Anzahl und die Art der Achsen sind maschinenabhängig. Es wurden folgende, für konventionelle Kinematiken allgemeingültige Festlegungen getroffen: Verwendet wird ein rechtshändiges, rechtwinkliges Koordinatensystem mit den Achsen *X*, *Y* und *Z*, das auf die Hauptführungsbahnen der Maschine ausgerichtet ist und sich

Bild 11.24 Koordinaten von Werkzeugmaschinen. Nach DIN 66217



auf das in der Maschine eingespannte Werkstück bezieht (Rechte-Hand-Regel). Die *Z*-Achse liegt parallel zur Achse der Arbeitsspindel bzw. fällt mit ihr zusammen. Die positive Richtung der *Z*-Achse verläuft vom Werkstück zum Werkzeug bzw. bei Drehmaschinen von der Arbeitsspindel zum Werkstück.

Die *X*-Achse ist die Hauptachse in der Positionierebene. Sie liegt grundsätzlich parallel zur Werkstückaufspannfläche und verläuft, wenn möglich, horizontal. Sind Koordinatenachsen parallel zur *X*-, *Y*- oder *Z*-Achse vorhanden, so werden diese mit *U*, *V* und *W* bezeichnet. Die Buchstaben *A*, *B*, *C* kennzeichnen Drehachsen, wie z. B. Drehtische, die den *X*-, *Y*-, *Z*-Koordinaten zugeordnet sind. Der positive Drehsinn ist nach der „Rechtsschraubenregel" festgelegt, ◘ Bild 11.24.

Zur Erzeugung der Positionierbewegung kann entweder das Werkzeug oder das Werkstück verfahren werden. Wird das Werkzeug bewegt, dann stimmt die positive Bewegungsrichtung mit der positiven Achsrichtung überein und sie wird mit $+X$, $+Y$ usw. bezeichnet. Bei Bewegung des Werkstücks ist die positive Bewegungsrichtung der Achsrichtung entgegengerichtet, sie wird mit $+X'$, $+Y'$ usw. bezeichnet. Im ersten Fall spricht man auch von Werkstückkoordinaten, im zweiten von Werkzeug- oder Maschinenkoordinaten. Für die Drehachsen *A*, *B*, *C* gilt Entsprechendes.

Da das Koordinatensystem auf das Werkstück bezogen ist, erfolgt die Programmierung unabhängig davon, ob bei der Bearbeitung das Werkzeug oder das Werkstück bewegt wird. Der Programmierer nimmt immer an, dass sich das Werkzeug relativ zum Koordinatensystem des stillstehend gedachten Werkstücks bewegt.

Zur Programmierung der Spindeldrehrichtung bei einer Dreh-, Fräs- oder Bohrmaschine sei an dieser Stelle eine Merkregel angeführt: Es gilt die Schraubenregel, nach der bei positiver Drehrichtung eine rechtsgängig gedachte Schraube (= Werkzeug) festgezogen wird. Zum Bohren mit einem Rechtsbohrer sollte z. B. Spindelrechtslauf, d. h. M03, programmiert werden.

Außer den Koordinatensystemen sind an jeder numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine verschiedene Bezugspunkte definiert. Die wichtigsten sind in ◘ Bild 11.24 aufgezeigt. Mit ihrer Hilfe wird der Bezug zwischen der Lage des Werkstücks im Arbeitsraum und der Stellung des Werkzeugs hergestellt.

11.3.3.1 Maschinen-Nullpunkt *M*

Über den Maschinen-Nullpunkt legt der Hersteller den Ursprung des Maschinenkoordinatensystems fest. Er ist direkter oder indirekter Ausgangspunkt für alle anderen Bezugs-, Referenz- und Nullpunkte. Durch das NC-Programm lässt sich der Maschinen-Nullpunkt nicht verändern.

11.3.3.2 Referenzpunkt *R*

Der Referenzpunkt ist ein durch Endschalter (grob) und das Messsystem (fein) auffindbar festgelegter Punkt. Er liegt in der Regel im Randbereich des Arbeitsraumes, damit er auch bei aufgespanntem Werkstück kollisionsfrei angefahren werden kann. Der Referenzpunkt wird bei der Inbetriebnahme der Maschine auf einen festen Abstand XMR, ZMR zum Maschinennullpunkt gesetzt und bleibt dann unverändert.

Durch den Befehl „Referenzpunktfahrt" kann der Referenzpunkt von Hand oder per SPS-Programm mit einer Genauigkeit von einem Weginkrement (in der Regel im Bereich von 0,1 bis 1 µm) angefahren werden. Bei Maschinen mit zyklisch-absolutem oder inkrementellem Messsystem ist nach jedem Neueinschalten der Maschine eine Referenzpunktfahrt erforderlich. Es werden dann automatisch die Ist-Positionszähler der Steuerung auf Null oder auf andere bei der Inbetriebnahme vorgegebene Werte, z. B. *XMR*, *ZMR*, ◘ Bild 11.25, gesetzt.

11.3.3.3 Werkstücknullpunkt

Der Werkstücknullpunkt ist der Ursprung des Werkstückkoordinatensystems, auf das sich die Teileprogrammierung bezieht. Seine Lage wird vom Programmierer frei definiert und sollte dort angeordnet werden, von wo in der Zeichnung die meisten Maße ausgehen. Bei Drehteilen ist das üblicherweise der Schnittpunkt der Rotationsachse mit der Bezugskante der Längenvermaßung. Für die Bearbeitungssituation nach ◘ Bild 11.25 würde der Maschinenbenutzer beispielsweise über das Maß *ZMW* den Werkstücknullpunkt relativ zum Maschinennullpunkt setzen. Dadurch vereinfacht sich für ihn die NC-Programmierung, da er die Maße unmittelbar aus der Zeichnung übernehmen kann.

11.3.3.4 Werkzeugbezugspunkt *E*

Die Maße, die beim Vermessen des Werkzeuges bestimmt worden sind und die zur Werkzeugkorrektur im Werkzeugdatenspeicher abgelegt werden müssen, beziehen sich auf den Werkzeugbezugspunkt.

Der Werkzeugbezugspunkt fällt beim Fräsen mit dem Werkzeugaufnahmepunkt *N* in der Werkzeugaufnahme und beim Drehen mit dem Schlittenbezugspunkt *F* zusammen.

Die Lage des Werkzeugbezugspunktes ist nicht eindeutig definiert, da die Aufnahme in der maschinenseitigen Werkzeugaufnahme nicht formschlüssig an einem Flansch anliegend, sondern in einem Konus aufgenommen wird. Daher muss dieser für die Werkzeugeinstellung notwendige Punkt in Abhängigkeit von Maschine und Aufnahme bestimmt werden. Je weiter der Kegel in den Konus der Aufnahme der Arbeitsspindel eintaucht, desto weiter liegt der Punkt „*E*" in Richtung Werkzeug. Bei Schnittstellen mit definierter Planauflage, wie z. B. der HSK, tritt dieses Problem nicht auf.

11.3.3.5 Werkzeugaufnahme- N und Schlittenbezugspunkt

Beim Fräsen spricht man von einem Werkzeugaufnahmepunkt *F*, beim Drehen vom Schlittenbezugspunkt *F*. Die

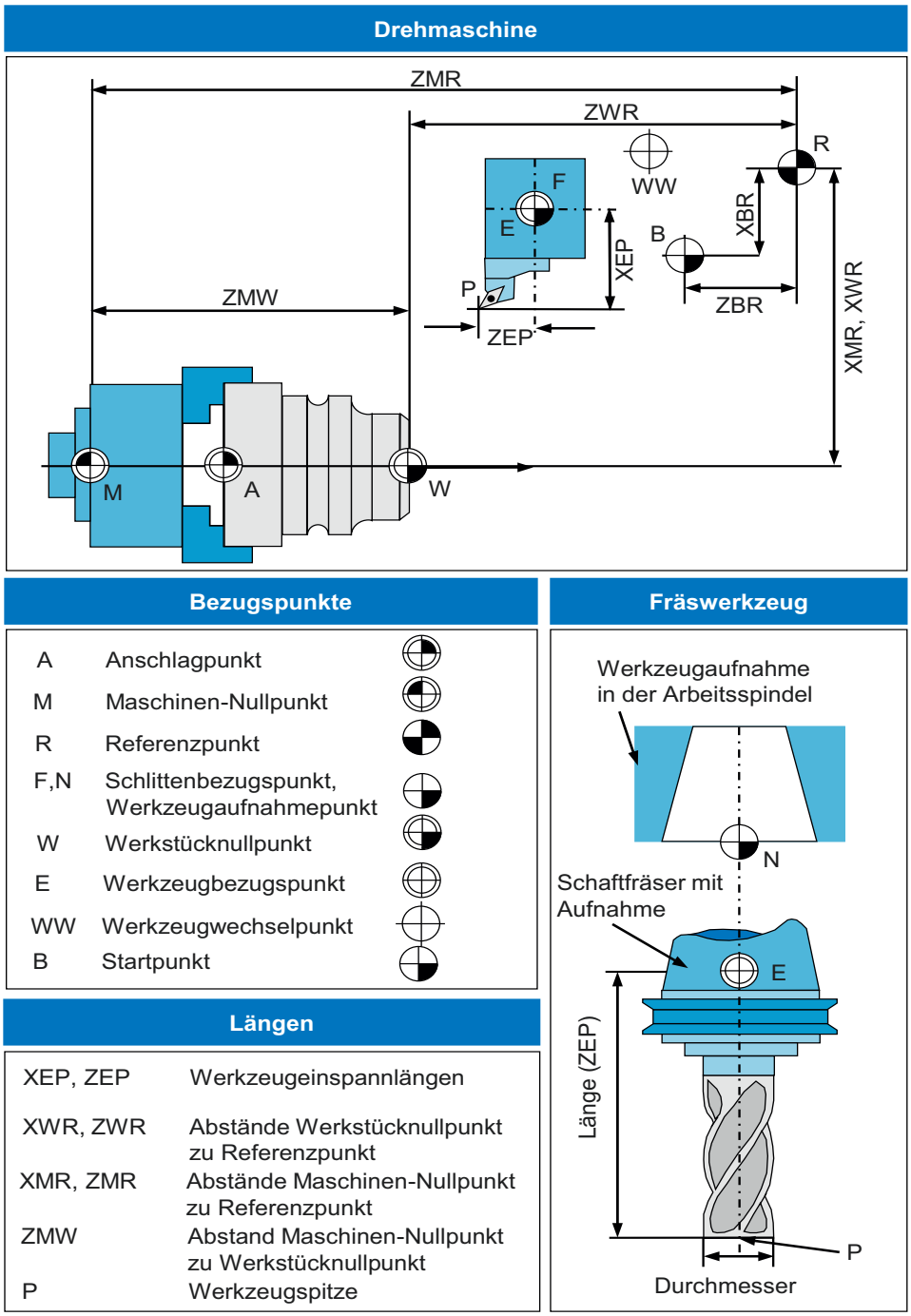


Bild 11.25 Bezugspunkte bei einer NC-Drehmaschine und an einem Fräswerkzeug

Punkte sind das maschinenseitige Gegenstück zum Werkzeugbezugspunkt und werden bei der Referenzpunktfahrt in den Referenzpunkt verfahren.

11.3.3.6 Startpunkt

Der Startpunkt *B* kennzeichnet die Position des Werkzeugbezugspunktes bei Programmbeginn. Er wird vor Programmbeginn vom Referenzpunkt aus und am Ende einer Werkstückbearbeitung per Programm angefahren, um von dort die Bearbeitung des nächsten Werkstücks zu starten.

11.3.3.7 Werkzeuggeometrie

Bei der Bearbeitung eines Werkstücks werden in der Regel mehrere Werkzeuge, wie z. B. Schruppwerkzeuge, Schlichtwerkzeuge, Bohrwerkzeuge usw., eingesetzt. Die als Einspannlängen bezeichneten Abstände *XEP* und *ZEP* (Bild 11.25) zwischen der spanbildenden Schneide und dem Werkzeugeinstellpunkt *E* haben in Abhängigkeit vom Werkzeug unterschiedliche Werte. Mit jedem eingewechselten Werkzeug muss das zugehörige Koordinatenpaar *XFP*, *ZFP* der Bahnberechnung zugewiesen werden. Kleinere Abweichungen der Werkzeuggeometrie durch

Verschleiß, durch ungenaue Werkzeugvoreinstellung oder durch temperaturbedingte Maschinenverlagerungen können mit der Werkzeugfeinkorrektur vom Maschinenbediener vor Beginn der Bearbeitung noch berichtigt werden. Die Korrekturwerte werden im NC-Programm über die D-Anweisung mit der entsprechenden Speichernummer ausgelesen.

11.4 NC-Programmierverfahren

Der Programmierer muss bei der Programmerstellung die von ihm geforderte Bearbeitungsaufgabe so in einem NC-Programm darstellen, dass die Steuerung der Werkzeugmaschine sie eindeutig interpretieren kann und die Bearbeitungsaufgabe sich auf einer bestimmten Maschine mit ihrem begrenzten Arbeitsraum und ihrer spezifischen Funktionalität ausführen lässt. Grundlage hierfür ist die Programmiersprache. In ihr sind der Befehlsvorrat und ein entsprechendes Darstellungsformat zur Beschreibung der Bearbeitungsaufgabe festgelegt. In Abhängigkeit von der Form des zu fertigenden Bauteils und der Komplexität der Bearbeitung entstehen unterschiedlich umfangreiche Programme. Sind darüber hinaus über ein Programm mehrere Prozesse zu steuern (Bearbeitungszentrum), so müssen zusätzlich Synchronisationsmarken und Wechselfunktionen ergänzt werden.

Dem Programmierer sind dazu neben der geeigneten NC-Programmiersprache entsprechende Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, um ein solches Programm sicher, schnell und kostengünstig erstellen, manipulieren und nachvollziehen zu können.

11.4.1 Manuelle NC-Programmierverfahren

11.4.1.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Bei der manuellen Programmierung unterteilt der Programmierer das zu bearbeitende Werkstück in einzelne Bearbeitungsmerkmale. Auf der Grundlage dieser Merkmale beschreibt er dann die Geometrie, die notwendigen Operationen und die technologischen Randbedingungen und legt damit die einzelnen Bearbeitungsschritte fest.

Im Fall der konventionellen, sequenziellen NC-Programmierung nach DIN 66025, bzw. ISO 6983, bildet er mit den im Programmschlüssel der NC-Maschine (Tab. 11.1) vorgegebenen NC-Funktionen NC-Sätze, die in ihrer Gesamtheit das NC-Werkstückprogramm ergeben. Maschinenleistung, Werkstück- und Rohteilabmessungen, Werkstoff, Werkzeuggeometrie und Werkstückoberflächengüten sind bei der Wahl der Schnittbedingungen und Schnittaufteilungen zu berücksichtigen, Bild 11.26.

In einem Arbeitsplan wird die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte festgelegt. In den zusätzlich zu erstellenden Werkzeug- und Aufspannplänen werden dem Maschinenbediener Angaben über die Spannlage des Werkstücks, die zu verwendenden Werkzeuge mit ihren Codenummern und Einstelllängen (Bild 11.15) und häufig die Entfernung des Startpunktes *B* der Schlitten vom Referenzpunkt (Abstände *XBR*, *ZBR* in Bild 11.25) mitgeteilt, die der Programmierer bei der Programmerstellung vorausgesetzt hat. Können einzelne Vorgaben nicht eingehalten werden, weil z. B. das Rohteil nur versetzt aufgespannt werden kann, muss das NC-Programm z. B. durch eine entsprechende Nullpunktverschiebung angepasst werden.

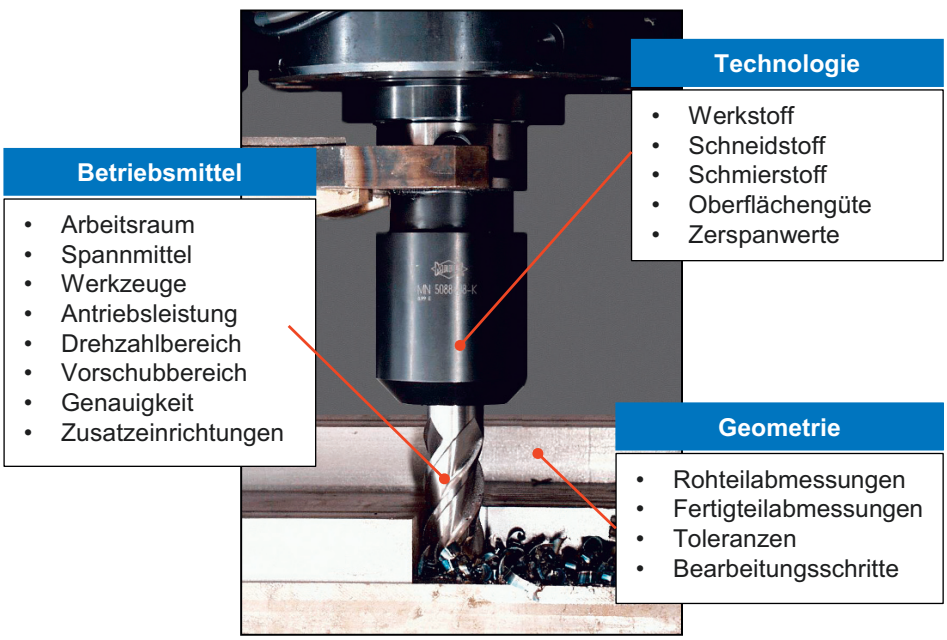


Bild 11.26 Daten zur Erstellung der Steuerinformationen für eine NC-Maschine

Den weitaus größten Zeitanteil bei der Programmierung nimmt die Festlegung der Werkzeugbewegungen in Anspruch. Die gesamte die Werkstückform erzeugende Bewegung ist in einzelne Bewegungsabschnitte zu unterteilen. Bei Rohteilaufmaßen, die nicht in einem Schnitt zerspant werden können, ist eine Zerlegung in mehrere Bearbeitungsvorgänge erforderlich. Diese sogenannte Schnittaufteilung verlangt die Berechnung von Wegpunkten, die in der Werkstückzeichnung üblicherweise nicht bemaßt sind. Sie kann sehr aufwendig sein, sodass sich hier – wie später noch beschrieben wird – die Unterstützung durch Geometrieberechnungsprogramme und durch Rechner anbietet.

Die Form und Länge der Bewegungsabschnitte ergeben sich aus den Interpolationsfunktionen der jeweiligen NC-Programmiersprache. Im Fall der DIN 66025 stehen lediglich Geraden, Kreisbögen oder Parabeln zur Verfügung, mit denen alle zu fahrenden Bahnen approximiert werden müssen. Entsprechend der Komplexität der zu bearbeitenden Geometrie und der geforderten Genauigkeit sind dazu bisweilen sehr viele Sätze nötig, um eine hinreichende Annäherung mittels Geraden- und Kreisbefehlen zu erreichen. Das NC-Programm wird dadurch entsprechend lang und die Anzahl von NC-Sätzen mit nur kurzen Bahnsegmenten steigt. Auf die Zeitprobleme, die sich hieraus während der Abarbeitung ergeben, wird in den Kapiteln zur Interpolation gesondert eingegangen. Moderne Programmiersprachen und Steuerungen bieten daher auch höherwertige geometrische Beschreibungen an, wie beispielsweise Splines. Dadurch lassen sich komplexe und gleichzeitig längere Bahnsegmente in nur einem Satz abbilden. Für diese höherwertigen Programmieransätze existiert jedoch keine Normierung, wie es die DIN 66025 für die traditionelle NC-Programmierung leistet.

Besondere Sorgfalt ist bei der Festlegung des Bahnverlaufs darauf zu verwenden, dass der Bearbeitungsvorgang auch hinsichtlich der resultierenden Achsbewegungen kollisionsfrei erfolgt (vgl. ▶ Kap. 12.2.2). Gefahren der Kollision mit dem Werkstück entstehen besonders dann, wenn an engen und verwinkelten Werkstückbereichen bearbeitet werden muss, bzw. wenn sich mehrere Werkzeuge auf verschiedenen Vorschubschlitten gleichzeitig im Eingriff befinden.

Die Angabe von Verfahrwegen kann nach DIN 66025 auf zwei Arten erfolgen. Bei der absoluten Maßangabe (Bezugsmaßprogrammierung, G90) werden die Koordinatenwerte des Endpunktes im Werkstückkoordinatensystem – bezogen auf den Werkstücknullpunkt *W* (◘ Bild 11.25) – programmiert. Bei der inkrementellen Maßangabe (Kettenmaß- oder Relativmaßprogrammierung, G91) wird die Differenz vom momentanen Standort des Werkzeugs zum Endpunkt des nächsten Wegstücks angegeben.

In der Praxis wird überwiegend absolut programmiert (G90). Bei dieser Art der Bemaßung ist die Programmkontrolle bzw. die Programmkorrektur oftmals einfacher, da in Werkstattzeichnungen in der Regel ausgehend von einzelnen Bezugskanten bemaßt wird. Legt man den Nullpunkt für die Absolutprogrammierung auf diese Bezugskanten, können die Maße für die NC-Programmierung unmittelbar von der Zeichnung übernommen werden. Ferner wird durch die Änderungen einzelner Maße nicht das gesamte nachfolgende Programm beeinflusst, wie dies bei der relativen Bemaßung der Fall ist. Gegenüber der absoluten Bemaßung besteht in der relativen Bemaßung die Gefahr von Kettenmaßfehlern, der Summierung der Toleranzen einzelner Maße. Die Kettenbemaßung bietet dagegen Vorteile, wenn Programmteile mehrfach verwendet werden sollen. Da sich hier die Bemaßung auf den zuvor angefahrenen Punkt bezieht, können einzelne Programmteile (z. B. Unterprogramme) an die entsprechende Stelle kopiert oder als Unterprogramm von dort aus aufgerufen werden. Besonders bei der Fertigung von Bohrbildern, in denen dieselben Bohrungen an verschiedenen Stellen zu fertigen sind, ist diese Art der Bemaßung vorteilhaft. Innerhalb eines Werkstückprogramms kann die Art der Maßangaben beliebig zwischen absoluter und inkrementeller Bemaßung gewechselt werden.

Die Lage des Werkstücks, also auch die des Werkstücknullpunktes im Arbeitsraum der Maschine, hängt von dem verwendeten Spannmittel, von der Lage des Spannmittels im Arbeitsraum (z. B. auf dem Frästisch) und von den Rohteilabmessungen ab. In einer der ersten Anweisungen eines absolut programmierten NC-Programms ist daher der Steuerung die Lage des Werkstücknullpunktes anzugeben. Dies kann durch den Aufruf eines der Befehle G54, G55, …, G59 geschehen.

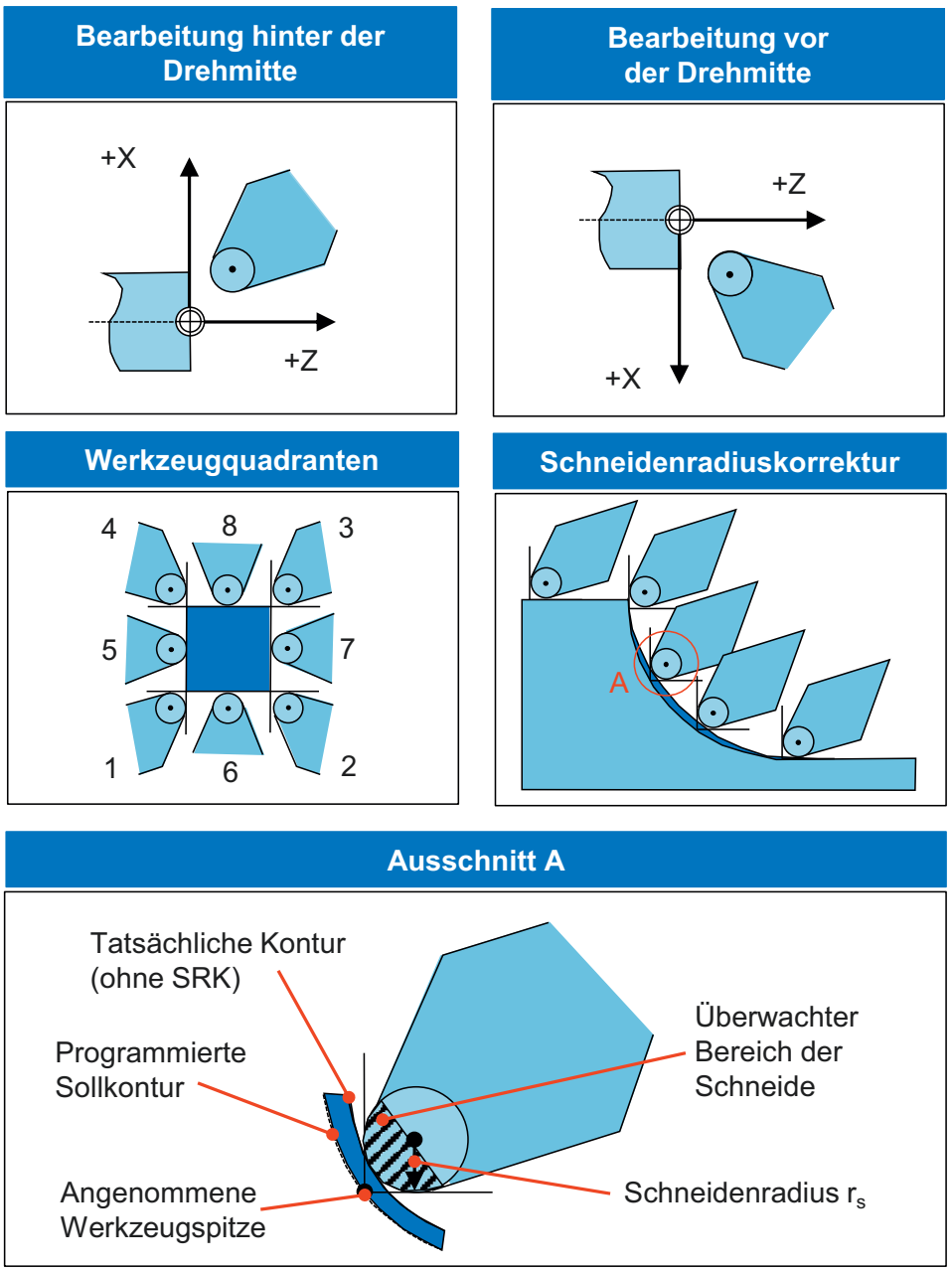
- Beispiel: N12 G54
  Das Maß der Verschiebung (im ◘ Bild 11.25 das Maß ZMW) wird dem Einrichteblatt entnommen und vor Programmstart an der Steuerungsbedientafel der Maschine eingegeben. Als Speicher stehen sogenannte Korrekturwertspeicher zur Verfügung, die über einen entsprechenden G-Befehl, in diesem Fall G54, im NC-Programm abgerufen werden können. Eine andere Möglichkeit der Nullpunktverschiebung bietet das Setzen des Ist-Wertspeichers durch den Befehl G92. Die Werte der aktuellen Position werden im Speicher gesetzt und können so indirekt den Nullpunkt des Werkstücks festlegen.
- Beispiel: N9 G92 X100 Z200
  Befindet sich beispielsweise der Schlittenbezugspunkt *F* im Referenzpunkt und ist der Abstand des Referenzpunktes *R* in den einzelnen Achsen vom Werkstücknullpunkt *W* (*XWR*, *ZWR*) bekannt (100 mm in *X*-, 200 mm in *Z*-Richtung, $Y = 0$), so können diese Maße im Ist-Wertspeicher gesetzt werden und legen die relative Lage des Referenzpunktes zum Werkstücknullpunkt fest.

Häufig wird dieser Befehl auch im Zusammenhang mit dem sogenannten „Werkzeugankratzen“ am Drehwerkstück verwendet. Dazu kratzt der Programmierer vor Programmaus-

führung das Drehteil an der Stirnseite an und trägt die *Z*-Komponente dieser Position zusammen mit einem vom Bauteil entfernten *X*-Wert in das NC-Programm ein. Die *X*/*Z*-Position kann im Programm angefahren und der Ist-Wertspeicher mit G92 an dieser Stelle auf $Z=0$ gesetzt werden. So ist der Programmierer in der Lage, den Werkstücknullpunkt zu definieren, ohne näher den Maschinennullpunkt, die Einspannung, Einspann- und Bauteillängen betrachten zu müssen.

Bei der Programmierung der Werkstückgeometrie wird immer die Fertigkontur des Werkstücks programmiert, ohne zunächst die Werkzeugradien zu berücksichtigen. Unter dem Werkzeugradius versteht man im Fall von Drehwerkzeugen den im ◘ Bild 11.26 beschriebenen Schneidenradius *rs* der eingesetzten Wendeschneidplatten, im Fall von Fräswerkzeugen den Fräserradius. Die Steuerung berechnet dann unter Kenntnis der Werkzeugradien die äquidistante Bahn zur Werkstückkontur für den Schneidenrundungs- bzw. den Fräsermittelpunkt. Diese Berechnung wird auch Schneiden- bzw. Fräserradiuskorrektur (*SRK* bzw. *FRK*) genannt. Ohne eine Bahnkorrektur können Formfehler bei der Bearbeitung auftreten, ◘ Bild 11.27 (vgl. ▶ Kap. 12.2.2).

Der Werkzeugradius wird nicht im NC-Programm festgelegt, sondern vor Programmstart in die Steuerung eingegeben. Im Fall der Drehbearbeitung werden zusätzlich noch die Lage des Werkzeugs in den Werkzeugquadranten, ◘ Bild 11.27, und die Maße für die Werkzeuglängenkorrekturen (*XEP*, *ZEP*), ◘ Bild 11.25, eingegeben. Dadurch ist das NC-Programm un-



◘ **Bild 11.27** Orientierung des Drehmeißels und mögliche Formfehler beim Drehen ohne Schneidenradiuskorrektur

abhängig vom Radius des gerade verwendeten Werkzeugs, der sich z. B. durch Nachschleifen ständig verändert.

Neben den geometrischen Informationen muss das NC-Programm auch technologische Informationen beinhalten. Das sind hauptsächlich die vom Werkstückmaterial und Schneidstoff abhängigen Schnittwerte, wie Schnitttiefen, Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe. In Richtwerttabellen (z. B. INFOS) [WERK79] bzw. in Werkzeugkatalogen der Werkzeughersteller sind für die gängigsten Werkstoffkombinationen Angaben über günstige Schnittgeschwindigkeiten, Vorschübe und Schnitttiefen gemacht. Aber auch die individuellen Grenzbelastungsdaten der Werkzeuge und der Maschine (z. B. Drehmoment, Leistung) müssen bei der Programmerstellung berücksichtigt werden.

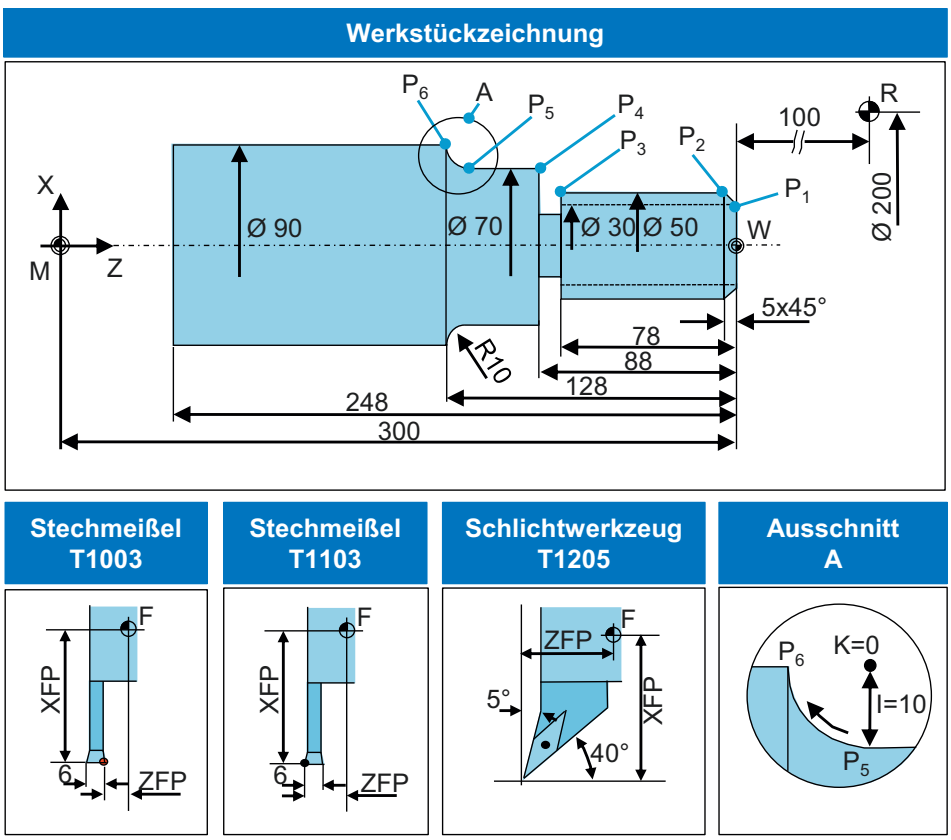
Zur Unterstützung des manuellen Programmierens wurden Programmierplätze entwickelt. Sie enthalten meist einen Tischrechner, um dem Programmierer die notwendigen geometrischen und technologischen Berechnungen zu erleichtern. Die Tischrechner sind meist entweder dem Eingabegerät an der NC-Maschine nachempfunden oder PCs mit einer entsprechenden Programmiersoftware.

11.4.1.2 Programmierbeispiel (DIN 66025)

In ◘ Bild 11.28 ist ein Beispiel zur Drehbearbeitung eines bereits vorgefertigten Bauteils dargestellt. Für die Fertigung dieses Bauteils soll eine Drehmaschine zum Einsatz kommen. Wie bereits erwähnt, verfügen viele Steuerungen über eigene, nicht standardisierte Programmierbefehle, um Zusatzfunktionen zu realisieren. Auch die in der eingesetzten Drehmaschine verwendete Steuerung bietet solche, von denen der DIN 66025 (◘ Tab. 11.1) abweichende Befehle an.

Nach der bereits erfolgten Schruppbearbeitung ist zunächst ein Einstich mit zwei Werkzeugen und daran anschließend eine Schlichtbearbeitung über die markierten Konturpunkte P_1 bis P_6 durchzuführen.

Als erster Schritt wird im NC-Programm, ◘ Bild 11.29, eine Nullpunktverschiebung unter Verwendung des Befehls G59 vorgenommen. Dieser bewirkt eine Nullpunktverschiebung relativ zum aktuellen Werkstückbezugspunkt *W*. Wurde, wie in diesem Fall, noch kein Werkstückbezugspunkt definiert, so bezieht sich die Verschiebung auf den Maschinennullpunkt *M*. Die Werte für die Verschiebung sind hier $X = 0$ und $Z = 300$. Zusätzlich wird die Drehzahl der Spindel definiert. Der nächste Satz N02 legt die Art der Maßeingabe, Drehrichtung der Spindel sowie das einzuwechselnde Werkzeug, T1003, fest. Bei der in diesem Beispiel zu Grunde gelegten Steuerung bezeichnen die ersten beiden Ziffern der T-Anweisung die Position des Werkzeuges im Revolver, also im Werkzeugspeicher der Drehmaschine (hier: Position „10“). Das zweite Ziffernpaar „03“ legt den Speicherplatz in der Datei für die Werkzeugfeinkorrektur fest. In diesem Fall findet also die Anwahl des Korrekturspeichers nicht durch Verwendung des D-Befehls, sondern direkt in Verbindung mit dem Werkzeugwechselaufruf statt. In den darauffolgenden



◘ **Bild 11.28** Werkstückzeichnung und Werkzeuginformationen zu dem Beispielprogramm zur DIN 66025. Quelle: INDEX-Werke

Hauptprogramm

Programm:	Kommentar:
%	Programmanfang
N01 G59 X0 Z300 S1300	Nullpunktverschiebung von M nach W, 1300 U/min
N02 G90 T1003 M04	Absolutmaßeing., Werkzeugw. T1003, Spindel „ein“ (Linksl.)
N03 G00 X54 Z-78	Eilgang über Einstichposition
N04 G01 X30 F0.1	Einstechen rechte Flanke, Vorschub 0,1 mm/U
N05 X54	Herausfahren
N06 G00 X200 Z100	Eilgang zur Referenzposition
N07 T1104	Werkzeugwechsel T1104
N08 G00 X74 Z-88	Eilgang über Einstichposition
N09 G01 X30	Einstechen linke Flanke
N10 X74	Herausfahren
N11 G00 X200 Z100	Eilgang zur Referenzposition
N12 T1205	Werkzeugvorauswahl T1205
N13 G91 M06	Kettenvermaßung, Werkzeugwechsel
N14 G46	Schneidenradiuskorrektur „ein“
N15 G00 X-80 Z-98	Eilgang vor P1
N16 G96 V250	Konst. Schnittgeschwindigkeit 250 m/min
N17 G01 Z-2 F0.15	Zustellen nach P1, Vorschub 0,15 mm/U
N18 X5 Z-5	P1 nach P2
N19 Z-75	P2 hinter P3
N20 G00 X10 Z-6	Eilgang vor P4
N21 G01 Z-32	Nach P5
N22 G02 X10 Z-10 I10 K0	P5 nach P6 (Kreisinterpolation)
N23 G01 X2	Wegfahren
N24 G40	Schneidenradiuskorrektur „aus“
N25 G90	Absolutmaßeingabe
N26 G00 X200 Z100	Eilgang zum Referenzpunkt
N27 M05	Spindel „hält“
N28 M30	Programmende, Rücksetzen auf Programmanfang

Bild 11.29 NC-Programmbeispiel für die Drehbearbeitung zu Bild 11.28. Quelle: INDEX-Werke

Sätzen werden zunächst die rechte und anschließend die linke Flanke des Einstichs gefertigt.

Anschließend kann das Schlichtwerkzeug T1205 (Satz N12) eingewechselt und die Konturpunkte P_1 bis P_6 abfahren werden. Diese Bewegungen sind inkrementell bemaßt und programmiert. Im Gegensatz zur Absolutbemaßung, bei der zu beachten ist, dass in X-Richtung Durchmesserwerte angegeben werden, wird im Fall der Kettenbemaßung lediglich die relative Verschiebung der Start- zur Zielposition betrachtet. Der Befehl G46 (Satz N14) schaltet die Schneidenradiuskompensation der Drehmaschine ein.

Auf die Definition der Kreisprogrammierung soll nochmals besonders eingegangen werden. Es wird dabei zunächst, ausgehend vom Startpunkt der Kreisbewegung (P_5, Ende von Satz N21), der Mittelpunkt des Kreises definiert. Hierzu wird vom Startpunkt der Kreisbewegung ausgehend der Mittelpunkt in X-(Y-) und Z-Richtung bestimmt und die Werte den Variablen I(J) und K zugeordnet (Satz N22). Wird eine der Variablen nicht aufgeführt, so wird sie mit „0“ besetzt. Den X-, Y-, Z-Werten werden die Endkoordinaten der Kreisbewegung zugeordnet. Der Befehl G02 bedeutet eine Kreisinterpolation im Uhrzeigersinn.

Am Ende des Programms (ab Satz N25) wird wieder auf Absolutbemaßung umgestellt und der Referenzpunkt angefahren. Der Befehl M30 beendet schließlich das Programm und setzt dieses zum Zeichen „%“ (Programmanfang) zurück, sodass es durch Drücken von „Start“ erneut abgearbeitet werden kann.

11.4.1.3 Zusätzliche Befehle zur Programmeingabe

Dem Programmierer moderner NC-Steuerungen steht heute eine breite Palette verschiedener Bedien- und Programmie-

rerleichterungen zur Verfügung. So enthalten alle NC-Steuerungen NC-Programmspeicher für mehrere NC-Teilprogramme, Korrekturspeicher für die Programmoptimierung und Werkzeugkorrekturspeicher zur Aufnahme der aktuellen Geometrien mehrerer Werkzeuge.

Spezielle Bearbeitungszyklen für Gewindeschneiden, Einstechen und Bohren sowie die Möglichkeit zur Spiegelung, Skalierung und Ausblendung einzelner NC-Sätze gehören ebenso zur Ausstattung komfortabler numerischer Steuerungen wie die Unterprogrammtechnik.

Unterprogrammtechnik

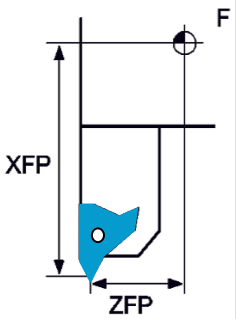
Mit Hilfe der Unterprogrammtechnik werden häufig wiederkehrende Bearbeitungsfolgen (z. B. Bohrzyklen, Bohrbilder, Fräsbilder) einmalig als Unterprogramm beschrieben und durch einen symbolischen Namen mit Übergabe der aktuellen Parameter aufgerufen. Die verwendeten Befehle wie Kettenbemaßung usw. sind dabei im Gegensatz zu Hochsprachen wie C, Pascal usw. nicht lokal auf das Unterprogramm beschränkt, sondern gültig für das gesamte NC-Programm. ◘ Bild 11.30 zeigt ein Beispiel für das Gewindeschneiden.

Das angedeutete Gewinde soll unter Verwendung eines Unterprogramms als Linksgewinde gefertigt werden. Hierzu ist zum einen ein ergänzender Programmabschnitt zum Hauptprogramm A (◘ Bild 11.30) und zum anderen das eigentliche Unterprogramm zu erstellen.

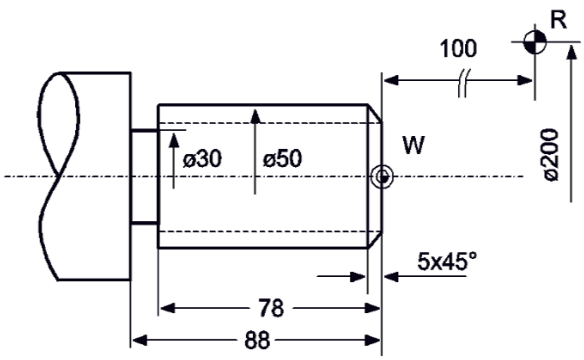
Das Gewinde (M50 X1,5) ist mit dem Werkzeug T0906 zu fertigen. Dazu soll das Gewindewerkzeug in drei Durchgängen Material abnehmen, um die gewünschte Gewindetiefe von 1,3 mm zu erhalten. Das Unterprogramm, gekennzeichnet durch den Buchstaben „O“ und die Programmnummer 8100, wird im Hauptprogramm dreimal (N31, N33, N35) mit dem Befehl G22 aufgerufen. Es erhält als Übergabeparameter (L1) die jeweiligen Bearbeitungstiefen, die im Hauptprogramm durch ein „/“-Zeichen von L1 getrennt

◘ Bild 11.30 Programmierbeispiel zur Erstellung eines Unterprogramms für das Werkstück in ◘ Bild 11.28

Gewindewerkzeug T0906



Werkstück



Ergänzungen zum Hauptprogamm A

N28	G97	S500	M04	Konstante Drehzahl von 500 U/min, Spindel „an“ (Linksl.)
N29			T0906	Werkzeugwechsel T0906
N30		L1/49		Variablenvorbesetzung (L1 = 49 mm)
N31	G22		A8100	Unterprogrammaufruf
N32		L1/48		Variablenvorbesetzung (L1 = 48 mm)
N33	G22		A8100	Unterprogrammaufruf
N34		L1/47,4		Variablenvorbesetzung (L1 = 47,4 mm)
N35	G22		A8100	Unterprogrammaufruf
N36	G00	X200 Z100		Eilgang zum Referenzpunkt
N37			M05	Spindel „halt“

Unterprogramm O8100

N101	G00	X54	Z2		Eilgang
N102		XL1			Eilgang vor das Werkstück
N103	G33		Z-83	F1,5	Gewindeschneiden (Linksgewinde)
N104	G00	X54			Eilgang in X-Richtung
N105				M99	Unterprogrammende

sind. Der Vorschub F des Schlittens ist durch die Gewindesteigung festgelegt.

Der Befehl G33 (Satz N103, Gewindeschneiden) synchronisiert schließlich bei dieser Bearbeitung Vorschub und Drehbewegung der Spindel.

Konturzugprogrammierung

Bei der Konturzugprogrammierung wird die Fertigteilkontur in einzelne, über zwei oder drei Punkte gehende Konturzüge zerlegt und diese als NC-Sätze formuliert. Die Steuerung berechnet dabei selbständig aus den gegebenen Größen die Anfangs- und Endpunkte der Verfahrbewegungen und nimmt so dem Programmierer geometrische Berechnungen ab.

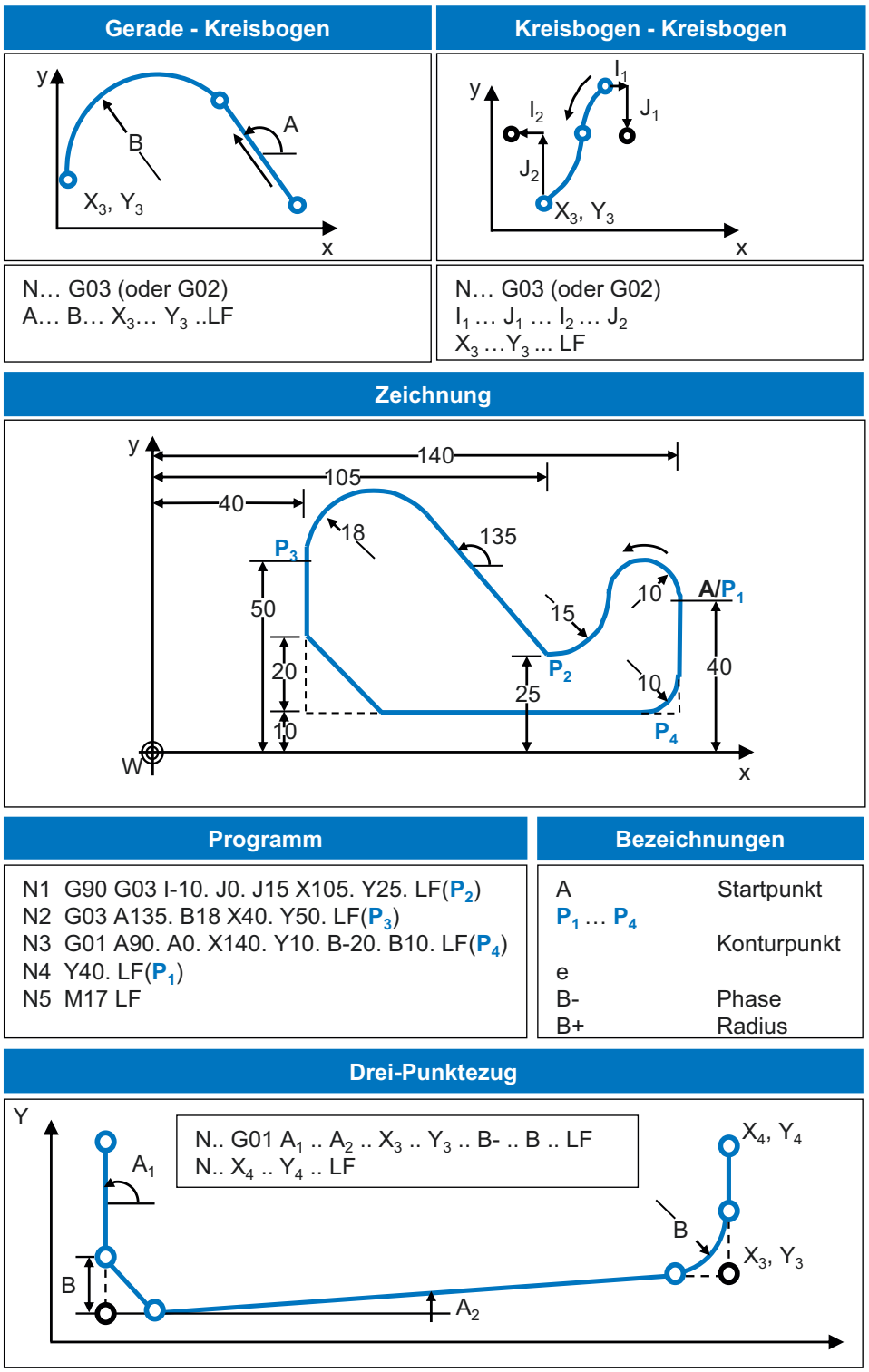


Bild 11.31 Konturprogrammierung. Nach SIEMENS

Die Programmierung der unterschiedlichen Konturzüge erfolgt über Eingabe der Endpunktkoordinaten und Winkel, die die Konturzüge eindeutig definieren und die direkt aus der Werkstückzeichnung hervorgehen. Standardfasen und Radiusübergänge werden nicht gesondert programmiert, sondern über festgelegte NC-Adressen als Randbedingungen der Konturzüge definiert. Bild 11.31 zeigt ein Beispiel zur Konturzugprogrammierung.

Vom Startpunkt A ausgehend treten die folgenden drei vordefinierten Konturzüge auf:

- Kreisbogen, Kreisbogen (nach P_2),
- Gerade, Kreisbogen (nach P_3) und
- Dreipunktezug mit Fase, Radius (nach P_4) und Gerade (nach P_1).

Im Vergleich zur konventionellen NC-Programmierung werden fünf NC-Sätze und die oft komplizierte Berechnung der Zwischenpunkte eingespart.

Zyklusprogrammierung

Zur Vereinfachung der manuellen Programmierung sind in die Befehlssätze vieler Steuerungen zusätzliche, herstellerspezifische Befehle aufgenommen worden, die allgemein Zyklen genannt werden. Zyklen können auch als in der Steuerung fest programmierte Unterprogramme betrachtet werden. Die Übergabe der Parameter findet in Abhängigkeit des jeweiligen Zyklus in einer definierten Form statt.

Im Folgenden sollen, wie in Bild 11.32 dargestellt, zwei häufig verwendete Zyklen angesprochen werden: der Bohr-

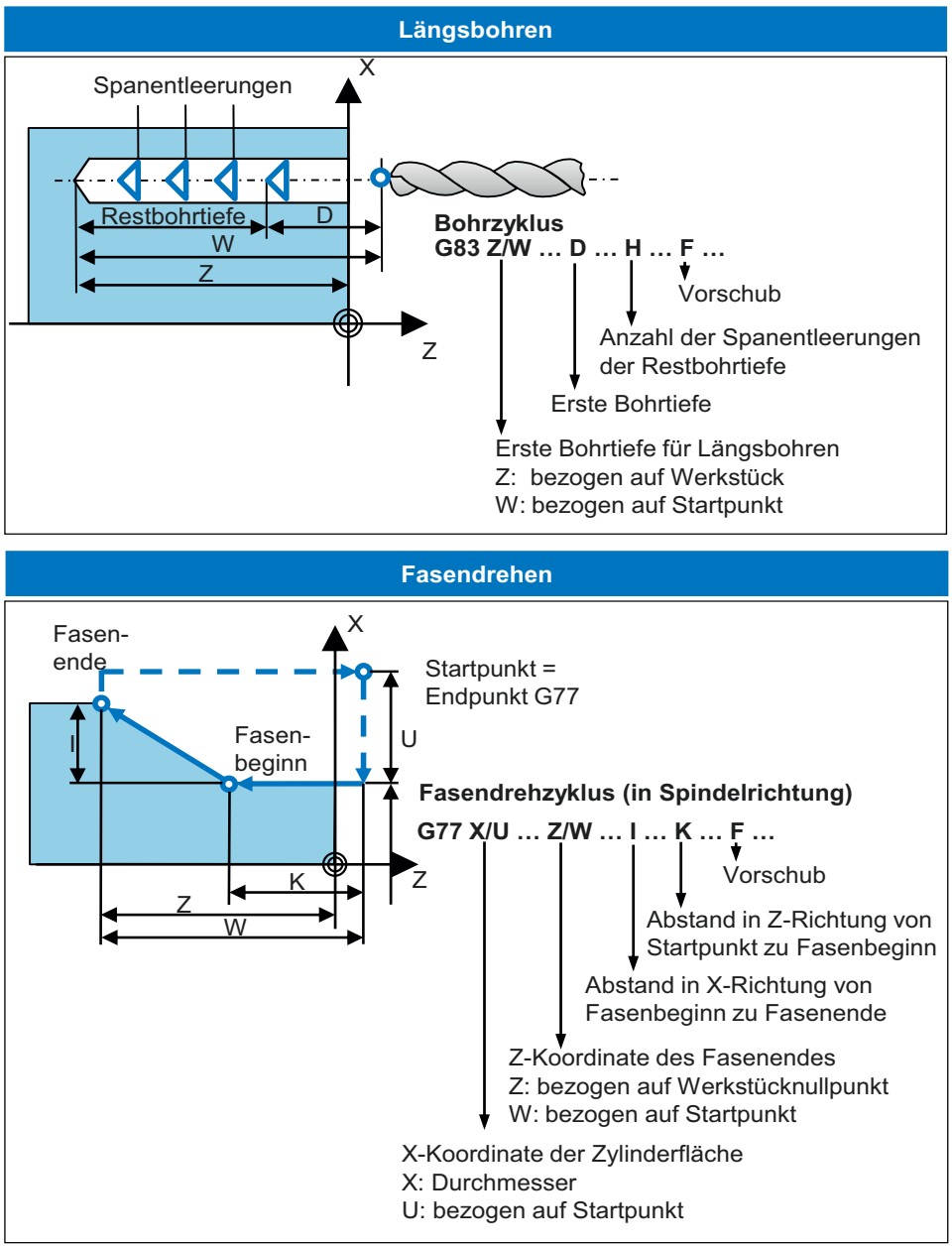


Bild 11.32 Zyklen zur vereinfachten NC-Programmierung. Nach INDEX-Werke

zyklus und der Fasendrehzyklus. Zyklen werden im Allgemeinen über G-Anweisungen aufgerufen, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Steuerung unterschiedlich belegt sein können. In diesem Beispiel wurde eine Steuerung der Firma TRAUB gewählt [o. V.92. Firmenschrift].

Der Aufruf des Bohrzyklus erfolgt mit dem Befehl G83 und erlaubt die Ausführung nichtzentrischer Längsbohrungen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Maschine über Werkzeugantriebe im Revolver der Drehmaschine verfügt. Die Ausführung des Befehls beginnt auf der Symmetrieachse der Bohrung vor dem Werkstück. Dieser Startpunkt ist gleichzeitig auch der Endpunkt der Bewegung. Die einzelnen Übergabeparameter sind ◘ Bild 11.32 zu entnehmen.

Der Fasendrehzyklus wird mit G77 aufgerufen. In diesem Beispiel handelt es sich um eine Bearbeitung, die in Spindelrichtung zunächst ein zylindrisches Stück dreht und im Anschluss daran die Fase auf den gewünschten Durchmesser fertigt. Auch in diesem Fall ist der Startpunkt gleichzeitig der Endpunkt der Bewegung. Die Bearbeitung wird hier jedoch, im Gegensatz zur vorher beschriebenen Bohrbearbeitung, lediglich einmal ausgeführt. Die Geometrie der Fase wird über die in ◘ Bild 11.32 Parameter festgelegt.

11

11.4.1.4 Grenzen der Programmierung nach DIN 66025

Die vorangegangenen Beschreibungen und Beispiele zur NC-Programmierung nach DIN 66025 verdeutlichen, wie aufwendig die Sprache ist und wie wenig der Befehlsumfang auf den Benutzer zugeschnitten ist. Der Grund hierfür liegt in der historischen Entwicklung der NC-Technik, in der Anfangs nur begrenzte Rechnerleistung zur Verfügung stand, sodass mit diesen Steuerungen komplexe Interpolationsfunktionen und Verfahranweisungen in mehreren Achsen nicht abgearbeitet werden konnten. Auch entspricht die Programmiertechnik nicht den Möglichkeiten heutiger Programmiersprachen. Die grafische Darstellung wird durch die zusammenhangslosen Einzelsätze eingeschränkt und die Möglichkeiten moderner Bedienoberflächen lassen sich nicht nutzen. Hinzu tritt die Problematik, dass, obwohl es sich um eine genormte Sprache handelt, die Bedeutung der einzelnen Befehle nicht nur bei unterschiedlichen Bearbeitungsarten (Drehen, Fräsen, Nibbeln usw.) variieren kann, sondern auch jeder Steuerungshersteller jeweils seine speziell auf die Maschine zugeschnittenen Anweisungen zu dem Sprachumfang hinzufügt oder bestehende Bedeutungen von Befehlen durch eigene ersetzt [KIEF99].

Die Entwicklung der NC-Technik zeigt, dass der Befehlsumfang nicht mehr ausreichend ist und keine optimale Ausnutzung sämtlicher Funktionen moderner Werkzeugmaschinen zulässt. Der Trend numerisch gesteuerter Maschinen geht verstärkt in Richtung eines höheren Automatisierungsgrades, sodass zukünftige Steuerungen neben den bereits bestehenden Funktionen ebenfalls Aufgaben wie Prozessüberwachung, Messzyklen oder die gleichzeitige Ausführung verschiedener Prozesse erfüllen werden. Um diese Möglichkeiten ebenfalls in den Bearbeitungsprozess integrieren zu können, existieren Bestrebungen, den Befehlsumfang der DIN 66025 um einen ebenfalls genormten Befehlssatz einer Hochsprache zu ergänzen [ISO89].

◘ Bild 11.33 erläutert die mögliche Einbindung eines solchen neuen Datenformats in ein konventionelles NC-Programm. Die erweiterten Funktionen werden in entsprechenden Zeichen („[“ und „]“) eingebunden und in das NC-Datenformat eingefügt (vgl. Flussdiagramm ◘ Bild 11.33). Innerhalb dieser Zeichen stehen dem Programmierer Funktionen zur Verfügung, die bereits aus anderen Hochsprachen bekannt sind, einschließlich einiger NC-spezifischer Funktionen. Es ist möglich, beliebige Variablen zwischen den Datenformaten auszutauschen, sodass beispielsweise auf Hochsprachenebene Berechnungen durchgeführt werden können und der konventionelle NC-Code die daraus resultierenden Bewegungen veranlasst, ◘ Bild 11.33.

In solchen erweiterten Datenformaten lassen sich ferner Interpolationsfunktionen wie Splines nutzen, um beispielsweise Freiformflächen bearbeiten zu können. Jedoch ist auch dieses Format nicht objektorientiert, sodass geschlossene Informationen über einzelne Bearbeitungsmerkmale nicht abgebildet werden können und bei größeren Programmen die Gefahr besteht, dass sie unübersichtlich werden. Ferner werden diese NC-Programme zur Ausführung einzelner Verfahr- und Schaltanweisungen auf einer Maschine mit einer speziellen Steuerung programmiert, und es handelt sich nicht um ein Austauschformat mit maschinenneutralen, die Bearbeitungsaufgabe beschreibenden Daten. Der Vorteil der manuellen Programmierung liegt also im Bereich einfacher Werkstückgeometrien und kurzer Programme, die sich in einem normalen Texteditor erstellen lassen. Komplexere Aufgaben und Programme, an und mit denen mehrere Programmierer arbeiten, lassen sich dagegen nur sicher und wirtschaftlich mit maschinellen Hilfsmitteln erstellen.

11.4.2 Maschinelle NC-Programmierverfahren

Obwohl ein Programmierplatz zur manuellen Programmerstellung bereits eine Erleichterung für den Programmierer bringt, verbleiben doch eine Reihe von oft wiederkehrenden Tätigkeiten, die zeitaufwendig und fehleranfällig sind. Dazu gehören z. B. das Nachschlagen in Werkstoff- und Werkzeugkarteien, das Berücksichtigen der Maschinendaten, das Berechnen von Spindeldrehzahlen und Vorschüben, das Ermitteln von Koordinaten unter Berücksichtigung der Schruppaufmaße usw. Um den Programmierer zu entlasten und die Fehleranfälligkeit seiner Arbeit zu reduzieren, wurden rech-

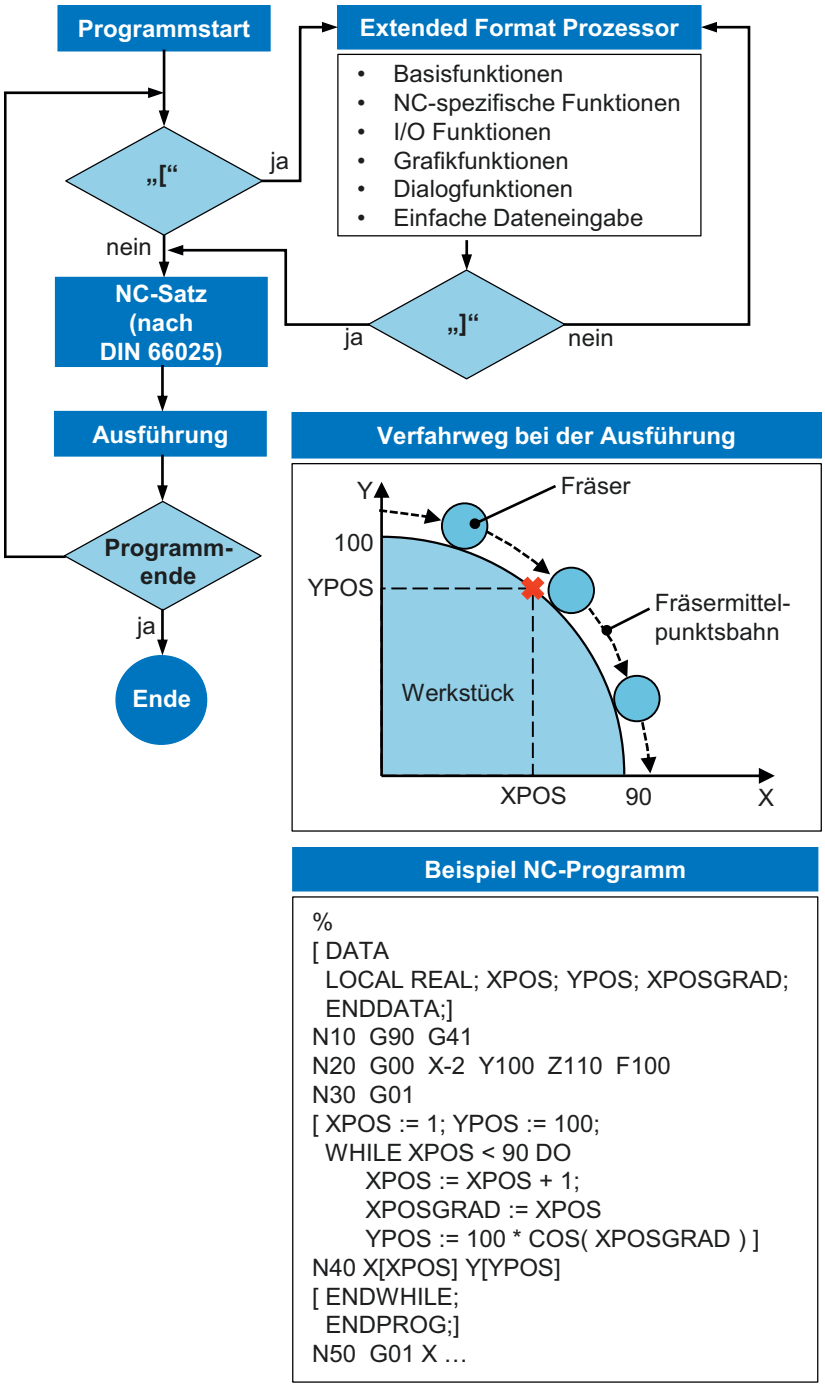


Bild 11.33 Beispiel eines erweiterten Datenformates zur DIN 66025. Nach ISO/DIN 6132

nerunterstützte Programmierverfahren entwickelt, bei denen auch die vorstehend genannten Tätigkeiten weitgehend automatisch von einem Computersystem vorgenommen werden. Im Gegensatz zur manuellen Programmierung wird die Werkstückbearbeitung bei der maschinellen Programmierung mittels einer problemorientierten Sprache, eines objektorientierten Modells oder grafisch-interaktiv beschrieben. Problemorientierte Sprachen verwenden mnemotechnische Ausdrücke, d. h. Wörter und Symbole, die leicht zu merken sind. In objektorientierten Programmierschnittstellen werden die Informationen mit der Hilfe entsprechender Software auf eine vorgegebene hierarchische Struktur abgebildet. Grafisch-interaktive Systeme ermöglichen dem Benutzer, im Dialog und mit grafischen Erläuterungen ein NC-Programm zu erstellen.

Eine der ersten und leistungsstärksten problemorientierten Sprachen ist die im Jahr 1958 am MIT (Massachusetts Institute of Technology) entstandene Programmiersprache

EXAPT 2-Prozessor	Überschrift/Meldung des Prozessors
$$-allgemeine Anweisungen- PARTNO/DREHTEIL … MACHTDT/ 130,150,0.1,10,5,3000,0.8	 Kennzeichnung des Werkstücks Kenndaten der Maschine (Spindelleistung 30 kW) Drehmoment 150 mKp (meterKilopond), Vorschubbereich von 0,1 bis 10 mm/U, Drehzahlbereich von 5 bis 3000 min^{-1} Korrekturfaktor für Rauhtiefe 0,8
$$-Rohteilbeschreibung- CONTUR/BLANCO BEGIN/-5,0,YLARGE,PLAN,-5 RGT/DIA, 70 … TERMCO	 Beginn der Rohteilbeschreibung Beginn bei Punkt ($X=5$, $Y=5$) in positiver Y-Richtung mit Planfläche bei $X=-5$ Nach rechts Zylinder mit Durchmesser 70 mm Ende der Konturbeschreibung des Rohteils
$$-Fertigteilbeschreibung- SURFIN/FINE CONTUR/PARTCO M1,BEGIN/0,0, AYLARGE,PLAN,0,BEV EL,2 … M2,RGT/ PLAN,70,ROUND,1.5 …	 Oberflächengüte (Surface finish) Beginn der Fertigteilkonturbeschreibung Beginn bei Punkt $M1$ ($X=0$, $Y=0$) in positiver Y-Richtung mit Planfläche bei $X=0$. Am Ende des Konturelements befindet sich eine Fase (BEVEL) von 2 mm Breite Nach rechts bei Punkt $M2$, Planfläche bei $X=70$ mit Radius von 1,5 mm

EXAPT 2-Prozessor	Überschrift/Meldung des Prozessors
M3, RGT/DIA,0	Nach rechts bei Punkt $M3$, Zylinder mit Durchmesser 0, Schließen des Konturzugs
TERMCO …	Ende der Konturbeschreibung des Fertigteils
$$-Technologische Anweisungen-PART/MATERL, 250 …	Werkstoffangabe über Codezahl der Werkzeugdatei
SCHRUP=CONT/ SO,LONG,ROUGH,TOO L, 123, SETANG,-90	Definition der Schruppbearbeitung der Kontur (CONTOUR), Einzelbearbeitung (SINGLE OPERATION), Längsbearbeitung (LONG), Schruppbearbeitung (ROUGH) mit dem Werkzeug (TOOL) 123 laut Werkzeugwechseldatei, Anstellwinkel (SETTING ANGLE) –90°
§§–Exekutivanweisungen- COLLNT/ON WORK/SCHRUP CUT/M3,RE,M2 … CLAMP/160,INVERS … WORK/NOMORE FINI	 Kühlmittel ein (COOLANT ON) Bearbeitungsaufruf (WORK) der definierten Arbeitsbedingungen Bearbeitungsaufruf: von $M3$ entgegen der Beschreibungsrichtung (REVERS) bis $M2$ Umspannen auf Einspannebene $X=160$ Ende der Bearbeitung Ende des Teileprogramms

Tab. 11.2 Auszug aus einem EXAPT-Teileprogramm

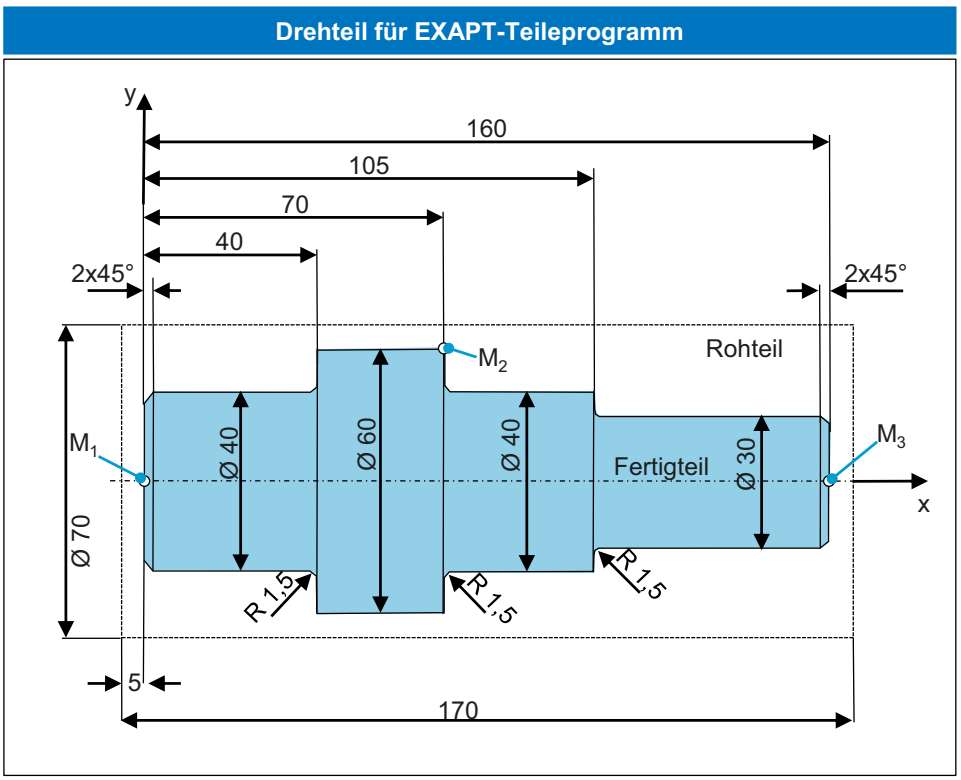


Bild 11.34 Drehteil für EXAPT-Teileprogramm. Nach SIEMENS

APT (Automatically Programmed Tools). Aus dieser Sprache, die aus etwa 300 symbolischen Wörtern besteht, sind eine Reihe von Untermengen hervorgegangen (ADAPT, EXAPT, MINI-APT u. a.) [SHAH72]. Der Grund für die Entwicklung dieser vereinfachten, im Hinblick auf begrenzte Anwendungen und kleinere Rechner ausgelegten Sprachen waren die für damalige Verhältnisse hohen Anforderungen an die Rechnerkapazität von APT.

Das in einer NC-Programmiersprache wie APT erstellte Quellprogramm wird allgemein als „Teileprogramm" bezeichnet. Es enthält alle Daten und Anweisungen, die für die Bearbeitung eines Werkstücks benötigt werden. Tab. 11.2 zeigt ein Beispiel für den prinzipiellen Aufbau eines EXAPT-Teileprogramms, das die Bearbeitung des in Bild 11.34 dargestellten Drehteils definiert. Es beginnt zunächst mit allgemeinen Anweisungen. Die Beschreibung der Roh- und Fertigteilkontur erfolgt von einem zu definierenden Anfangspunkt aus durch Umfahren der Kontur im Uhrzeigersinn und Aneinanderreihung einzelner Konturelemente. Bei Drehteilen beschränkt sich die Beschreibung auf eine Hälfte des symmetrischen Körperquerschnitts, die später automatisch gespiegelt wird. Im Anschluss daran folgen technologische Anweisungen zur Bearbeitungsart (z. B. Schruppen) oder Informationen zur Einspannlage des Werkstücks. Am Ende werden die Bearbei-

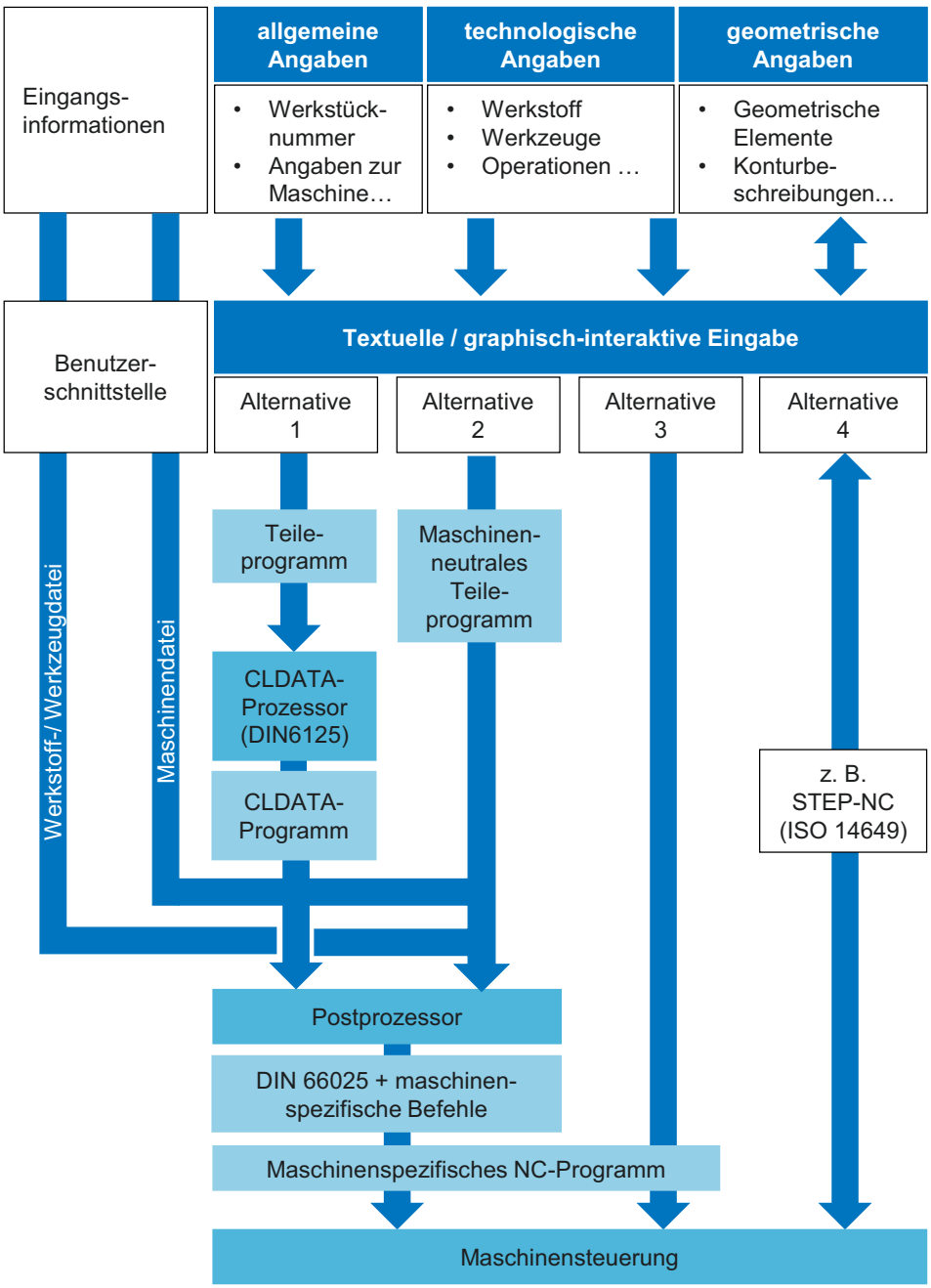


Bild 11.35 Alternativen bei der Generierung eines NC-Programms

tungsvorgänge und deren Reihenfolge durch entsprechende Exekutivanweisungen festgelegt.

Die Umwandlung eines solchen Teileprogramms in die Steuerinformationen für die Werkzeugmaschine erfolgt durch zwei Rechnerprogramme mit den Namen „Prozessor" und „Postprozessor", Bild 11.35, Alternative 1.

Im Prozessor werden die Anweisungen des Teileprogramms zunächst auf formale Fehler überprüft. Es werden alle arithmetischen und geometrischen Anweisungen sowie die Bahn des Werkzeugbezugspunktes berechnet. Mit den Daten aus der Werkstoff- und Werkzeugdatei bestimmt der Prozessor die Schnittwerte, wie Spanungstiefe, Schnittgeschwindigkeit und Vorschubgeschwindigkeit. Eventuell notwendige Schnittaufteilungen und Kollisionsberechnungen werden ebenfalls erledigt. Die vom Prozessor erstellten Daten bedeuten eine allgemeine Lösung des Bearbeitungsproblems und sind von der verwendeten Werkzeugmaschine weitgehend unabhängig. Sie werden mit CLDATA (Cutter Location Data, DIN 66215) bezeichnet. Der Vorteil der Generierung eines solchen Zwischencodes liegt darin, dass diese Daten für eine große Anzahl von NC-Maschinen verwendet werden können [DIN74].

Erst durch den Postprozessor werden diese maschinenunabhängigen Daten an eine bestimmte Werkzeugmaschine angepasst. Dabei wird den vom Prozessor berechneten Größen, wie Wegen, Drehzahl- und Vorschubwerten, die von der Maschinensteuerung verlangte Codierung in der NC-Sprache (beispielsweise nach DIN 66025) zugeordnet und als Steuerinformation im steuerungsspezifischen Format der Werkzeugmaschine ausgegeben.

In Bild 11.35 sind zwei weitere Alternativen zur maschinenspezifischen Erzeugung eines NC-Programms dargestellt. Alternative 2 geht von einem maschinenneutralen Programm aus und generiert daraus über entsprechende Postprozessoren ein maschinenspezifisches NC-Programm. Das Format des neutralen Programms kann sehr unterschiedlich sein. Viele Programmiersysteme verwenden dazu einen maschinenneutralen NC-Code, der stark an die DIN 66025 angelehnt ist. Die Anlehnung an die DIN 66025 hat den Vorteil, dass aufgrund der starken Ähnlichkeit beider NC-Programme die Postprozessoren meist auf einfache Weise durch den Anwender selbst konfiguriert werden können [COSC93].

Andere Systeme verwenden eigene problemorientierte Sprachen und übersetzen das erstellte Programm direkt, ohne die Generierung eines Zwischenformats, wie beispielsweise das CLDATA-File, in den NC-Code für die entsprechende Maschine. Alternative 3, Bild 11.35, beschreibt eine direkte Erstellung eines maschinenspezifischen NC-Programms für eine bestimmte Zielmaschine. In den meisten Fällen werden solche Systeme von Werkzeugmaschinenherstellern für ihre eigenen Produkte entwickelt.

Allen drei Alternativen ist gemeinsam, dass sie ein maschinengebundenes, sequenzielles NC-Programm als Ergebnis haben. Ein Ausweichen auf eine ähnliche Maschine oder die Bearbeitung mit anderen Werkzeugen ist in der Regel nicht möglich. Auch lassen sich Änderungen durch den Facharbeiter an der Maschine nicht über das NC-Programm in die Planung zurückgeben. Deshalb sind etwaige Geometrieänderungen und die optimalen Parameter nur dem Facharbeiter bekannt und im NC-Programm vorhanden.

Ein NC-Programm, dessen Format und Datenmodell ohne aufwendige Transformationen und Modifikationen aus dem moderner CAD- und CAM-Systeme hervorgeht, bietet gegenüber den vorgestellten Programmieralternativen den Vorteil, dass Fehler vermieden werden, sich Informationen über Änderungen zwischen allen Bereichen austauschen lassen und damit die Daten über das Werkstück immer vollständig und aktuell verfügbar sind. Alternative 4 des Bildes 11.35 zeigt den Einsatz eines solchen Datenformates (z. B. ISO 14649). Ein Postprozessor ist hier überflüssig.

Die Programmierung, Bild 11.35 links erfolgt bei den ersten drei Alternativen entweder textuell über einen Editor des entsprechenden Programmiersystems oder, bei moderneren Programmiersystemen, grafisch-interaktiv. Im Fall der Alternative 4 ist dagegen das Datenmodell sehr umfangreich und ein NC-Programm wird zu komplex, um es unmittelbar editieren zu können. Der Facharbeiter oder die Planung kann ein solches NC-Programm nur über entsprechende Software generieren und manipulieren.

Die zur Programmierung notwendigen Eingangsinformationen sind für alle vier vorgestellten Alternativen gleich. Die vom Programmierer einzugebenden Informationen können prinzipiell in drei Arten unterteilt werden (vgl. Bild 11.26):

- allgemeine Angaben,
- geometrische Angaben und
- technologische Angaben.

Unter allgemeinen Angaben versteht man Informationen, die vor der eigentlichen Bearbeitungsbeschreibung festgelegt werden müssen, wie beispielsweise die Nummer des Werkstücks oder die Art der bearbeitenden Maschine.

Geometrische Informationen hingegen beziehen sich auf die geometrischen Elemente des Bauteils. Hierunter fallen Konturbeschreibungen oder spezielle Geometrien wie Nuten, Taschen usw.

Technologieangaben beinhalten im Allgemeinen die einzusetzenden Werkzeuge, Bearbeitungsanweisungen (Schruppen, Schlichten) u. a.

Zur automatischen Generierung der programmierten Bearbeitungsabläufe, wie Schnittaufteilung oder Ermittlung von Vorschüben und Drehzahlen durch den CLDATA-Prozessor, werden technologische Daten wie Werkstoff- oder Werkzeugkennwerte benötigt. Werkstoffkennwerte beschreiben den Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Schnittgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang ist beispielsweise

durch die Werkstoff-Schneidstoff-Kombination und durch die Bearbeitungsart (Drehen, Fräsen usw.) gegeben. Des Weiteren stehen die Geometrieinformationen, wie Längenkorrekturwerte der einzusetzenden Werkzeuge, zur Verfügung.

Die Maschinendatei enthält schließlich sämtliche maschinenspezifischen Daten, wie Spindelleistungen, Drehzahlbereiche u. a., die dem Postprozessor erlauben, ein auf die Werkzeugmaschine angepasstes NC-Programm zu erzeugen.

In den bisherigen Ausführungen wurde aufgrund der historischen Entwicklung verstärkt auf die maschinelle Programmierung anhand problemorientierter Sprachen (APT, EXAPT) eingegangen. Im Folgenden sollen nun rechnergestützte Systeme und Verfahren erläutert werden, die zum einen durch die Kopplungsmöglichkeit zu Systemen anderer Bereiche (z. B. Konstruktion) und zum anderen durch speziell auf den Bearbeitungsprozess und den Benutzer ausgerichtete Programmierwerkzeuge eine effektivere Programmerstellung erlauben.

11.4.2.1 CAD/CAP/CAM-Kopplung

Heutige Tendenzen zur Realisierung einer durchgängigen CAD/CAP/CAM-Prozesskette zielen in die Richtung, CAD-Systeme stärker in den Prozess der NC-Programmerstellung mit einzubeziehen. Berücksichtigt man diese

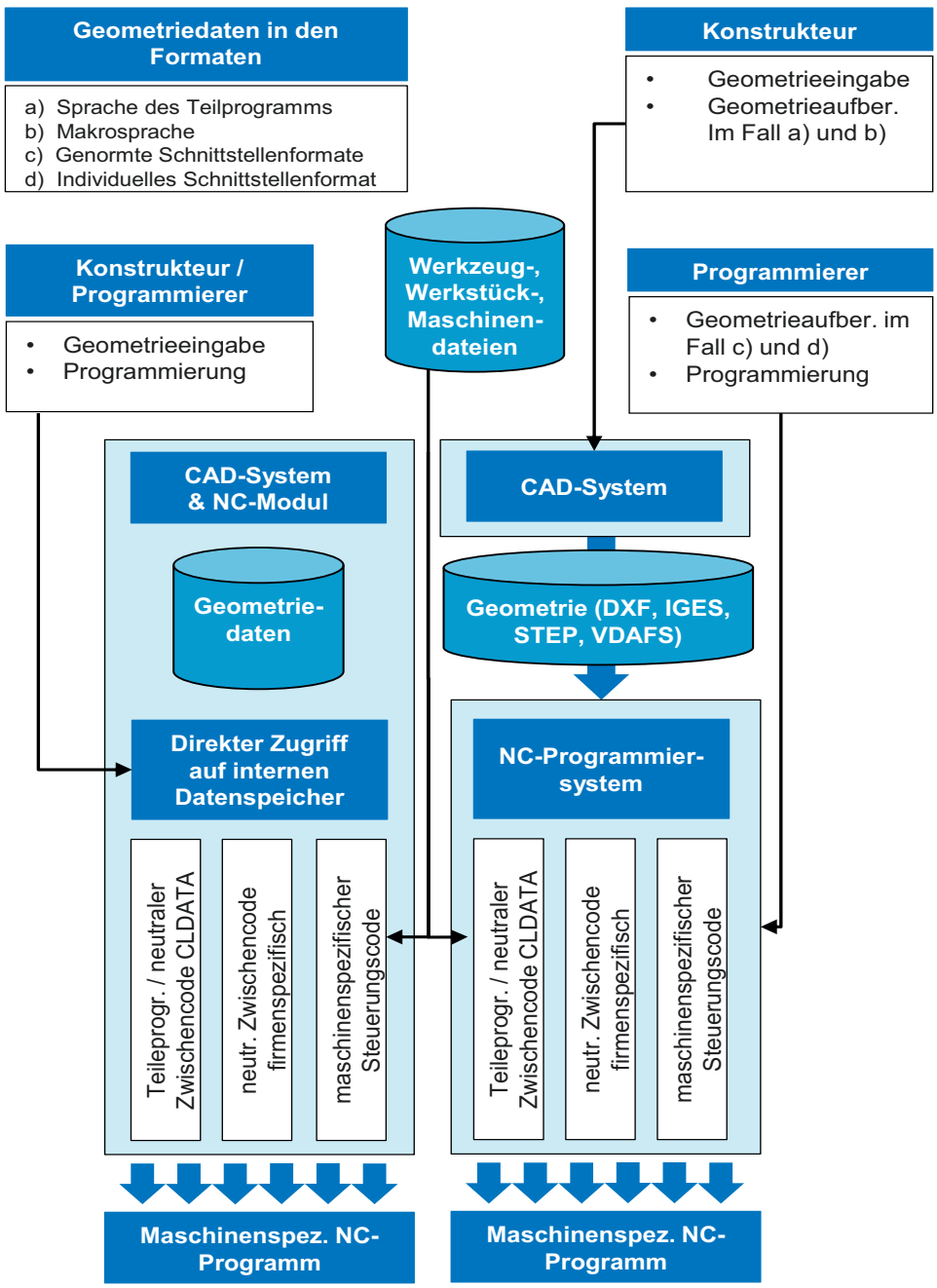


Bild 11.36 Verfahren zur Kopplung von CAD- und NC-Programmiersystemen

Forderung, so ergeben sich prinzipiell zwei unterschiedliche Varianten zur Einbindung der CAD-Systeme (Bild 11.36):

- Nutzung eines einzigen Systems, welches CAD-System und NC-Programmiersystem in sich vereint. In diesem Fall haben sämtliche Funktionen beider Systeme direkten Zugriff auf die identischen internen Datenstrukturen.
- Kopplung des CAD- und des NC-Systems durch geeignete Datenschnittstellen. Hier ist man bestrebt, die im CAD-System erstellten Geometrieinformationen zu nutzen und eine nochmalige Eingabe der Geometriedaten in das NC-Programmiersystem zu vermeiden. Die unterschiedlichen Möglichkeiten dieser Kopplung und die damit einhergehenden Schwierigkeiten werden in einem späteren Abschnitt noch eingehender behandelt.

Allgemein werden NC-Programme heute zentral in der Arbeitsvorbereitung erstellt.

Die notwendigen Werkstückinformationen erhält der Programmierer aus der Konstruktionsabteilung in Form von Werkstattzeichnungen. Das erstellte NC-Programm wird in der Fertigung in die Werkzeugmaschine übertragen und dort durch den Benutzer an der Maschine eventuell optimiert und zur Ausführung gebracht.

In diesem Fall herrscht eine klare Aufgabenteilung zwischen Konstruktion, Planung und Fertigung. Im Gegensatz dazu ist jedoch auch ein Trend zu beobachten, dass sich die Erstellung eines NC-Programms in die Fertigungsbereiche verlagert. Das bedeutet, dass Programme vermehrt auch dezentral und weitgehend ortsunabhängig programmierbar sind. In diesem Zusammenhang sei die Werkstattorientierte Programmierung direkt an der Maschine erwähnt, auf die in ▶ Kap. 11.4.2.4 noch näher eingegangen wird.

Das einzusetzende Programmiersystem und der Ort seines Einsatzes werden im Wesentlichen durch das zu fertigende Teilespektrum und die Fertigungsstruktur bestimmt [MILB89].

Betrachtet man die Kriterien für den Ort seines Einsatzes, würde beispielsweise die Programmierung bei Einzel- oder Kleinserienfertigung sinnvollerweise in der Werkstatt durchgeführt werden, da die Programmerstellung in der Arbeitsvorbereitung einen nicht zu rechtfertigenden organisatorischen Aufwand bedeuten würde. Bei Großserien jedoch, wo eine zeitoptimierte Bearbeitung im Vordergrund steht, wäre die Arbeitsvorbereitung am ehesten in der Lage, diesem Kriterium nachzukommen. Im Gegensatz zum ersten Fall müssten hier die Arbeiter in der Fertigung nicht über umfangreiche Programmierkenntnisse verfügen.

Verfügt ein Betrieb über eine rechnerunterstützte Konstruktion (CAD), so ist man bestrebt, die bereits datentechnisch erfassten Geometrie- und Bearbeitungsinformationen wie Rauhigkeiten, Toleranzen usw. für die NC-Programmerstellung zu nutzen. Die CAD-Daten liegen meist jedoch in einer Form vor, die sich stark von dem Format der NC-Programmiersysteme unterscheidet, sodass in jedem Fall eine entsprechende Aufbereitung der Geometrieinformationen erfolgen muss. Nach den unterschiedlichen Arten dieser Aufbereitung und der Aufgabenverteilung zwischen CAD-System oder NC-Programmiersystem lassen sich die Kopplungsmöglichkeiten von CAD/CAP/CAM-Systemen klassifizieren. Bild 11.36 geht auf die unterschiedlichen Alternativen dieser Kopplung ein. Auf der linken Seite wird ein integriertes System, also ein CAD-System mit integriertem NC-Modul, beschrieben. Diese Alternative hat den Vorteil, dass das NC-Modul direkten Zugriff auf einen gemeinsamen Datenspeicher hat [ANDE90]. Sämtliche benötigten Informationen können abgerufen werden und liegen direkt in dem gewünschten Format vor. Weiterhin wirken sich Änderungen am Bauteil durch das NC-Modul direkt auf das CAD-Modell aus. Es sind also keine zusätzlichen Eingaben für eine eventuelle Aktualisierung der CAD-Daten mehr notwendig. Das Zurückgreifen aller Module auf nur ein gemeinsames Modell des Bauteils wird auch als bidirektionale Assoziativität bezeichnet.

Die in einem solchen integrierten System programmierten Bewegungsbahnen und die sich daraus ergebenden Werkstückkonturen lassen sich durch die Nutzung der CAD-Fähigkeiten des Arbeitsplatzes sehr gut grafisch darstellen.

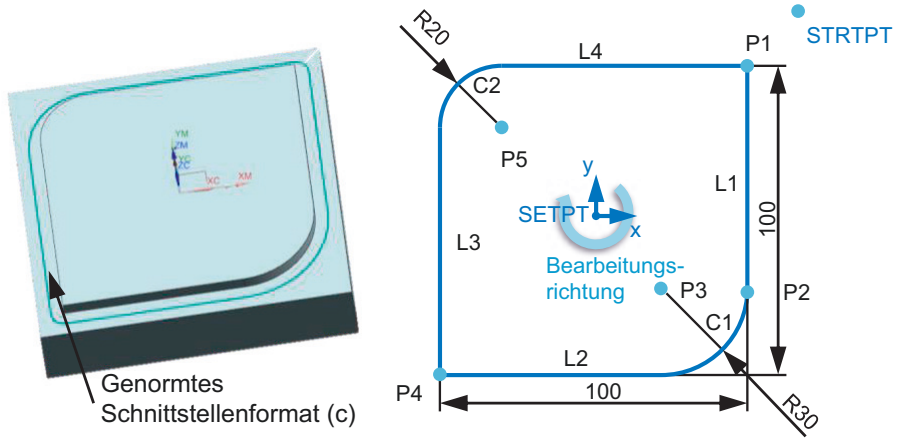
Das NC-Programm liegt nach der Programmierung, wie in Bild 11.36 näher erläutert, in Form eines Teileprogramms (oft auch direkt im CLDATA-Format), eines neutralen Zwischencodes oder direkt in einem maschinenspezifischen Code vor. Die weitere Bearbeitung erfolgt bei den ersten beiden Alternativen durch einen anschließenden Postprozessorlauf. Das Ergebnis ist ein lauffähiges NC-Programm (DIN 66025) für eine bestimmte Werkzeugmaschine.

Die Programmierung in einem integrierten System erfolgt im Wesentlichen durch einen Programmierer aus der Arbeitsvorbereitung, ggf. in Zusammenarbeit mit dem Konstrukteur. Das setzt jedoch voraus, dass sowohl der Konstrukteur als auch der Programmierer mit dem Gesamtsystem vertraut sein müssen. Zum Einsatz kommen diese integrierten Systeme hauptsächlich bei der Drei- bzw. Fünf-Achsbearbeitung von Bauteilen mit Freiformflächen, also beliebig gekrümmten Oberflächen, da in diesem Fall die aufwendige Aufbereitung der komplexen Geometrien durch das Softwaresystem automatisiert erfolgt.

Die rechte Seite von Bild 11.36 beschreibt die Kopplungsstellen von verteilten Systemen. Man unterscheidet hier vier unterschiedliche Formate zum Austausch von Geometriedaten zwischen CAD- und Programmiersystem:

Bild 11.37 Beispiele der verschiedenen Formate für den Austausch von Geometriedaten. Nach SIEMENS NX

Beispielgeometrie Siemens NX



Beschreibung mittels APT (Sprache des Teileprogramms (a))

```
PARTNO / APT-1
CLPRNT
UNITS / MM NOPOST
CUTTER / 10.0
$$GEOMETRY DEFINITION          // Anlegen von Geometrieelementen
SETPT = POINT / 0.0, 0.0, 0.0
STRTPT = POINT / 70,70,0
P1 = POINT / 50, 50, 0
P2 = POINT / 50, -20, 0
P3 = POINT / 20, -20, 0
C1 = CIRCLE / CENTER, P3, RADIUS, 30
P4 = POINT / -50, -50, 0
P5 = POINT / -30, 30, 0
C2 = CIRCLE / CENTER, P5, RADIUS, 20
L1 = LINE / P1, P2                 // Anlegen von Beziehungen
L2 = LINE / P4, PERPTO, L1
L3 = LINE / P4, PARLEL, L1
L4 = LINE / P1, PERPTO, L1
PLAN1 = PLANE / P1, P3, P4         // Definition der Bearbeitungsebene
PLAN2 = PLANE / PARLEL, PLAN1, ZSMALL, 16
$$MOTION COMMANDS                  // Programmierung der WZ-Bewegung
SPINDL / 3000, CW
FEDRAT / 100, 0
FROM / STRTPT
GO/TO, L1, TO, PLAN2, TO, L4
TLLFT,                             // Radiuskompensation
GOFWD / L1, TANTO, C1              // WZ-Pfad
GOFWD / C1, TANTO, L2
GOFWD / L2, PAST, L3
GORGT / L3, TANTO, C2
GOFWD / C2, TANTO, L4
GOFWD / L4, PAST, L1
NOPS GOTO / STRTPT
FINI                               // Programmende
```

- Sprache des Teileprogramms (a),
- Makrosprache (b),
- genormtes Schnittstellenformat (c),
- individuelles Schnittstellenformat (d).

Die ersten beiden Datenformate sind sehr stark auf die Anforderungen des NC-Programmiersystems ausgelegt. Dementsprechend findet die Geometrieaufbereitung bereits im CAD-System selbst statt. Beispiele für die Sprache des Teileprogramms (a) sowie die Verwendung der genormten Schnittstelle (c) in Siemens NX zeigt Bild 11.37.

Sprache des Teileprogramms

Im ersten Fall geschieht die Übertragung der Geometriedaten über eine Sprachschnittstelle, die sich an der Syntax und

Semantik der jeweiligen Sprache des Teileprogramms (APT o. Ä.) orientiert. Die Geometrieinformationen liegen also direkt in der Sprache des NC-Programmiersystems vor. In den sich daran anschließenden Arbeitsschritten werden im NC-Programmiersystem die notwendigen Technologieinformationen eingegeben und durch einen Prozessor- bzw. Postprozessorlauf das NC-Programm erzeugt. Nachteilig ist bei dieser Art der Kopplung, dass das CAD-System lediglich mit dem Programmiersystem verbunden werden kann, das auch die entsprechende Sprache verarbeitet. Ein Vorteil ist die Einsatzmöglichkeit eines einfacheren Programmiersystems, da lediglich Technologiedaten in das im CAD-System erzeugte Teileprogramm hinzugefügt werden müssen.

Makrosprache

Im zweiten Fall, der Übertragung der Geometrieinformationen in Form von Makros, erfolgt der Datenaustausch über definierte Bearbeitungsgeometrien. Die einzelnen Geometrieelemente wie Bohrungen, Taschen, Freistiche, Gewinde usw. werden im CAD-System als Makros beschrieben und

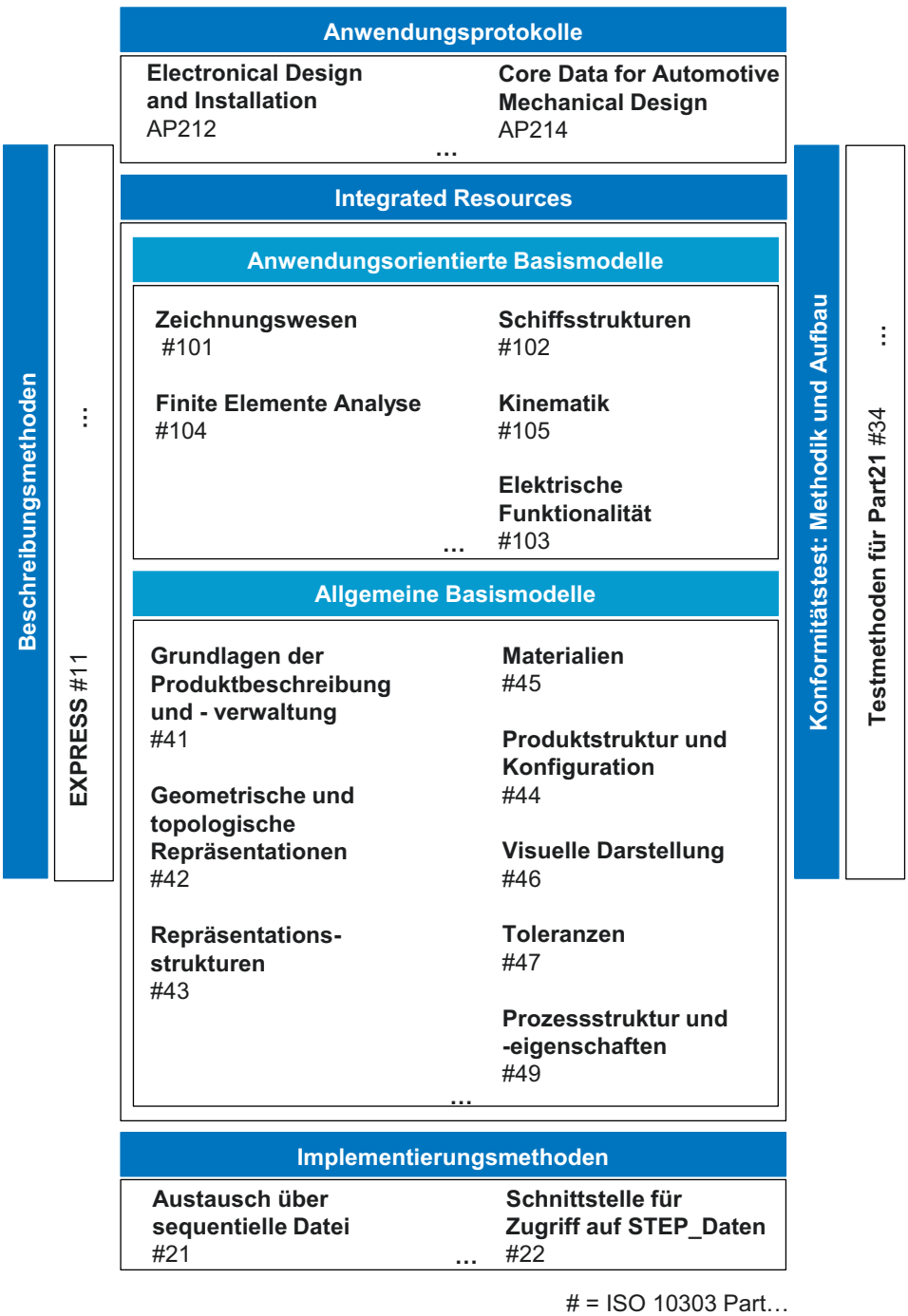


Bild 11.38 Aufbau des STEP-Standards. Nach NIST: „STEP on a page“

parametrisiert. Das NC-Programmiersystem ist in der Lage, diese Makros zu interpretieren und fügt entsprechende Bearbeitungsinformationen hinzu. Voraussetzung für diese Methode ist jedoch, dass das Bauteilspektrum gering ist und in seiner Geometrie wenig variiert. Nur dann kann ein hinreichender Umfang der Makrosprache mit vertretbarem Aufwand realisiert werden.

Genormte Schnittstellenformate

Die letzten beiden Kopplungsmöglichkeiten sind zugleich die häufigsten. In beiden Fällen werden Geometriedaten übertragen, die nicht speziell auf die Weiterverarbeitung in einem NC-Programmiersystem ausgelegt sind, sodass eine Aufbereitung der Daten notwendig ist. Die Verwendung solcher genormten Geometrieschnittstellen hat den Vorteil, dass in der Regel diese Informationen für eine Vielzahl verschiedener Programmiersysteme genutzt werden können. Schnittstellenformate wie VDAFS (vgl. Bild 11.44), IGES (Initial Graphics Exchange Specification) oder DXF (Data Exchange Format) werden heutzutage von den meisten Systemen unterstützt. Ein großer Nachteil dieser Datenformate ist jedoch, dass lediglich gestaltbeschreibende Daten übertragen werden. Bearbeitungsrelevante Informationen werden nicht unterstützt. Sie müssen manuell aus der CAD-Werkstattzeichnung in das NC-Programmiersystem übertragen werden, was im Sinne einer durchgängigen CAD/CAP/CAM-Verfahrenskette keine zufriedenstellende Lösung bedeutet.

Ein Lösungsansatz zur Verbesserung des Datenaustausches ist der Einsatz der Produktdatentechnologie und entsprechend leistungsfähiger Schnittstellenformate auf der Basis von Normen zur Produktdatenbeschreibung und zum Produktdatenaustausch anstelle von reinen Geometrieschnittstellen. Die ISO-Norm STEP (STandard for the Exchange of Product Model Data) ist als Serie von ISO 10303 – Standards erschienen und bildet die Basis für eine solche Schnittstelle.

Der Standard in seinem aktuellen Umfang mit den darauf aufbauenden Anwendungsprotokollen reicht bislang nicht aus, um alle zur NC-Programmierung notwendigen Datenelemente zu beschreiben. Erst durch die ISO 14649, die Teile von STEP (ISO 10303) und einzelne Anwendungsprotokolle referenziert, ist eine durchgängige STEP-basierte NC-Programmierung möglich.

Gegenüber Schnittstellenformaten zum Geometrieaustausch, wie VDAFS, DXF oder IGES, hat STEP den Vorteil, dass es sich um eine Schnittstelle zur umfassenden Beschreibung von Produktdaten handelt und so Daten in sämtlichen Bereichen der integrierten Fertigung, also CAD, CAP, CAM, PPS, CAQ, sicher ausgetauscht werden können. Zusätzliche Kriterien sind die Minimierung des Speicherbedarfs, die Effizienz der Umsetzung rechnerintern gespeicherter Daten (Serverlösung), die Allgemeingültigkeit und Korrektheit der Modelle sowie die mathematisch saubere und eindeutige Spezifikation von Zusammenhängen [EVER94; o. V.90].

Der Standard STEP besteht neben den eigentlichen Modellen zur Beschreibung von Produktdaten aus Beschreibungsmethoden (*Description Methods*), Implementierungsmethoden (*Implementation Methods*) und Methoden zum Konformitätstest (*Conformance Testing Methodology and Framework*). Den Kern von STEP stellen jedoch die sogenannten „Partialmodelle" dar. Sie enthalten die verschiedenen Produktinformationen, die implementationsunabhängig sind und für unterschiedliche Anwendungsprotokolle eine

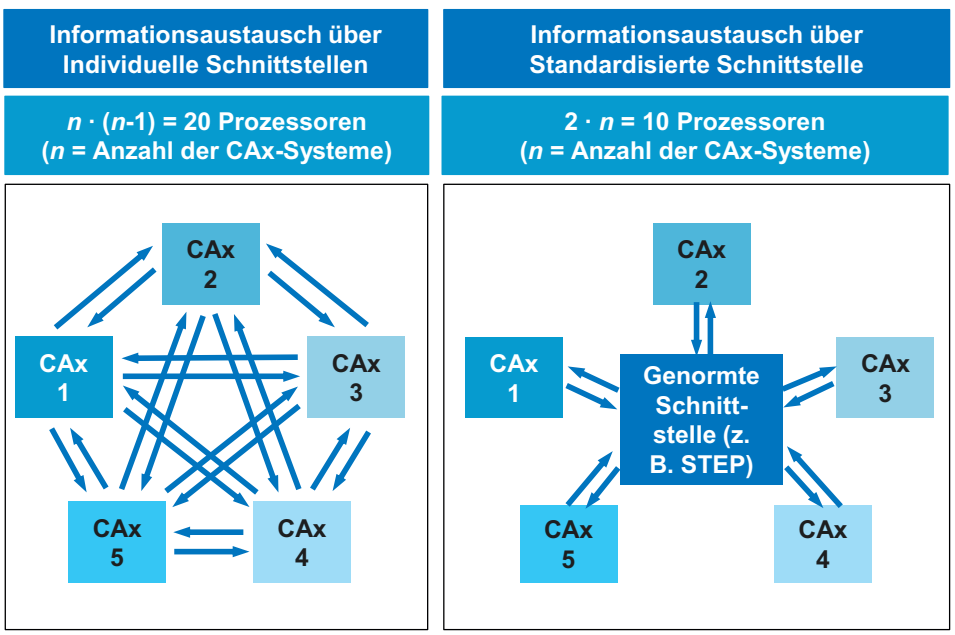


Bild 11.39 Vorteile einheitlicher, standardisierter Schnittstellen

einheitliche Basis bilden [PROS17]. Sie gehören zu den sogenannten „Integrated Resources“, Bild 11.38. Mit ihrer Hilfe lassen sich z. B. Geometrie-, Topologie-, Material-, Toleranz-, Formelemente- oder Strukturinformationen definieren.

Daneben unterscheidet man die Modelle für spezielle Anwendungen, die sogenannten „Application Resources“. Um die Partialmodelle für bestimmte Anwendungen nutzen zu können, ist die Definition von derartigen Anwendungsprotokollen (APs) notwendig. Erst durch diese Erweiterung wird z. B. im Falle der CAD/CAP/CAM-Kopplung eine Schnittstelle zur Unterstützung aller fertigungsrelevanten Daten definiert. Beispielsweise wird im AP festgelegt, dass in einem bestimmten Kontext eine Gerade, die nach den Integrated Resources beschrieben ist, eine Maßlinie ist. Das Anwendungsprotokoll legt so die Bedeutung und den Zusammenhang einzelner Grunddatenelemente fest.

Individuelle Schnittstellenformate

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen genormten Schnittstellen ist die individuelle Schnittstelle optimal an das entsprechende NC-Programmiersystem angepasst. Meist jedoch sind die Prozessoren, die die CAD-Daten in das Datenformat des Programmiersystems umwandeln, vom Anwender selbst geschrieben und werden nicht vom CAD-Systemhersteller unterstützt und gepflegt. Bei auftretenden Übersetzungsfehlern oder neuen Versionen der CAD-Software kann dies von Nachteil sein. Weiterhin ist durch die spezifische Kopplung beider Systeme die Anbindung des Programmiersystems an andere CAD-Systeme stark eingeschränkt (Bild 11.39).

Probleme der CAD/CAP/CAM-Kopplung

Die Probleme bei der Kopplung von CAD/CAP/CAM-Systemen entstehen, wie bereits erwähnt, hauptsächlich bei der

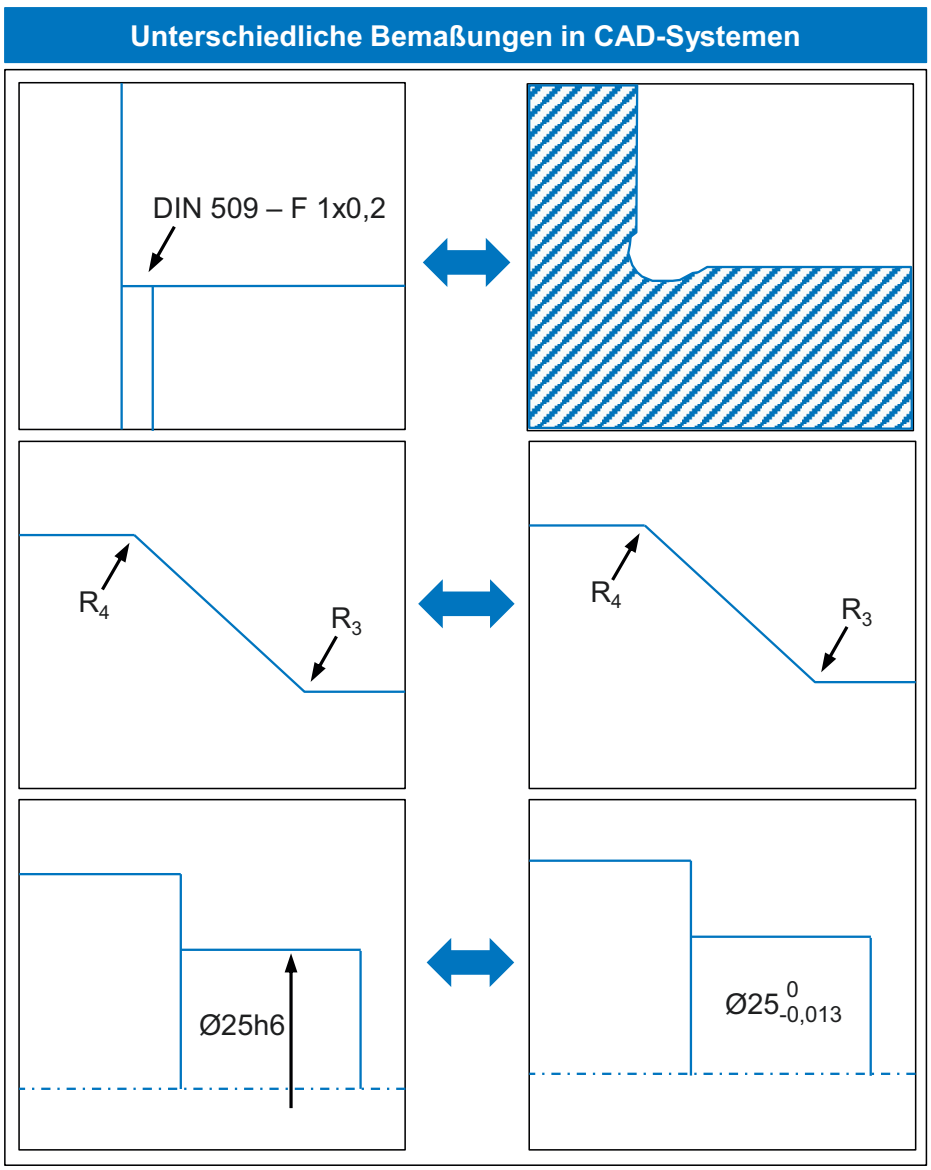


Bild 11.40 Unterschiedliche Bemaßungen in CAD-Systemen. Nach Pfeifer

Übernahme von geometrie- und fertigungsrelevanten Informationen aus den vorgelagerten CAD-Systemen. Fertigungsrelevante Informationen wie Form- und Lagetoleranzen, Aufmaße, Freistiche, Rundungen, Fasen, Oberflächengüte oder textuelle Ergänzungen liegen in CAD-Systemen in unterschiedlichster Weise vor, ◘ Bild 11.40, und müssen für die NC-Programmierung entsprechend aufbereitet werden. Andere Informationen wie Schraffuren oder Bemaßungen sind aus Zeichnungen zu löschen, da sie irrelevant für die weitere Bearbeitung sind.

Bei der Geometrieübernahme kann zwischen vier prinzipiellen Problemen unterschieden werden:

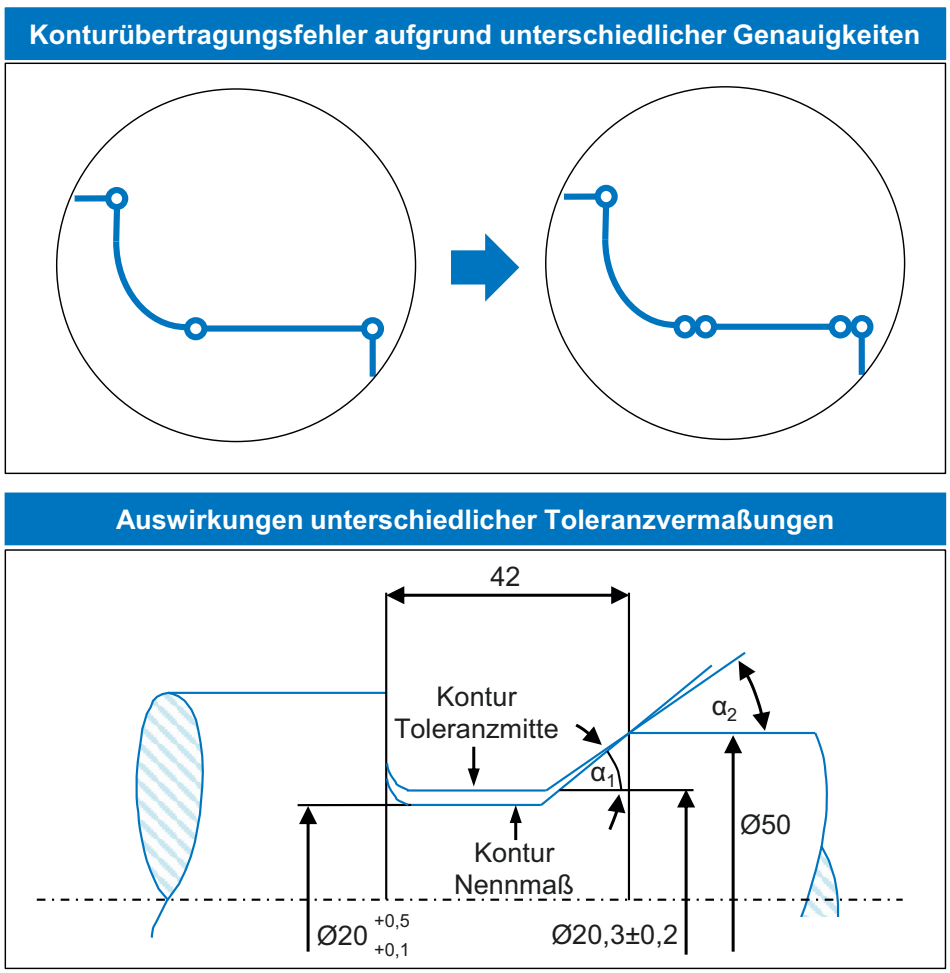
- Geometrieanpassung,
- unterschiedliche Genauigkeit beider Systeme,
- unvollständige Geometrie,
- Verwendung asymmetrischer Toleranzen.

Im Fall der Geometrieanpassung sind der Werkstücknullpunkt, die Bearbeitungslage sowie der Maschinennullpunkt festzulegen, da in der Konstruktion meist andere Bezugspunkte gewählt wurden. Weiterhin müssen teilweise Konturen verändert oder bei Einsatz unterschiedlicher Bearbeitungstechnologien oder Aufspannungen möglicherweise aufgeteilt werden. In der Folge werden, ausgehend von einem Bauteilmodell, zunächst einzelne Geometriemodelle erzeugt, die als Basis für die weitere Programmierung dienen.

Probleme anderer Art bereiten die unterschiedlichen Genauigkeiten der gekoppelten Systeme. Arbeitet beispielsweise das Programmiersystem mit einer höheren Genauigkeit als das CAD-System, kann das zur Folge haben, dass Konturen oder allgemein Flächen und Körper des Bauteils nicht länger miteinander verbunden sind. ◘ Bild 11.41 oben beschreibt die Auswirkung an einem einfachen Beispiel.

Ein anderer Grund für nicht zusammenhängende Geometrieelemente sind die unterschiedlichen Anforderungen, die der Konstrukteur und der Programmierer an die Geometrie stellen. Dem ersteren genügt meist die rein grafische Abbildung des Bauteils, sodass er selten mit der höchsten Auflösung am Bildschirm des CAD Systems arbeiten muss. Diese Auflösung ist aber oft notwendig, um Lücken oder Überlappungen zwischen den Elementen erkennen zu können.

Doch nicht zuletzt ergeben sich durch die unterschiedliche Art der Toleranzbemaßung in beiden Systemen die größten Schwierigkeiten bei der Geometrieübernahme [FRAN91]. In CAD-Systemen wird stets das Nennmaß der Kontur, in NC-Programmiersystemen stets das an der Toleranzmitte orientierte Maß der Kontur angegeben. Letzteres



◘ **Bild 11.41** Probleme bei der Übertragung von CAD-Daten in ein NC-Programmiersystem. Nach Franz

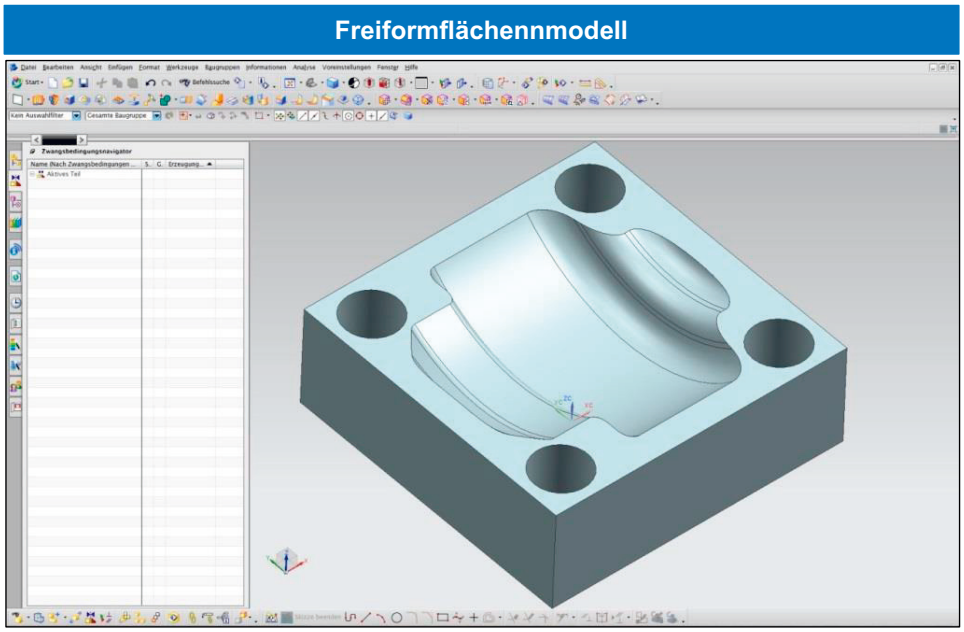


Bild 11.42 Beispiel für ein Freiformflächenmodell in Siemens NX. Nach SIEMENS

ist deshalb notwendig, da Bearbeitungsabweichungen an der Werkzeugmaschine sowohl positiv als auch negativ in gleichem Maße auftreten.

Die asymmetrischen Toleranzen der CAD-Geometriedaten und deren Änderungen im NC-Programmiersystem haben teilweise größere Auswirkungen, die sich ebenfalls auf benachbarte Konturelemente auswirken. Bild 11.41 unten beschreibt diese Problematik anhand eines Drehteils. Die Kontur, hier ein Freistich, setzt sich aus einem zylinderförmigen und einem kegelförmigen Abschnitt zusammen. Der Zylinder bzw. dessen Durchmesser ist anfangs im CAD-System asymmetrisch mit 20+0,5/+0,1 mm bemaßt worden. Das Verschieben des Durchmessers auf die Toleranzmitte hat nun zur Folge, dass sich der Winkel des Kegels ebenfalls ändert bzw. vom Programmierer verändert werden muss. Bei komplexeren Bauteilen mit einer großen Zahl von asymmetrischen Toleranzen ist demnach stets eine manuelle und damit zeitintensive und fehleranfällige Geometrieaufbereitung erforderlich.

Freiformflächenbearbeitung

Im Folgenden wird nochmals gesondert auf die Programmerstellung für die Freiformflächenbearbeitung eingegangen, da diese Art der Bearbeitung besondere Anforderungen an CAD/CAP/CAM-Systeme stellt. Bild 11.42 gibt ein Beispiel für ein teilweise aus Freiformflächen bestehendes Bauteil (Vorrichtung) im CAD/CAP/CAM-System NX der Firma Siemens.

Prinzipiell kann die Schlichtbearbeitung von Freiformflächen, wie in Bild 11.43 dargestellt, auf drei unterschiedliche Arten durchgeführt werden: mittels der 3-, 3½- oder 5-Achs-Fräsbearbeitung. Im Gegensatz zur 2½-Achs-Bearbeitung, also der Interpolation von zwei Achsen und der Zustellung der dritten Achse um einen festen Wert, werden bei den erstgenannten Verfahren mindestens drei Achsen synchron bewegt. Im Falle der 3-Achs-Bearbeitung werden die Bewegungen von genau drei Achsen interpoliert. Die Orientierung des Fräsers bleibt dabei konstant in Richtung der *Z*-Achse des Maschinenkoordinatensystems. Bei der 3½-Achs-Bearbeitungen wird diese Orientierung um konstante Winkel verändert, sodass die Rotationsachse des Fräsers nicht länger mit der *Z*-Achse des Werkstückkoordinatensystems zusammenfällt. In Bild 11.43 ist zur vereinfachten grafischen Darstellung das Werkzeug lediglich um einen Winkel, den Winkel α, angestellt worden. Die 5-Achs-Bearbeitung erlaubt schließlich eine kontinuierliche Anpassung der Orientierung des Fräsers. So kann eine jederzeit optimale Anstellung des Werkzeugs zur Werkstückoberfläche gewährleistet werden.

Die 3- und 3½-Achs-Fräsbearbeitungen haben den Vorteil, dass aufgrund der geringeren Achsanzahl die Berechnungen der Werkzeugbahnen weniger aufwendig und damit weniger zeitintensiv sind. Kollisionen können leichter berechnet werden und Singularitäten, also die nicht eindeutige Zuordnung kartesischer Positionen zu den entsprechenden Achsstellungen, treten nicht auf. Weiterhin können, da für die Positionierung des Werkstücks nur Linearachsen verfahren werden, höhere Vorschübe, also höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten, erreicht werden. Im Gegensatz dazu sind bei der 5-Achs-Bearbeitung die Maschinenlaufzeiten kürzer. Die jeweils optimale Ausrichtung des Werkzeugs zur Werkstückkontur erlaubt größere Zustellungen (hoher Material-

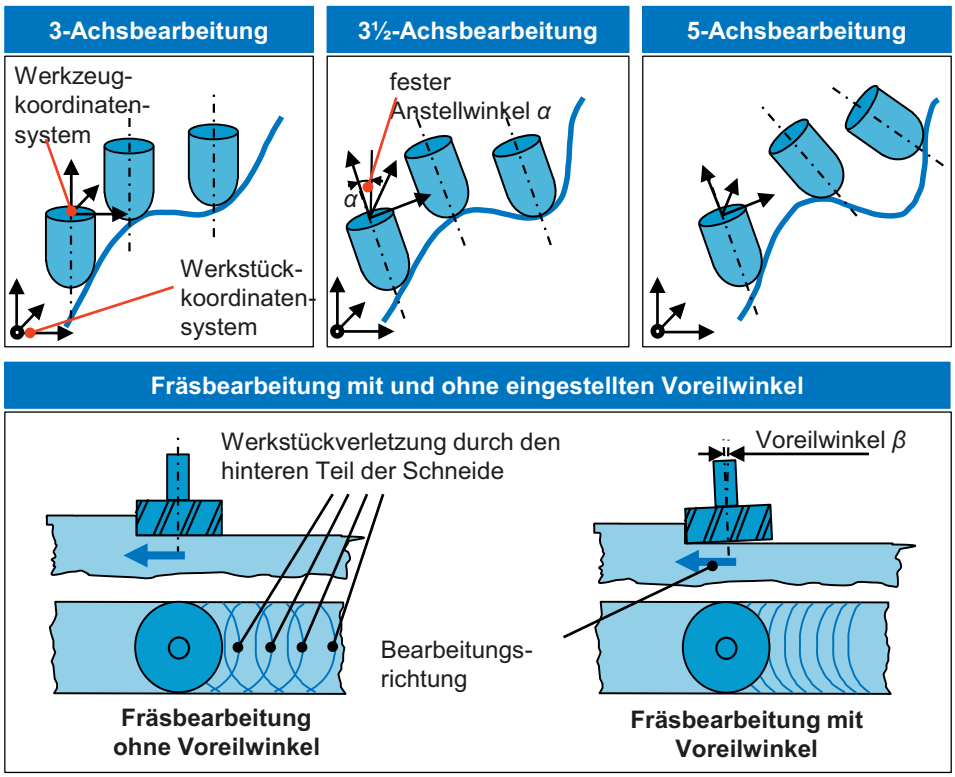


Bild 11.43 Möglichkeiten der Freiformflächenbearbeitung bei unterschiedlicher Achsanzahl (oben) sowie Auswirkungen der Fräsbearbeitung ohne und mit eingestelltem Voreilwinkel (unten)

abtrag), wodurch sich der Nachbearbeitungsaufwand durch die optimale Werkzeugorientierung wesentlich geringer hält. Komplexe Bauteilgeometrien können in einem Arbeitsgang, in einer Aufspannung und meist ohne Nachbearbeitung genauer gefertigt werden. So ist ein Umspannen und nochmaliges, zeitintensives Ausrichten des Werkstücks nicht notwendig.

Die kinematisch komplexeren Vorgänge erfordern jedoch auch darauf ausgelegte Strategien. Beispielsweise ist ein leichtes Kippen (Sturz) des Messerkopffräsers um den sogenannten Voreilwinkel β in Bearbeitungsrichtung notwendig, damit nur ein definierter Bereich des Fräserumfangs am Werkstück angreift und eine Bauteilverletzung im hinteren Bereich der Schneide vermieden werden kann.

Um den erhöhten Anforderungen gerecht zu werden, existieren speziell darauf ausgelegte CAD/CAP/CAM-Systeme. Denn im Gegensatz zu einfacheren Drehteilgeometrien wird im Falle der Freiformflächenbearbeitung die komplexe Geometrie meist mit Hilfe eines CAD-Systems erzeugt. Das CAD-System ist in diesem Fall häufig in ein Gesamtsystem integriert oder aber steht mit dem Programmiersystem über eine neutrale Schnittstelle in Verbindung, Bild 11.36.

In der Automobilindustrie beispielsweise werden oftmals Geometrieinformationen über die VDAFS (VDA-Flächenschnittstelle) ausgetauscht. Bild 11.44 zeigt den Ausschnitt eines VDAFS-Files. Bei der Definition der Schnittstelle beschränkte sich der VDA im Wesentlichen auf die Beschreibung geometrischer Elemente. Auf Bemaßungen, Definition von Bauteilattributen (z. B. Oberflächengüte), Texte usw. wurde verzichtet, um ein weniger kompliziertes Schnittstellenformat definieren zu können.

Der Befehlsumfang der VDAFS, Version 2.0, beschränkt sich auf 17 verschiedene Befehlstypen. Davon dienen neun Befehle der Geometriedefinition, acht der Strukturierung der Datei. Geometrieelemente sind beispielsweise Einzelpunkte, Punktfolgen, Kurven in Polynomdarstellung oder Flächen in Polynomdarstellung. Strukturierende Befehle sind Anfangs- und Enddefinition von Geometriegruppen oder Kommentarzeilen. Aufgerufen werden die Befehle in einem APT-ähnlichen Format:

- name = BEGINSET,
- name = POINT/Parameter,
- name = CURVE/Parameter,
- name = SURF/Parameter,
- name = ENDSET.

„name“ steht hier für einen Variablennamen, das Wort hinter dem Gleichheitszeichen ist der entsprechende Befehl. Im Falle von Geometriebefehlen werden hinter dem Schrägstrich die die Geometrie beschreibenden Parameter angegeben.

In dem in Bild 11.44 dargestellten Beispiel ist eine Freiformfläche, bestehend aus 15 Flächensegmenten (Patches) in u-Richtung und 18 Flächensegmenten in v-Richtung, beschrieben. Diese Patches, die jeweils durch genau ein Poly-

Ausschnitt aus der VDAFS-Datei zu einer Freiformfläche

```
SLDWORKS = HEADER / 20                                                    00000001
************************************************************************ 00000002
VDAFS VERSION     :  2.0                                                  00000003
---------------------------- SENDER DATA ---------------------------- 00000004
SENDER COMPANY    :  WZL RWTH AACHEN                                      00000005
CONTACT PERSON    :  Michael Königs, Marian Wiesch                        00000006
TELEPHONE NO.     :  0241 80 27733 - 0241 80 28473                        00000007
ADDRESS           :  Steinbachstrasse 19                                  00000008
SENDING SYSTEM    :  SolidWorks-2014292                                   00000009
SENDING DATE      :  09/07/2017                                           00000010
FILE NAME         :  WZL_FREEEFORM_SURFACE.vda                            00000011
----------------------------- PART DATA ----------------------------- 00000012
PROJECT NAME      :  FREEFORM_SURFACE                                     00000013
OBJECT CODE       :  001                                                  00000014
VARIANT           :  1                                                    00000015
CONFIDENTIALITY   :  UNCLASSIFIED                                         00000016
DATE EFFECTIVE    :  09/07/2017                                           00000017
---------------------------- RECEIVER DATA ---------------------------- 00000018
COMPANY NAME      :  UNKNOWN                                              00000019
RECEIVER NAME     :  UNKNOWN                                              00000020
************************************************************************ 00000021
SR9 = SURF / 15, 18, 0.0000000000000000E+00, 5.3024374665930803E-02,      00000430
 1.0252231938902499E-01, 1.6226214122865501E-01,                          00000431
 2.4878200018264601E-01, 3.3361[illegible]
 4.2183087485331300E-01, 4.8604[illegible]
 5.7468618796396298E-01, 6.7044[illegible]
 7.6435230667751397E-01, 8.2414[illegible]
 8.7208443007856395E-01, 9.2192[illegible]
 9.8311588024776497E-01, 1.0000[illegible]
 0.0000000000000000E+00, 6.2500[illegible]
 1.2500000000000000E-01, 1.8750[illegible]
 2.5000000000000000E-01, 3.1250[illegible]
 3.7500000000000000E-01, 4.3750[illegible]
 5.0000000000000000E-01, 5.6250[illegible]
 6.2500000000000000E-01, 6.8750[illegible]
 7.1875000000000000E-01, 7.5000[illegible]
 7.8125000000000000E-01, 8.1250[illegible]
 8.7500000000000000E-01, 9.3750[illegible]
 1.0000000000000000E+00,
4, 4, 0.0000000000000000E+00, -0[illegible]
 0.0000000000000000E+00, -0.0000[illegible]
 8.0912135832404406E+00, -0.0000[illegible]
 -3.9031278209478160E-15, 2.6020[illegible]
 -1.8790150988578060E+00, 0.0000[illegible]
 7.8062556418956319E-15, -5.2041[illegible]
 2.8487916460635115E-01, -3.3565[illegible]
 4.1660363730381539E-05, -9.1175[illegible]
 8.8817845730693403E-16, -1.4329[illegible]
 3.1346596363263579E-01, 5.8301646808845822E-02,                          00000457
```

Trägerfläche (Surface)

```
name = SURF/nps,npt,((nps+1))*[pars],
((npt+1))*[part]((nps*npt))*[iordu,iordv,
((iordu*iordv))*[ax],((iordu*iordv))*
[ay],((iordu*iordv))*[ax]]
```

• name	Name der Trägerfläche
• nps,npt	Anzahl der Trägerflächensegmente in u- und v-Richtung
• iordu,iordv	Polynomgrad des aktuellen Trägerflächensegments in u- bzw. v-Richtung
• pars,part	Definition der Trägerflächensegmente in s- bzw. t-Richtung
• ax,ay,az	Jeweilige Koeffizienten des aktuellen Trägerflächensegments

Bild 11.44 Ausschnitt aus der VDAFS-Datei zu einer Freiformfläche

nom definiert sind, gehören zu einer Fläche, SR9, die die Oberfläche des Bauteils ist.

$$x(u,v) = \sum_{k=1}^{iordv-1} \sum_{j=0}^{iordu-1} ax_{j,k} u^j v^k \tag{11.1}$$

$$y(u,v) = \sum_{k=1}^{iordv-1} \sum_{j=0}^{iordu-1} ay_{j,k} u^j v^k \tag{11.2}$$

$$z(u,v) = \sum_{k=1}^{iordv-1} \sum_{j=0}^{iordu-1} az_{j,k} u^j v^k \tag{11.3}$$

Parameter:

$ax_{j,k}$, $ay_{j,k}$, $az_{j,k}$: Koeffizienten des Flächensegmentes
u, v: lokale Parameter des Flächensegmentes
i_{ordu}, i_{ordv}: Polynomordnung des Flächensegmentes in u- bzw. v-Richtung

Die lokalen, auf jeweils ein Flächensegment festgelegten Parameter u, v laufen auf diesen Flächen in den Grenzen von 0 bis 1. Um flächenübergreifend auf Positionen zugreifen zu können, wurden globale Parameter „s“ und „t“ definiert, die den lokalen Parametern u und v entsprechen. Deren Definitionsbereich wird in der Zeile,

*SRF*00002 = *SURF*/3,1,0.,1.,2.,3.,0.,1.,

hinter dem „/“-Zeichen und den ersten beiden Ziffern (Anzahl der Flächensegmente in u = 3 und v-Richtung = 1) angegeben. Der Parameter s läuft also in dem ersten Flächensegment von dem Wert 0 nach 1, im zweiten von 1 nach 2 usw. Entsprechend läuft der Parameter t von 0 nach 1 in jedem der drei Patches.

Die darauffolgende Zeile gibt die Ordnung des Polynoms (iordu, iordv) in u- und v-Richtung an. Daran anschließend werden die Koeffizienten *ax*, *ay*, *az* festgelegt. Zur Verdeutlichung ihrer Reihenfolge sind die Koeffizienten (*ax*, *az*) der

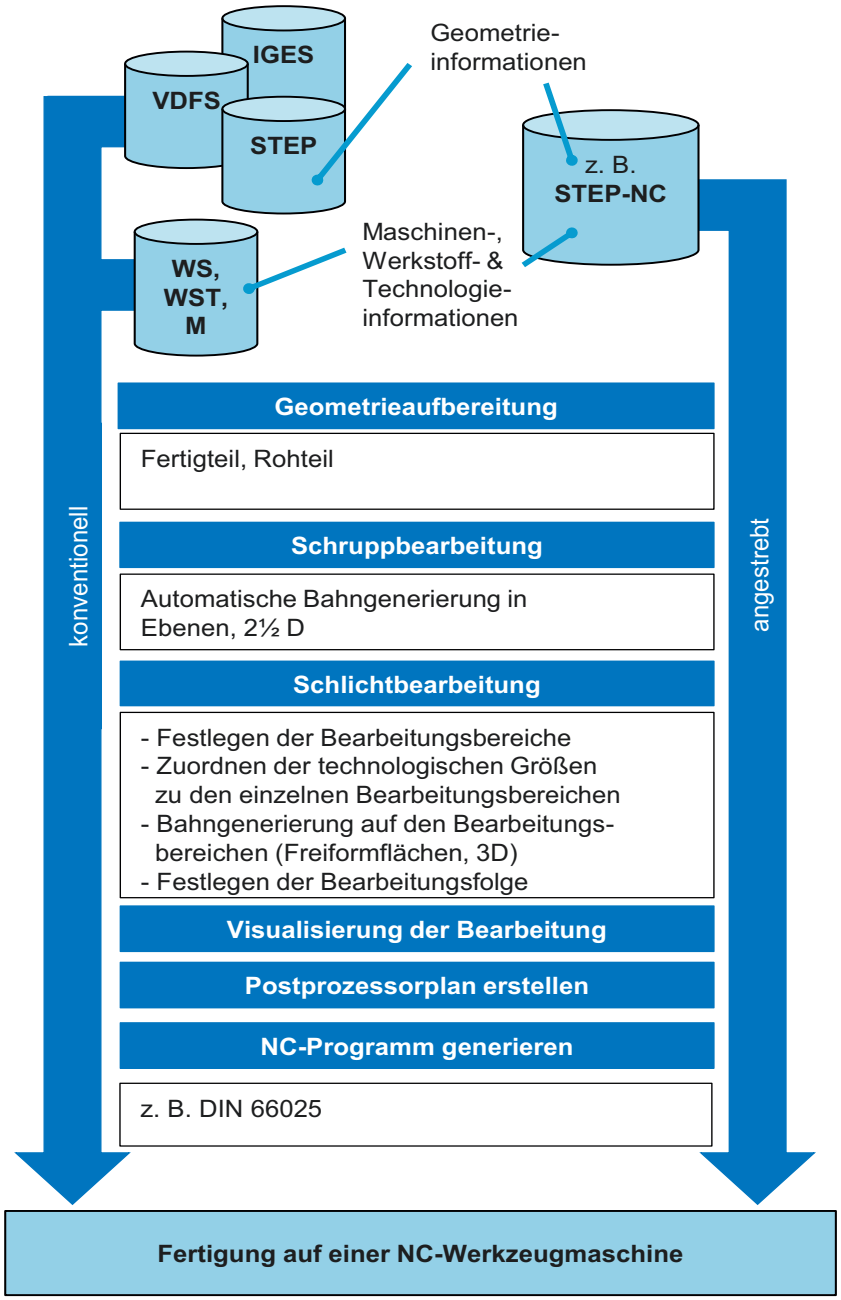


Bild 11.45 Arbeitsschritte zur NC-Programmierung von Freiformflächen

Gleichungen in *x*- und *z*-Richtung schwarz hinterlegt. Der Befehl ENDSET beendet schließlich die Flächenbeschreibung.

Vor einer Folge von auf diese Weise definierten Geometriegruppen steht der File-Header. Dieser gibt die Kennung und den Namen des Files sowie die Anzahl der sich anschließenden Textzeilen (Kommentare) an. Des Weiteren gibt er Aufschluss über Erstellungsdaten wie Firma, Datum, Empfänger usw. Abgeschlossen wird eine Datei über den Aufruf des Befehls END (Dateiende).

Auf diese Weise lassen sich Freiformflächen auf einfache Art beschreiben und zwischen einer großen Anzahl von Systemen austauschen. Das einfache Format der VDAFS konnte jedoch nur durch Beschränkung auf einen minimalen Satz von Geometrieelementen gewährleistet werden. Oft wünschenswerte Informationen wie Bearbeitungsdaten, die logisch mit den Geometrieelementen verbunden sind oder Topologieinformationen, also der Verknüpfung der einzelnen Geometrieelemente untereinander, werden nicht unterstützt. Dieses Defizit wird meist dadurch ausgeglichen, dass mit der VDAFS-Datei Werkstückzeichnungen übergeben werden. So müssen relevante Informationen (Oberflächengüte, Toleranzen, Flächennachbarn usw.) anschließend separat auf dem Zielsystem eingegeben werden.

Zu Beginn der NC-Programmierung einer Freiformflächenbearbeitung werden auf der Grundlage der geometri-

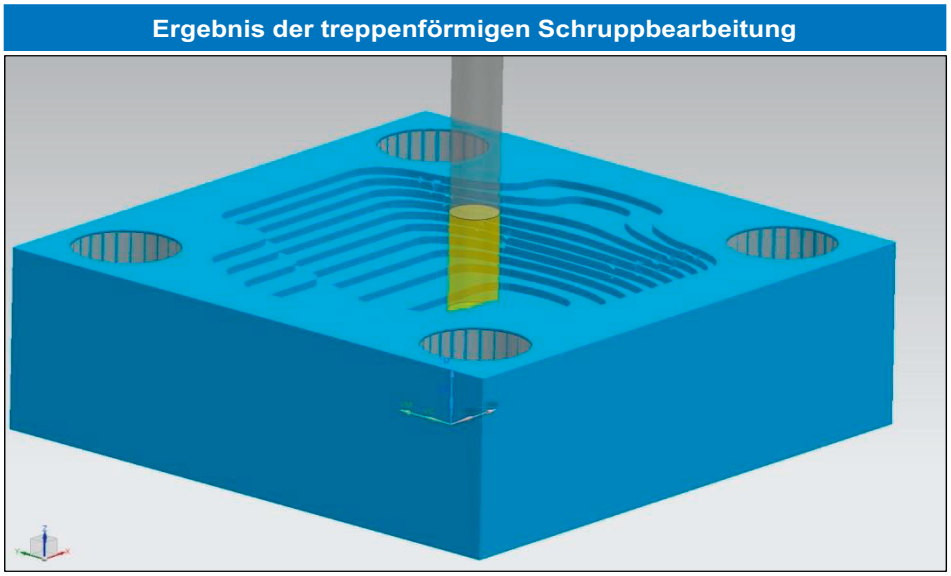


Bild 11.46 Darstellung eines Freiformflächenbauteils nach Schruppbearbeitung

schen Eingangsinformationen die Roh- und Fertigteilgeometrie berechnet, Bild 11.45. Die fehlenden Topologiedaten werden von den meisten Systemen automatisch generiert. Damit liegen die benötigten Flächeninformationen vor und es kann mit der Planung der NC-Bearbeitung begonnen werden.

Ausgehend von der Roh- und Fertigteilgeometrie werden zunächst die Schrupp- und Schlichtbearbeitung festgelegt. Bei der Schruppbearbeitung kommt es im Wesentlichen darauf an, in kurzer Zeit viel Material abzutragen. Aus diesem Grund wird überwiegend eine achsparallele Verfahrweise des Schlittens gewählt, was zu einem „treppenförmigen" Aussehen der bearbeiteten Kontur führt. In Bild 11.46 ist das Ergebnis der Schruppbearbeitung am Modell der Vorrichtung aus Bild 11.42 dargestellt. Die Fräsbahngenerierung für das Schruppen erfolgt in den meisten Systemen automatisch.

Im Anschluss daran werden die Bearbeitungsstrategien für das Schlichten gewählt. Einzelflächen werden zu Flächenverbänden zusammengefasst und definieren die sogenannten Teilarbeitsvorgänge [SPUR93a]. Teilarbeitsvorgänge legen diejenigen Oberflächenabschnitte fest, die innerhalb eines Arbeitsgangs gefertigt werden sollen. Technologische Größen wie Frässtrategien werden den Teilarbeitsvorgängen zugeordnet und werden allgemein durch Steuerparameter wie Werkzeug, Bearbeitungsart, Genauigkeitsvorgaben oder Fräsrichtung beschrieben. Anhand dieser Werte werden dann die Fräserbahnen generiert und auf Kollisionen überprüft.

Die beschriebenen Eingaben werden meist interaktiv an einer grafischen Oberfläche vorgenommen. Parallel dazu wird ein Programm erstellt, mit Hilfe dessen die gesamte Bearbeitung visualisiert werden kann.

Im letzten Schritt schließlich wird das maschinenspezifische NC-Programm erzeugt. In den Postprozessor fließen Informationen wie der Maschinen- bzw. Steuerungstyp, das Werkstückmaterial oder die Lage des Werkstücknullpunktes mit ein.

Aufgrund der eingeschränkten Interpolationsarten nach DIN 66025 werden im Postprozessor die bis dahin im CAM-System als Splines vorliegenden Geometrien in diskrete Geradensegmente (G01) aufgeteilt. Das hat zur Folge, dass Programme generiert werden, die bei großen Bauteilen einen Umfang von bis zu 500 Megabyte aufweisen können. Bearbei-

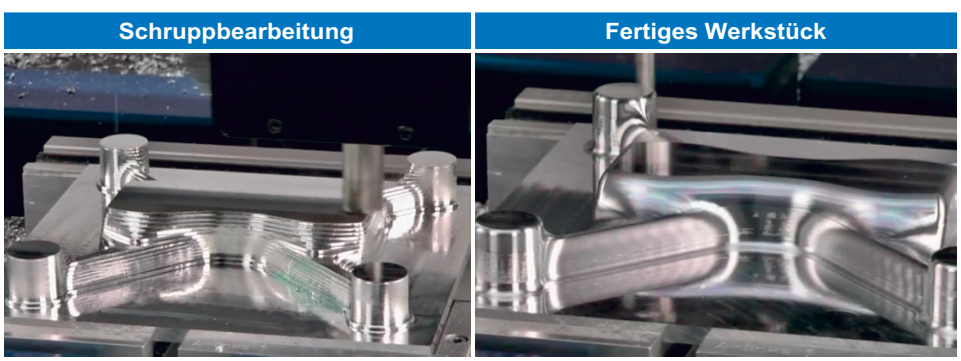


Bild 11.47 Werkstück mit Freiformfläche. Quelle: DATRON AG

tungszeiten von über 100 Stunden sind nicht außergewöhnlich. Weiterhin können Werkzeugkorrekturen nicht länger durch die Maschine selbst vorgenommen werden, da mit dem NC-Programm nach DIN 66025 nur Informationen über die Bewegung am angenommenen Tool Center Point (TCP) vorliegen. So ist der Bediener gezwungen, bei verschlissenen Werkzeugen entweder einen neuen Postprozessorlauf zu veranlassen oder mehrere gleich eingestellte Werkzeuge bereitzuhalten. Beide Alternativen sind jedoch sehr kostenintensiv.

Aus unternommenen Entwicklungen im Bereich der Freiformflächenbearbeitung sind zum einen Definitionen einer standardisierten Schnittstelle, die eine effiziente Übertragung von Freiformflächenbeschreibungen, z. B. in Form von Splines, erlaubt, entstanden. Zum anderen sind heutzutage NC-Steuerungen auf dem Markt, die in der Lage sind, diese Formate zu lesen und entsprechende Berechnungen direkt in der Steuerung durchzuführen.

Das Ergebnis einer Programmierung von Freiformflächen ist in ◘ Bild 11.47 zu sehen. Es zeigt sowohl die Schruppbearbeitung (links) als auch das fertige Werkstück (rechts).

11.4.2.2 Programmierbeispiel anhand des EXAPT-Systems

Der genaue Ablauf der Programmierung bei den unterschiedlichen, auf dem Markt erhältlichen Systemen variiert zum Teil sehr stark und ist abhängig von den enthaltenen Funktionalitäten, Anwendungen usw. der jeweiligen Produkte. Doch existieren auch eine Reihe von Gemeinsamkeiten der verschiedenen Systeme, die sich aufgrund definierter Anforderungen (vgl. ▶ Kap. 11.4.2.4, Werkstattorientierte Programmierung) der Anwender eingestellt haben und in den Entwicklungen von NC-Programmiersystemen berücksichtigt wurden.

Ein grafisches NC-Programmiersystem mit breitem Anwendungsspektrum ist das EXAPT-System, anhand dessen im Folgenden beispielhaft die Vorgehensweise bei der maschinellen Programmierung skizziert werden soll. Das Beispiel beschränkt sich dabei auf die Bearbeitungsart Drehen.

EXAPT ist ein grafisch-interaktives, technologieorientiertes NC-Programmiersystem, das sowohl als einzelner Programmierplatz als auch, unter Verwendung zusätzlicher Module, integriert innerhalb einer CAD/CAP/CAM-Pro-

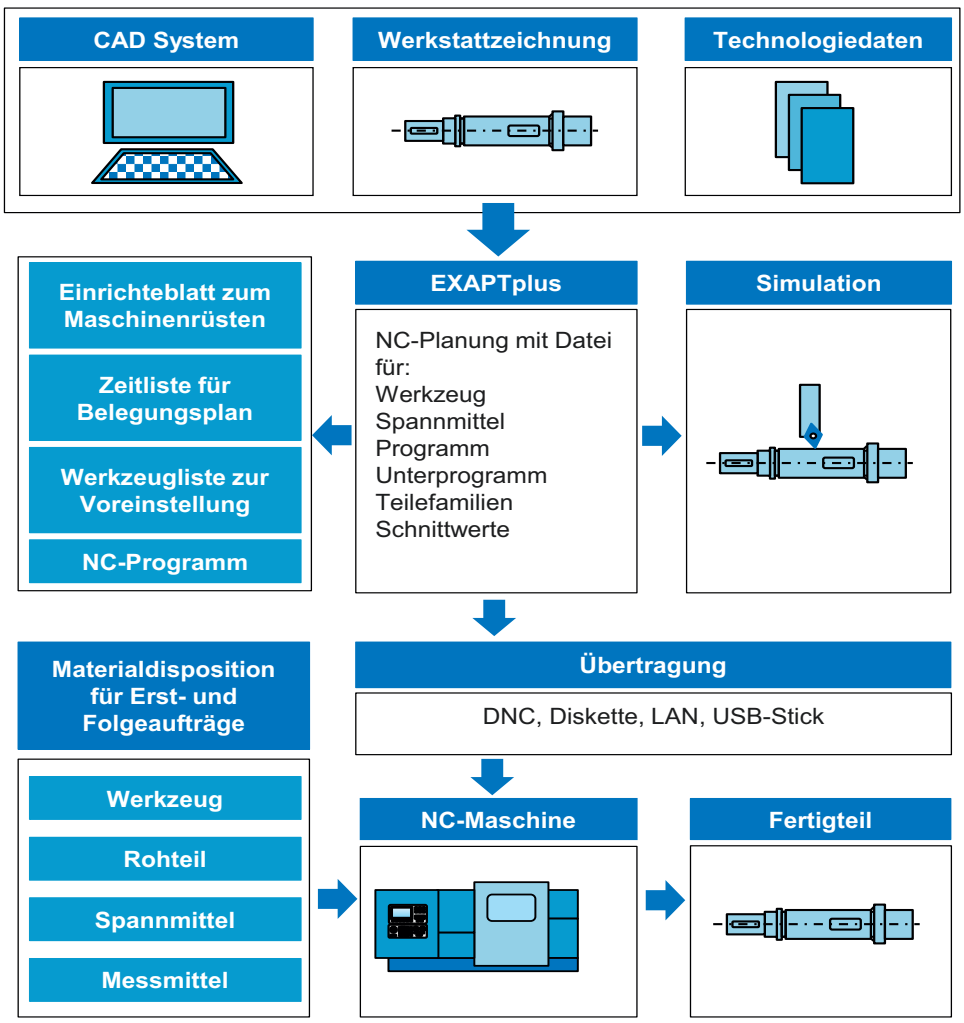


Bild 11.48 Ablauf der rechnergestützten NC-Programmierung unter Einsatz des EXAPTplus Systems. Nach EXAPT

zesskette einsetzbar ist, Bild 11.48. Für die NC-Planung und Programmierung wird ein fensterorientiertes Basismodul angeboten, das für die verschiedenen Fertigungsarten ausbaufähig ist. Zusätzlich können Technologiedatenbanken sowie Postprozessoren, angepasst an die jeweiligen Anforderungen, eingebunden werden. Einige die Programmierumgebung bestimmenden Merkmale sind:

- gleiche Programmierung mit einheitlichen Dialogen für alle Bearbeitungsarten,
- grafisch-interaktive Arbeitsweise,
- grafisch-dynamische Simulation des Bearbeitungsprozesses,
- Neuerstellung und Optimierung von Programmen in gleicher Weise,
- Einbindung von Werkzeug- und Technologiedaten,
- Integration zu CAD, PPS, WSS (Werkstatt-Steuerungs-System),
- DNC.

In diese Programmierumgebung werden Module integriert, die auf die unterschiedlichen Fertigungsverfahren (Drehen, Fräsen, Bohren, Drahterodieren, Brennschneiden, Rundschleifen usw.) ausgerichtet sind. „EXAPTplus Drehen“ ist eines dieser Module.

Der erste Schritt zur Programmierung der Drehbearbeitung des in Bild 11.49 dargestellten Bauteils ist die Erzeugung der Roh- bzw. Fertigteilkontur. Beide Geometrien können entweder im EXAPTplus-System neu erstellt werden oder über Schnittstellen von einem CAD-System übernommen werden. Bild 11.50 zeigt sowohl die Bauteilgeometrie im CAD-Modul (Fenster unten links) als auch die importierte Kontur (Fenster rechts).

Im nächsten Schritt werden die Revolver der Werkzeugmaschine mit den an der realen Maschine vorhandenen Werkzeugen bestückt. Der Benutzer erhält dabei über das Öffnen des BMV-(Betriebs-Mittel-Verwaltung)-Moduls Zugang zu einer Datenbank und wählt interaktiv die gewünschten Werkzeuge für jeden Arbeitsgang aus. Bild 11.51 zeigt links die Werkzeugübersicht. Rechts im

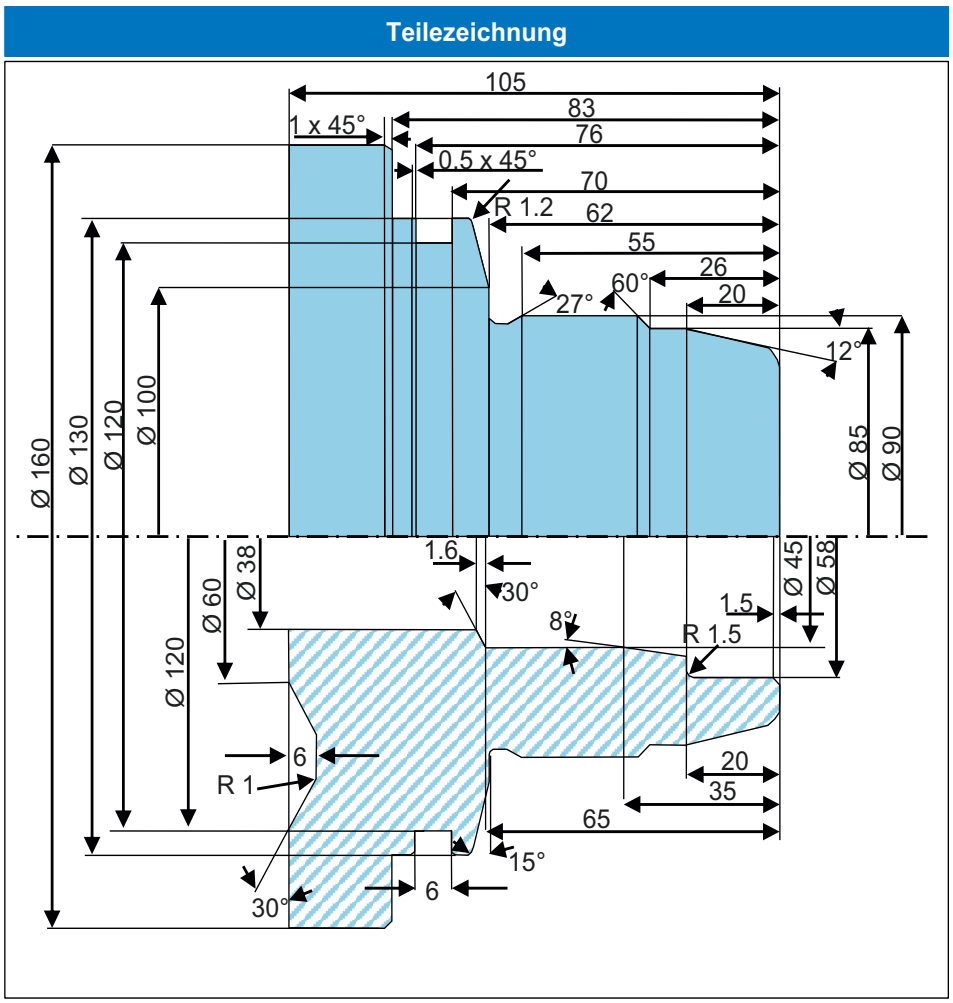


Bild 11.49 Drehteil für das nachfolgende Beispiel zur grafisch-interaktiven Programmierung. Quelle: EXAPT

Bild 11.50 Geometrieübernahme: Die zuvor in einem CAD-System erstellten Geometriedaten werden über das EXAPTplus-CAD-Kopplungsmodul übernommen. Quelle: EXAPT

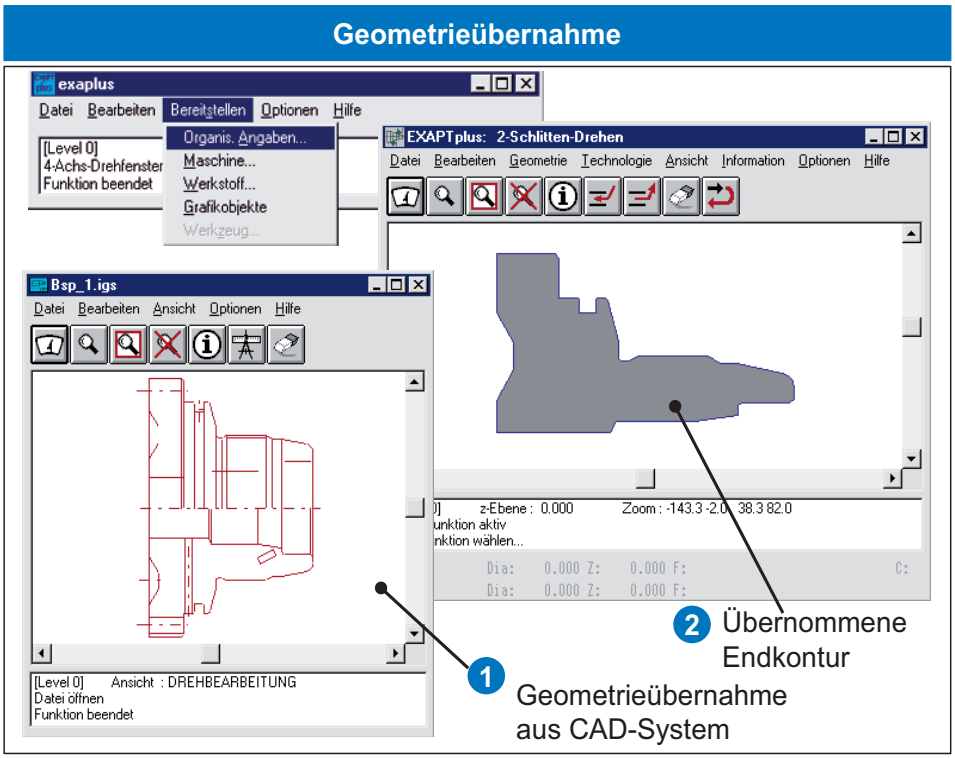


Bild 11.51 Werkzeugauswahl: Im Menü der Betriebsmittelverwaltung können aus einer Datenbank Werkzeuge ausgewählt (3) und den einzelnen Revolverplätzen zugewiesen werden (4)

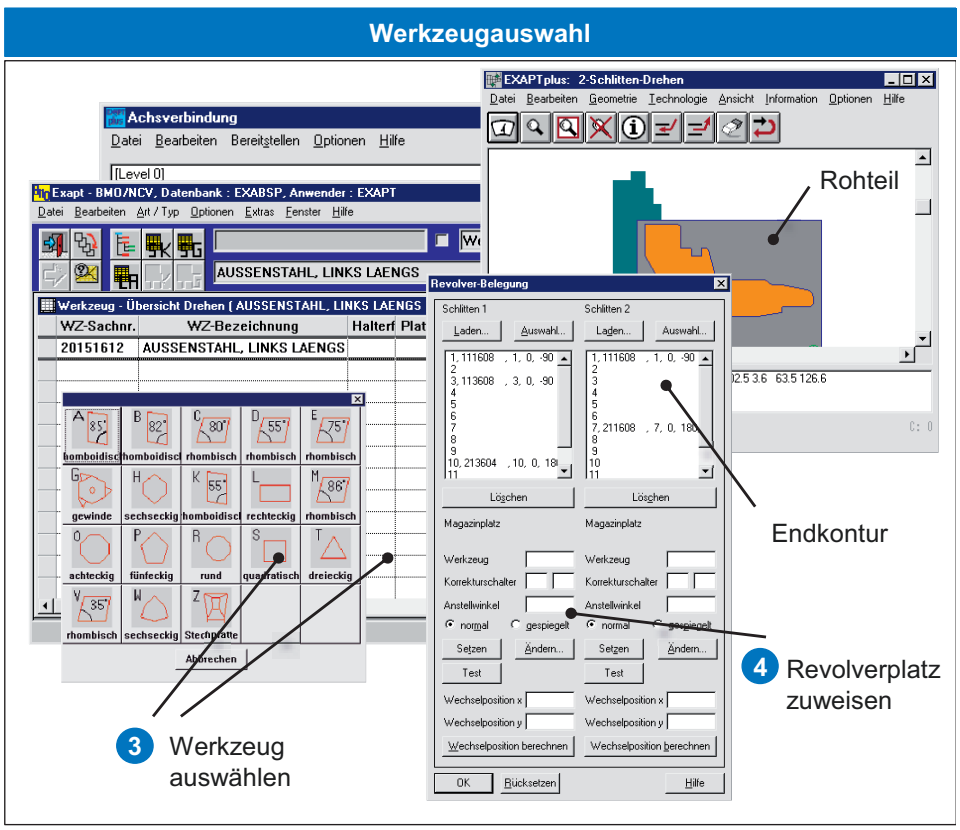


Bild ist die Revolver-Belegung für die Zwei-Schlitten-Bearbeitung dargestellt.

Die eigentliche Programmierung der Werkzeugwege bzw. der Bearbeitung kann prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Eine Möglichkeit ist die automatische Generierung der Bewegungsabfolgen durch das System selbst, eine andere die Programmierung der Fahranweisungen in Einzelschritten.

Bei der automatischen Generierung der Bewegungsabfolgen wählt der Benutzer das zu bearbeitende Segment interaktiv aus und gibt die Bearbeitungsrichtung vor. Durch die Festlegung der Bearbeitungsrichtung ist die Bearbeitungsaufgabe fest definiert. Vom System werden dann Zustellung, An- und Abfahrbewegungen sowie Schnittaufteilungen automatisch berechnet. ◘ Bild 11.52 zeigt als ersten Bearbeitungsschritt das Plandrehen des Rohteils. Zunächst wurde die Güte der Bearbeitung (hier Schruppen) über Anwahl von (5) festgelegt. Start- und Endpunkt dieser einfachen Bewegung sind durch (6) gekennzeichnet.

Eine Alternative zu der oben genannten, durch das System unterstützten Programmierung ist die Verwendung einzelner Befehle. Es handelt sich dabei um die schrittweise Programmierung der gesamten Bauteilkontur. In ◘ Bild 11.52 sind unter (5) die möglichen Bearbeitungsvarianten angezeigt. Sie können ebenfalls für die Positionierung des Werkzeuges im Arbeitsraum benutzt werden.

Unten rechts in ◘ Bild 11.52 ist die Zeitachse eingeblendet, die Aufschluss über die aktuelle Bearbeitungszeit in Sekunden gibt. Sind anstatt der überwiegend verwendeten Standardeinstellungen abweichende Technologiedaten erforderlich, so kann aus der EXAPTplus-Umgebung auf das EXAPT-Modul TDO (Technologie Daten Organisation) zurückgegriffen werden. ◘ Bild 11.53 zeigt die Übernahme von Technologiedaten für die nächste Bearbeitung „Außen Drehen“. Im TDO-Modul sind technologische Daten für die unterschiedlichen Fertigungsverfahren, Werkstoffpaarungen, Bearbeitungsparameter usw. aufgelistet. Der Benutzer ist in der Lage, die erforderlichen Daten der Datenbank zu entnehmen oder sein eigenes Wissen in diese Datenbank mit einzubringen und im Bedarfsfall zu ergänzen.

Bei der Programmierung kann der Bearbeitungsprozess durch die Simulation kontrolliert werden. ◘ Bild 11.54 zeigt die synchrone Drehbearbeitung mit zwei Schlitten. Die beiden Werkzeuge sind räumlich versetzt im Einsatz. Der untere Meißel (Schlitten 1) orientiert sich dabei an der Bearbeitung des oberen Meißels (Schlitten 2) und nimmt bereits die nächste Schicht des Bauteils ab.

EXAPTplus erstellt ein CLDATA-File, das die Ergebnisse der Programmierung für die NC-Fertigung enthält. Die NC-steuerungsgerechte Formatierung der Daten sowie die organisations- und ablaufgerechte Gestaltung der Begleitinformationen, wie Klartext der Steuerdaten, Zeitenliste, Rüstinformationen, Werkzeugtabelle u. Ä., werden über einen Postprozessor vorgenommen.

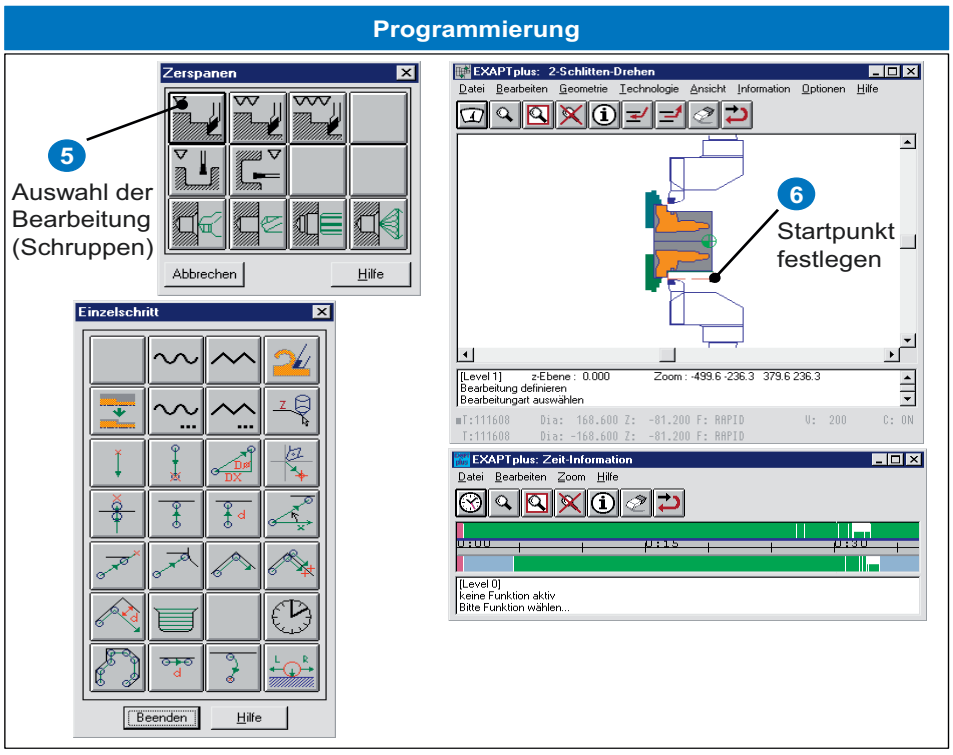


Bild 11.52 Programmierung: Nach Auswahl der Bearbeitungsart (hier Schruppen) und dem entsprechenden Werkzeug (5) werden der Start- und Endpunkt der Bearbeitung nach Anklicken ausgewählt (6)

Bild 11.53 Technologieauswahl: Statt der Default-Parameter einer Bearbeitung können Werte aus der Technologie-Daten-Organisation (TDO) übernommen werden

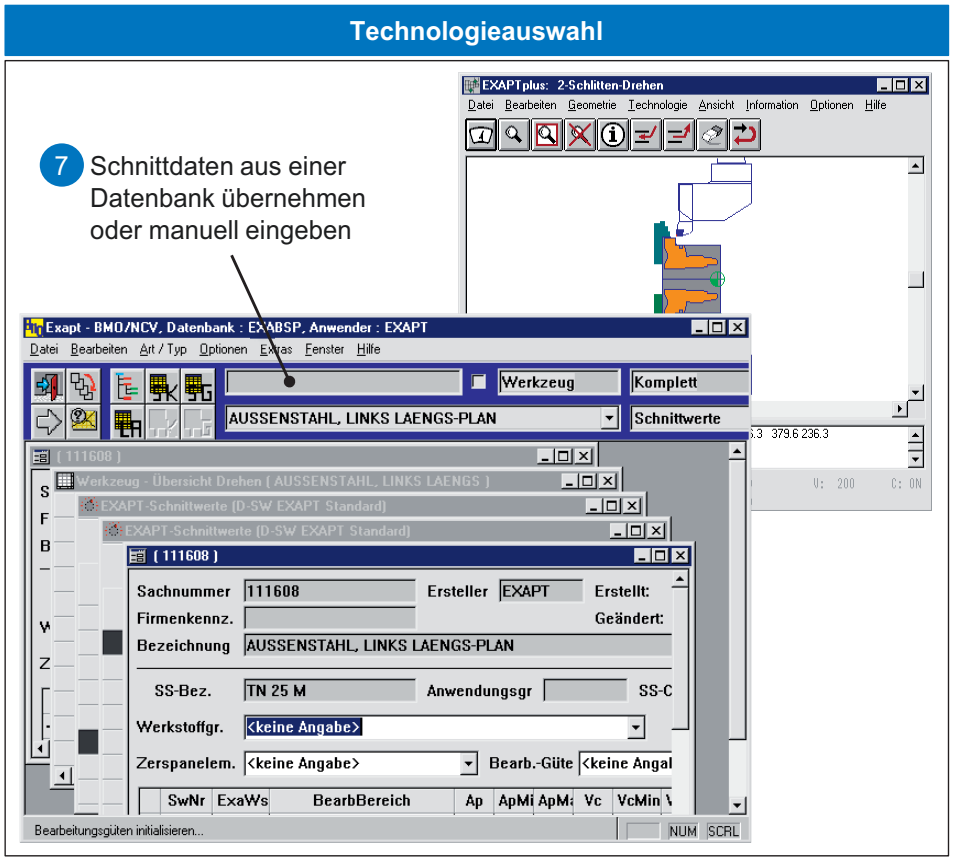
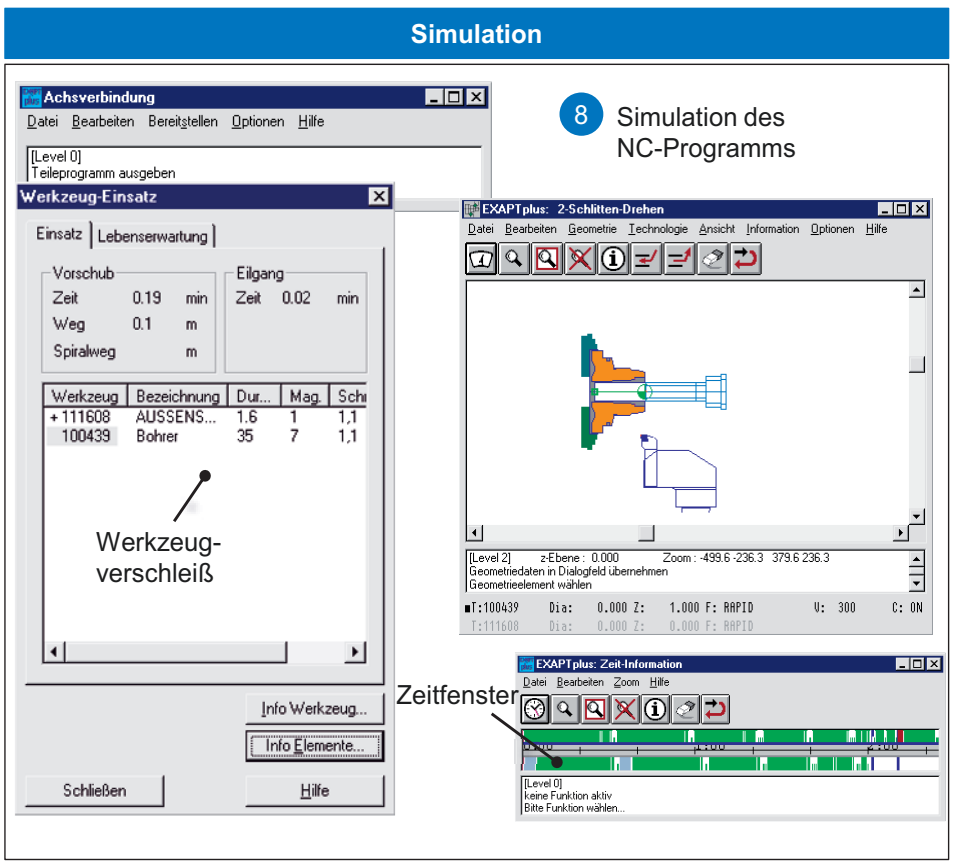


Bild 11.54 Simulation: Nach der Synchronisation der Werkzeugbewegungen kann der Programmablauf simuliert werden. Das Zeitfenster gibt Aufschluss über Dauer und Abfolge der Werkzeugbewegungen



Generierte Liste des NC-Programms

NC-Programm für 1. Schlitten | **NC-Programm für 2. Schlitten**

EXAPT_Aachen_Achsverbindung.cmp - Editor

Datei Bearbeiten Suchen ?

```
%MPF2234                                          | %MPF3234
(TEILEPRG. EXAPT_achsverbindung      ZE.-NR. : 600-234-12/4| (TEILEPRG. EXAPT_achsverbindung      ZE.-NR.
: 600-234-12/4
N0005 (1234    )                                  | N0005 L100
N0010 (h.wolf EXAPT-AACHEN )                      | N0010 G00 G53 D0 X1660.
N0015 (11.08.2000    )                            | N0015 G53 D0 Z3000.
N0020 (600-234-12/4  )                            | N0020 G59 X=R901 Z=R902
N0025 (10      )                                  | N0025 G92 S4=5000.
N0030 L100                                        | N0030 G92 S3=5000.
N0035 G00 G53 D0 X1660. Y0.                       | N0035 M4=26 M4=33
N0040 G53 D0 Z3000.                               |
N0045 R10=1 R11=0 R12=0. R13=0. L184              |
N0050 G59 X=R901 Z=R902                           |
N0055 G92 S4=5000.                                |
N0060 G92 S3=5000.                                |
N0065 M4=26 M4=33                                 |

N8001[WAIT M, 001, 1, 2]                          | N9001[WAIT M, 001, 1, 2]
N0065 (AUSSENSTAHL, LINKS LAENGS-IDNR.: 111608  D=0.)| N0035 (AUSSENSTAHL, LINKS LAENGS-IDNR.:
111608  D=0.)
N0070 D1 T1                                       | N0040 D31 T1
N0075 M4=26 M4=33                                 | N0045 M4=26 M4=33
N0080 G90 G95 S4=318 M4=04                        | N0050 X427.461 Z115.2 M50 M250 M2=08
N0085 X435.43 Y0. Z115.2 M50 M150 M1=08           |
N0090 G96 S4=165                                  |

N8002[WAIT M, 002, 1, 2]                          | N9002[WAIT M, 002, 1, 2]
N0095 G01 Z25.716 F0.4                            | N0055 G04 X2.
N0100 X438.4 Z24.231                              | N0060 G01 X427.461 Z26.2 F0.4
N0105 Z15.2                                       | N0065 X434.463
N0110 X443.4                                      | N0070 X435.43 Z25.716
N0115 Z16.2                                       | N0075 X436.845 Z26.423
N0120 G00 X445.4                                  | N0080 G00 X445.4
N0125 G00 Z115.2                                  | N0085 G00 Z115.2
```

Allgemeine Informationen

Definition einzelner Nullpunkte

Zusätzliche Informationen

Werkzeugauswahl mit Werkzeugkorrekturdaten

Synchronisationsmarke

Verfahrbefehle

Bild 11.55 Aus der EXAPTplus-Sitzung generierte Liste des NC-Programms

Auflistung der Bearbeitungszeiten

EXAPT_Aachen_Achsverbindung.zbl - Editor

Datei Bearbeiten Suchen ?

```
-------------------------------------------------------------------------------
!                                                                             !
!                              Z E I T B L A T T                              !
!                                                                             !
-------------------------------------------------------------------------------
    TUH   (SCHNITTZEIT BZW. VORSCHUBBEWEGUNG)          =      2.82  MINUTEN
    TUN   (POSITIONIERZEIT BZW. EILGANGBEWEGUNGEN)     =      0.19  MINUTEN
    TBN1  (SPANNZEIT)                                  =      0.00  MINUTEN
    TBN5  (WERKZEUGWECHSELZEIT)                        =      0.00  MINUTEN
    TG    (GRUNDZEIT = SUMME ALLER TUH,TUN,TBN)        =      3.01  MINUTEN
    TV    (VERTEILZEIT    5.00% )                      =      0.15  MINUTEN
    TE    (VORGABEZEIT JE EINHEIT = TG + TV)           =      3.16  MINUTEN
    Z     (ZUSCHLAG   5.00% AUF ALLE TUH UND TUN)      =      0.15  MINUTEN
-------------------------------------------------------------------------------
    TE    (VORGABEZEIT JE EINHEIT  TE + Z)             =      3.31  MINUTEN
-------------------------------------------------------------------------------
                                                       -------------------------
          (SUMME  - TE -  1  SPANNUNGEN )              <<<    3.31  MINUTEN >>>
                                                       -------------------------




-------------------------------------------------------------------------------
!                    W E R K Z E U G Z E I T E N                               !
! WERKZEUGBENENNUNG     ID.NR.     MAGPL. ARB.WEG  EINSATZ NEBEN               !
!                                        (MM)     ZEIT    ZEIT                !
!
-------------------------------------------------------------------------------
!AUSSENSTAHL, LINK 00111608       1     618.5     2.8     0.2                 !
!AUSSENSTAHL, LINK 00111608       1     566.6     0.0     0.3                 !
-------------------------------------------------------------------------------
```

Bild 11.56 Auflistung der unterschiedlichen Zeiten für die Bearbeitung des programmierten Bauteils in der ersten Einspannung

Bild 11.57 Einstellblatt für die programmierte Bearbeitungsaufgabe

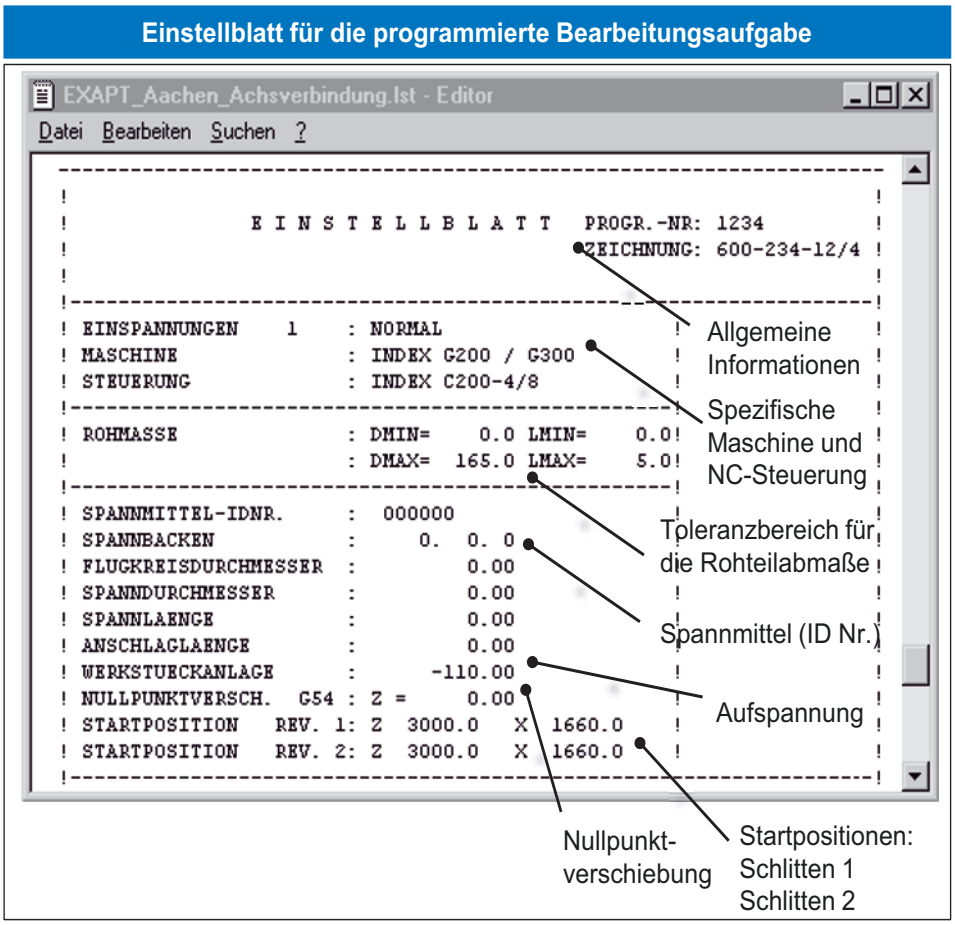


Bild 11.55 und Bild 11.56 zeigen das NC-Programm sowie das Zeitblatt für die Bearbeitung. Im Zeitblatt ist die Bearbeitung in ihre einzelnen Haupt- und Nebenzeiten aufgeteilt. Es enthält Informationen über eventuelle Optimierungsmöglichkeiten des Programmablaufes. Ebenfalls generiert werden ein Werkzeugblatt mit der Auflistung der entsprechenden Korrekturwerte sowie das in Bild 11.57 dargestellte Einstellblatt. Das Einstellblatt gibt Aufschluss über den Maschinentyp, das eingesetzte Spannmittel, die Spannlage und die durchgeführte Nullpunktverschiebung.

Neben dem CLDATA-File liegt ebenfalls ein EXAPT-Teileprogramm vor, in dem das Ergebnisprotokoll der NC-Programmiersitzung geführt wird. Dieses Teileprogramm kann als Klartext gelesen werden und ist editierfähig. Es können also Änderungen auch direkt im Teileprogramm vorgenommen werden. Weiterhin ist es Ausgangsbasis für die grafisch-interaktive Ähnlichkeitsprogrammierung. Auf diese Weise können Programme für ähnliche Bauteile auf Basis bereits existierender Teileprogramme effektiv neu erstellt werden.

11.4.2.3 Programmierbeispiel für ein objektorientiertes NC-Programm (STEP-NC)

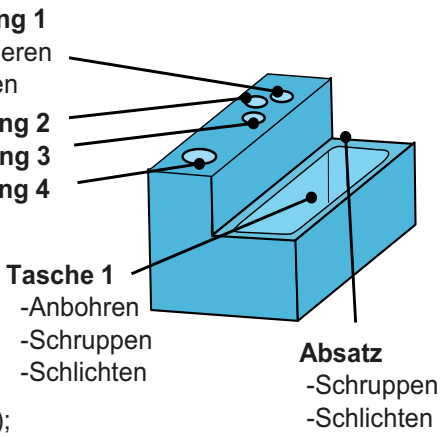
Die ISO 14649 ist ein Standard, der ein einheitliches, durchgängiges und objektorientiertes Datenformat in der Planung und in der Werkstatt zur Verfügung stellen soll. Geometriedaten, die in einer STEP-Datenbank vorliegen, können so direkt im NC-Programm genutzt werden. Eine Konvertierung zwischen verschiedenen Formaten mit den damit verbundenen Problemen entfällt, die Datensicherheit steigt.

Mit Hilfe eines CAM-Systems werden die technologischen und organisatorischen Daten auf das Datenmodell der ISO 14649 abgebildet. Durch die Kombination von geometrischen mit operativen Daten in Workingsteps ist das NC-Programm fertig.

Die ISO 14649 ist keine NC-Programmiersprache, die sich unmittelbar vom Programmierer editieren lässt. Hierzu ist das Datenmodell zu komplex. In Bild 11.58 ist auszugsweise ein solches objektorientiertes NC-Programm dargestellt. In Anbetracht der laufend erweiterten Standardisierungsaktivitäten wird für weitere Informationen auf die ISO 14649 und ISO 10303-238 verwiesen [HARD13].

Bild 11.58 Auszug aus dem NC-Programm am Beispiel einer 2,5D-Bearbeitung nach ISO 1464911.4.2.4

Auszug aus einem STEP-NC Programm (ISO 14649)




```
ISO-10303-21
HEADER;
ENDSEC;

DATA;

// Werkstück und Arbeitsplan
#1 = WORKPIECE( … );
#2 = MATERIAL( ... );
#3 = WORKPLAN([#10,#11, … ], … );

// Bearbeitungsschritte
#10 = MACHINING_WORKINGSTEP(´Bohrung1_Zentr´,#20, … );
#11 = MACHINING_WORKINGSTEP(´Tasche1_Anbohren´,#20, … );
                …
// Fertigungsfeature
#20 = ROUND_HOLE( … , #1, #30, #40, … );
                …
// Geometrische Information
#30 = CARTESIAN_POINT( … );
                …
// Operationsbeschreibung
#40 = DRILLING( … , #50);
#41 = BOTTOM_AND_SIDE_ROUGH_MILLING( … )
                …
// Werkzeugdaten
#50 = CUTTING_TOOL(`spiral_drill_9mm´, … );
```


11.4.2.4 Werkstattorientierte NC-Programmierung

Die Einführung rechnergestützter Systeme in den einzelnen Unternehmensbereichen wurde bisher durch die bereichsspezifischen Aufgaben bestimmt. So entstanden Insellösungen, die heute als CAD-, CAQ-, CAP-, DNC- und als NC-Programmiersysteme bekannt sind [HAAS93].

Im Sinne einer wirtschaftlichen Fertigung steht jedoch die Vernetzung und damit die Integration der Einzelsysteme im Vordergrund. Starre Aufgabenverteilungen bedingen eine Inflexibilität, die gerade im Hinblick auf immer kleinere Losgrößen nicht mehr zu rechtfertigen ist. Aus diesem Grund sind in Bezug auf eine effizientere NC-Programmerstellung Bemühungen angestellt worden, die klassischen Aufgabenverteilungen zwischen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und der Fertigung aufzulösen. Das bedeutet, dass sich die Programmierung, die früher zentral in der Arbeitsvorbereitung stattfand, heute immer mehr sowohl in den Konstruktions- als auch in den Werkstattbereich verlagert.

Die Rückorientierung auf die Werkstatt und die einhergehende Aufwertung des Arbeitsplatzes kommt in besonderem Maße dem Facharbeiter entgegen. Dieser erweitert die Art seiner Aufgaben von rein durchführenden Aufgaben hin zu Planungs-, Steuerungs- oder Verwaltungsaufgaben [HEKE92]. Die erhöhte Motivation des Facharbeiters wiederum bewirkt, dass er auftretende Probleme, Fehler oder Störungen frühzeitig erkennt und diese möglicherweise schneller behoben werden können.

Prinzipiell ist die Programmierung im Werkstattbereich bzw. an der NC-Maschine nichts Neues. Bereits seit längerer Zeit werden sogenannte Handeingabesteuerungen eingesetzt. Darunter wird eine NC-Steuerung mit integriertem grafisch-interaktiv arbeitendem Programmiersystem verstanden. Bekannte Funktionen, wie einfache Fertig- und Rohteilgeometrieeingaben, Schnittaufteilungen, Kollisions-

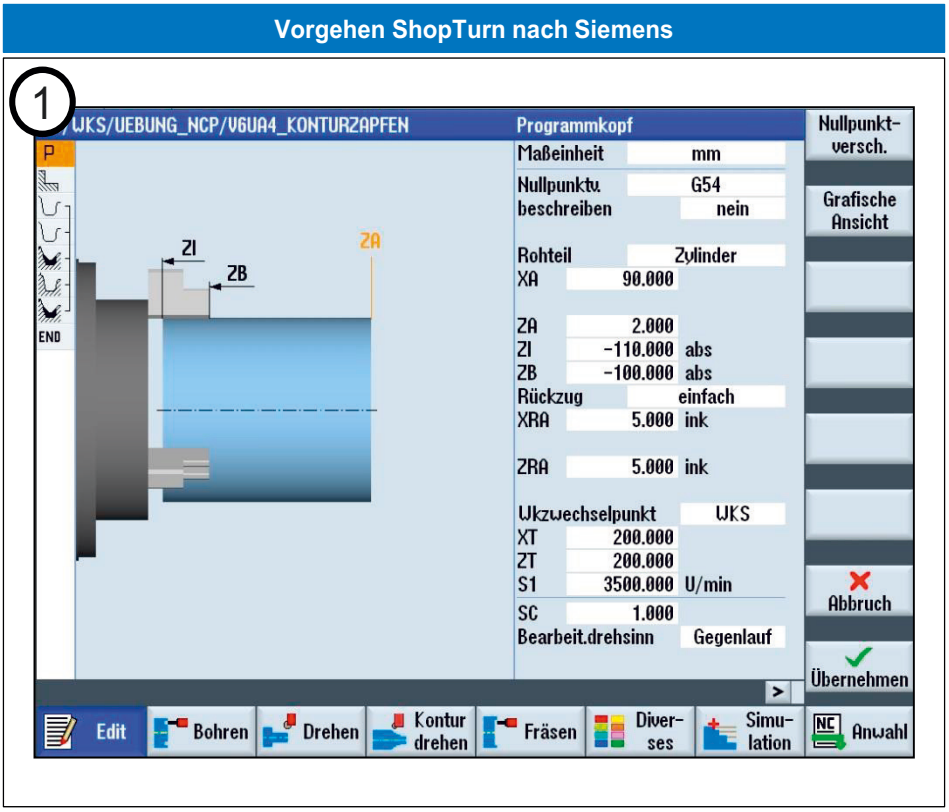


Bild 11.59 Vorgehen ShopTurn (Eingabe der Rohteilgeometrie). Nach SIEMENS

kontrolle oder Simulation, werden unterstützt. Nachteilig bei dem Einsatz von Handeingabesteuerungen ist jedoch deren Abgeschlossenheit gegenüber anderen Systemen aufgrund ihrer Auslegung auf einen speziellen Maschinentyp. Bei Einsatz unterschiedlicher Werkzeugmaschinen können beispielsweise die steuerungsspezifischen NC-Programme nicht mehr an andere Maschinen angepasst werden. Weiterhin bedeutet jede neue Handeingabesteuerung eine neue Einarbeitung des Facharbeiters in das System.

Daher fanden Bemühungen statt, ein in den Produktionsablauf integriertes Programmierkonzept zu erarbeiten, das die Nachteile bestehender Programmiersysteme vermeidet und sich an den Anforderungen einer facharbeitergerechten Programmierung orientiert.

Zur praktischen Umsetzung dieser Ideen wurde 1984 das Verbundprojekt „Werkstattorientiertes Programmierverfahren (WOP)“ ins Leben gerufen, an dem deutsche Maschinen- und Steuerungshersteller, verschiedene Software- und Systemhäuser, Hochschulinstitute und Anwender beteiligt waren [HEKE92]. Ziel dieses Vorhabens war zunächst einmal die Realisierung eines Programmierkonzeptes, basierend auf folgenden Punkten:

- an den spanenden Fertigungsverfahren orientierte Programmiermethode mit einheitlichem Dialog,
- grafisch-interaktive Eingabe ohne Programmiersprache,
- grafische Simulation des Bearbeitungsprozesses,
- Optimierung/Änderungen von Programmen in gleicher Methode wie Neuprogrammierung,
- wirkungsvoller Einsatz des Facharbeiters bei numerisch gesteuerten Fertigungseinrichtungen,
- Modul zur Verwaltung und Übertragung von Daten für Werkzeuge, Spannmittel und Programmen,
- einheitliches System für Werkstatt und Arbeitsvorbereitung.

Vergleicht man diese Kriterien mit den Funktionalitäten heutiger Programmiersysteme, so zeigt sich, dass eine große Zahl von Anbietern zumindest eine Untermenge der Punkte bereits in ihren Systemen integriert hat. Problematisch in diesem Zusammenhang ist, dass der Begriff „WOP“ in keiner Weise geschützt ist und somit beliebig verwendet werden kann.

Die verschiedenen „WOP-Systeme“ können sich also zum Teil stark voneinander unterscheiden.

Ein WOP-System, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll, sind die Systeme CNC ShopMill bzw. CNC ShopTurn der Firma Siemens. Eine Reihe von Funktionalitäten, wie die grafisch-interaktive Programmierung, die Simulation des Bearbeitungsprozesses oder die Einheitlichkeit der Programmerstellung in Arbeitsvorbereitung und Werkstatt, werden heute von vielen Systemen unterstützt. Dabei werden im System separat Angaben zu den technologischen Informationen, zur Bearbeitung und zur Geometrie verlangt. Die

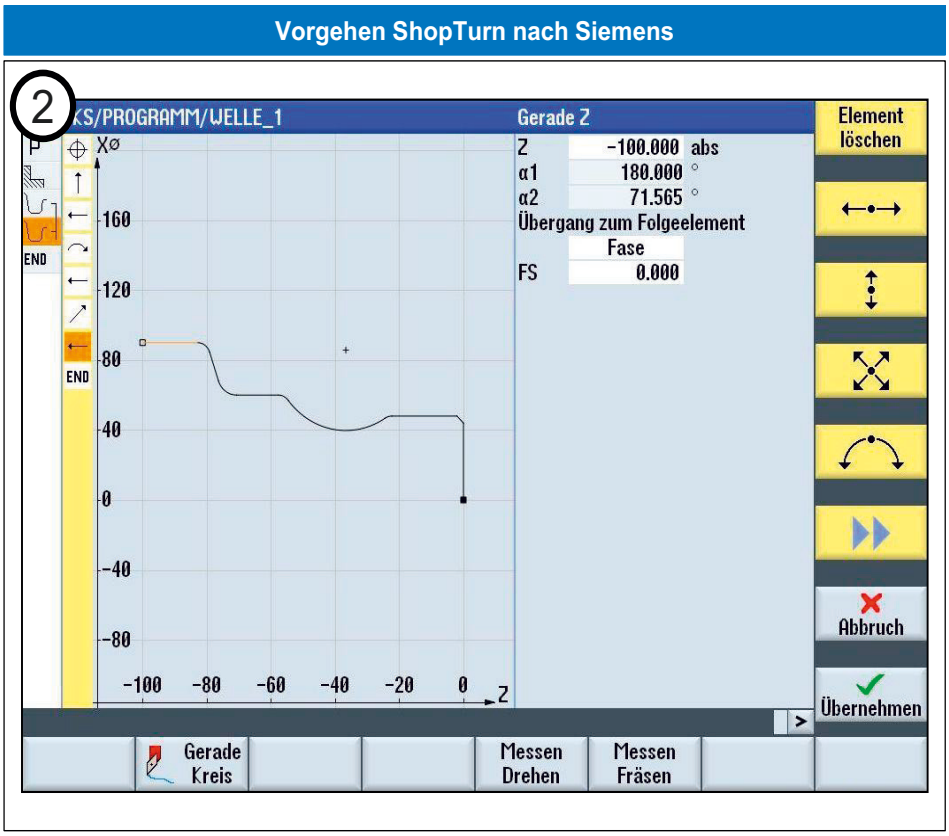


Bild 11.60 Vorgehen ShopTurn (Eingabe der Fertigteilkontur). Nach SIEMENS

Maschine kann anhand dieser Angaben den Prozess direkt ausführen. Im Folgenden wird das Vorgehen am Siemenseditor ShopTurn detailliert beschrieben. Bild 11.59 zeigt die Festlegung der Rohteilgeometrie entsprechend der Rohteilzeichnung über Definition von Linien- und Kreissegmenten.

Im Anschluss an die Festlegung der Rohteilgeometrie erfolgt die Programmierung der Fertigteilkontur entsprechend der Teilezeichnung analog zur Rohteilerstellung. Dazu werden entweder standardisierte Zyklen wie Konturdrehen oder Bohren verwendet oder entsprechende Konturen angegeben (2), Bild 11.60. Nachdem eine neue Kontur angelegt und der Startpunkt festgelegt wurde, können die einzelnen Konturelemente, aus denen sich die Kontur zusammensetzt, definiert werden, Bild 11.62. Werden in einigen Feldern keine Werte eingegeben, geht der Konturrechner davon aus, dass diese Werte unbekannt sind, und versucht, diese aus anderen Parametern zu berechnen.

Nach Planung der Bearbeitungsoperationen und Festlegung des Arbeitsplans in Schritt (3) wird über eine Simulationsfunktion (4) die vollständige Bearbeitungsoperation angezeigt, Bild 11.61. Analog ist ein ähnlicher Eingabevorgang mit entsprechender grafischer Visualisierung bei ShopMill gegeben.

Betrachtet man neben der Arbeitsvorbereitung und dem Werkstattbereich ebenfalls die Konstruktionsabteilung, so ergibt sich folgende Möglichkeit, diese in den werkstattorientierten CAD/CAP/CAM-Verbund mit einzubeziehen. Es werden Geometrieinformationen (z. B. im DXF- oder DWG-Format) über eine neutrale Schnittstelle in das Shop-Programmiersystem geladen und dort für die weitere Verarbeitung modifiziert.

Neben den allgemeinen Informationen zur Bearbeitung, Geometrie und Technologie sind mit den Editoren direkt die Werkzeugverwaltungssysteme, die Nullpunktverschiebung bzw. Preset-Tabelle und die R-Parameterliste der Steuerung verknüpft.

Die beschriebenen Funktionalitäten sollen exemplarisch verdeutlichen, auf welche Weise ein facharbeitergerechtes WOP-System realisiert werden kann. Untersucht man die Vielzahl der heute bereits existierenden WOP-Systeme hinsichtlich der ursprünglichen Kriterien, so zeigt sich, dass ein großer Teil der Anforderungen tatsächlich erfüllt worden ist. Wie effektiv diese Umsetzung erfolgt ist, zeigt sich jedoch erst dadurch, wie flexibel solche Systeme in der Praxis auf unvorhergesehene Änderungen oder Störungen reagieren können. Ein schnelles Eingreifen ist nämlich nur dann möglich, wenn eine hohe Integration aller am Fertigungsprozess beteiligten Systeme existiert und wenn vor allem der Facharbeiter an der Maschine mit den entsprechenden Möglichkeiten zu einer Minimierung der Auswirkungen beitragen kann.

Bild 11.61 Vorgehen ShopTurn (Planung und Simulation der Bearbeitungsoperationen). Nach SIEMENS

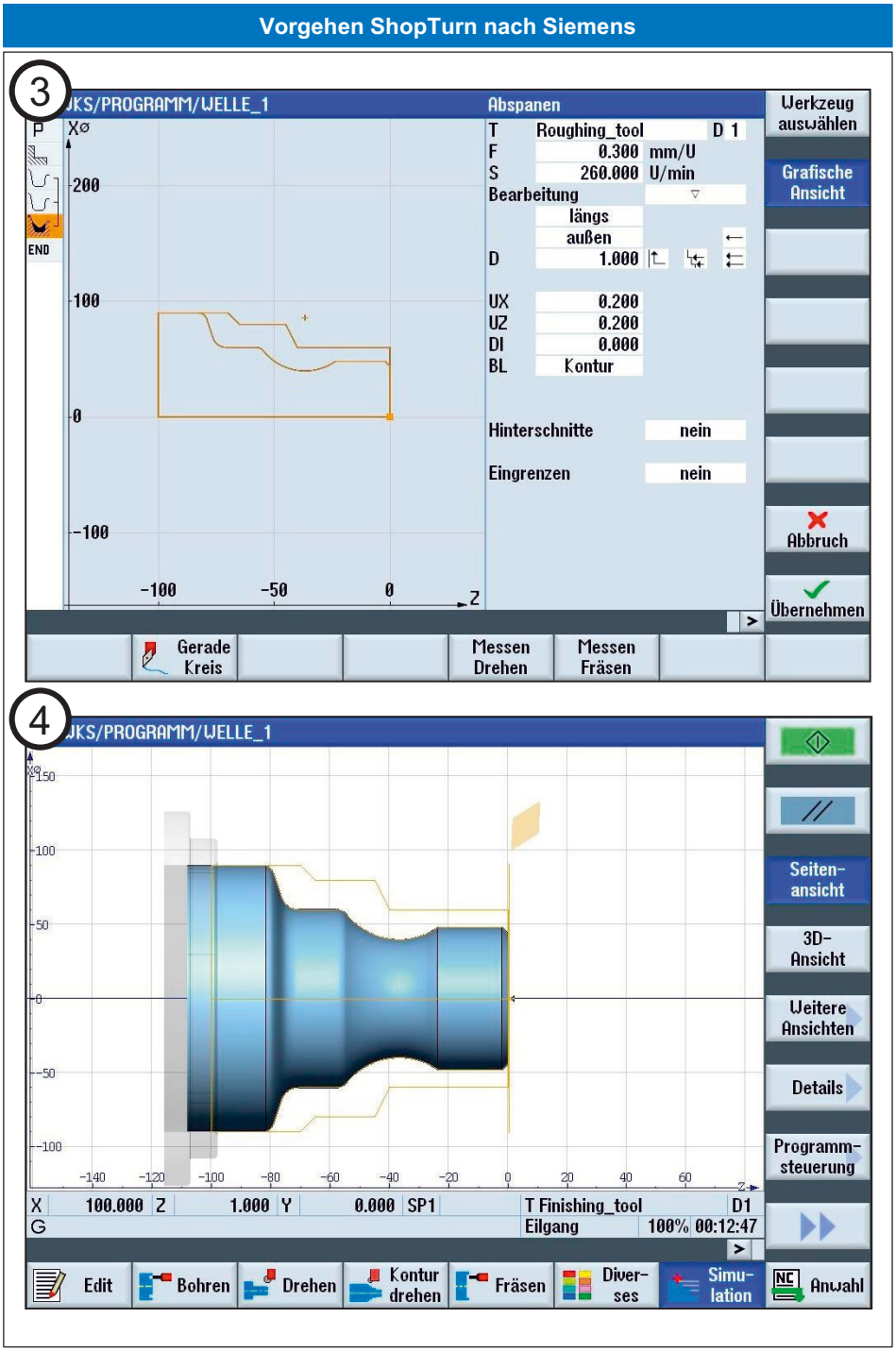
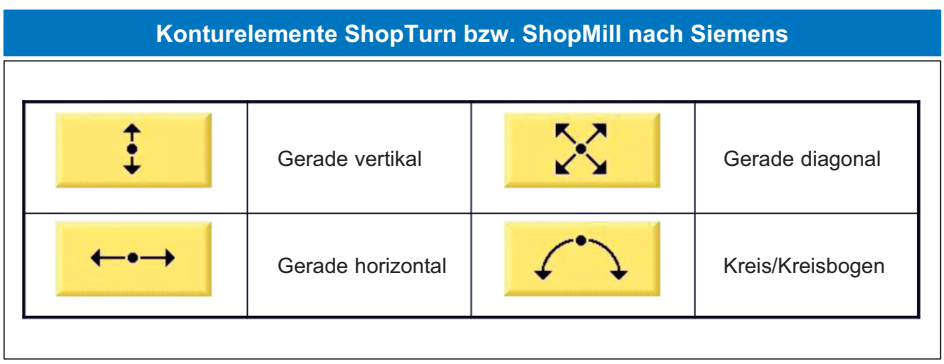


Bild 11.62 Konturelemente ShopTurn bzw. ShopMill. Nach SIEMENS



11.4.2.5 Werkstattnahe Programmierung mit manueller Prozessführung

Ein wesentlicher Nachteil der beschriebenen werkstattorientierten Programmierverfahren ist die Tatsache, dass aufgrund der informatikorientierten Programmierung eine Trennung von Technologie und Geometrie gegeben ist. Demgegenüber wurden in der Vergangenheit verschiedene Programmier- und, als konsequente Weiterentwicklung, neuartige Maschinenkonzepte realisiert, die an die Bedürfnisse einer werkstattnahen Fertigung angepasst sind.

Diese Konzepte haben allgemein zum Ziel, die Facharbeit mit NC-Werkzeugmaschinen in besonderem Maße zu unterstützen. Charakteristisch für diese Forderung ist, dass das Wissen über die technologischen Zusammenhänge bei der Fertigung durch den Einsatz der Steuerungssoftware gezielt unterstützt wird. Das bedeutet, dass die prozessbezogene Handlung des Facharbeiters an der Maschine und nicht die Erstellung des geometrischen Teileprogramms im Vordergrund steht. Anhand der nachfolgenden Beispiele sollen die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale der Programmierkonzepte verdeutlicht werden [HEKE92; KROM94].

Die Erstellung eines Teileprogramms verlangt in der Regel die vorherige Planung und Codierung sämtlicher Operationen in der Reihenfolge der durchzuführenden Bearbeitungsschritte. Mit dieser konventionellen Vorgehensweise ist ebenfalls verbunden, dass die codierten geometrischen Bewegungsfolgen vor dem Bearbeitungsbeginn vorgegeben sind. Auf der Basis des in [KELL08] vorgestellten Systems, welches über ein spezielles Geometriemodell verfügt, ist es möglich, das Teileprogramm dynamisch zur Laufzeit zu ändern. Das bedeutet, dass während der Programmlaufzeit ein Wechsel zwischen unterschiedlichen Betriebsarten, beispielsweise zwischen Hand- und Automatikbetrieb, erfolgen kann.

Die durchgeführten manuellen Bearbeitungsschritte werden gleichermaßen von der Steuerungssoftware aufgezeichnet und, falls erforderlich, mit der Material-Restmenge des Werkstückrohteils verrechnet. Im Falle eines erneuten Wechsels zur automatischen Betriebsart werden die manuell durchgeführten Operationen hinsichtlich des Programmablaufs abgespeichert.

Des Weiteren ist eine flexible Gestaltung der Bearbeitungsreihenfolge einzelner Programm- bzw. Arbeitsschritte möglich. So lassen sich die Programm-Module als Teil eines Arbeitsplans einzeln abfahren oder untereinander in ihrer Abfolge mit geringem Aufwand vertauschen. Die Anwahl einer Simulation parallel zur Bearbeitung bzw. vor Bearbeitungsbeginn unterstützt die Kontrolle der im Arbeitsplan festgelegten geometrischen Verfahrbefehle.

11.4.2.6 Kostenvergleich der Programmierverfahren

Programmierverfahren müssen sich an den gleichen Kriterien messen lassen wie beispielsweise die Produkte NC-Steuerung oder Werkzeugmaschine. Komplexe Systeme mit hohen Anschaffungskosten, die eine aufwendige Schulung des Bedienpersonals bedingen, lohnen sich nur, wenn sie bei der NC-Programmerstellung entsprechend große finanzielle Einsparungen oder qualitative Verbesserungen bringen.

Die Kosten für die Programmierung von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen spielen besonders bei der Fertigung von kleinen Stückzahlen eine erhebliche Rolle. Vielfach ist der wirtschaftliche Einsatz von NC-Maschinen davon abhängig, in welcher Höhe Programmierkosten (bezogen auf das einzelne Werkstück) entstehen. Somit ist bei der Kostenaufstellung das verwendete Programmierverfahren maßgebend. Betrachtet man die große Anzahl von Einflussgrößen bei der Auswahl eines geeigneten Programmiersystems, kann allerdings nicht ausgesagt werden, welches Programmierverfahren grundsätzlich das günstigere ist.

Allgemein gehen in die Ermittlung der Programmierkosten neben den Lohn- und Lohnnebenkosten auch die Arbeitsplatzkosten (Maschinenstundensatz des Systems inklusive Betriebsmittel) des Programmierarbeitsplatzes ein. Diese sind jedoch bei der manuellen Programmierung im Vergleich zu den Arbeitsplatzkosten der rechnergestützten Verfahren, die im Wesentlichen Hard- und Softwarekosten beinhalten, vernachlässigbar klein. Diese Mehrkosten sind durch einen höheren Nutzen der eingesetzten Programmiersysteme auszugleichen.

Die Kosten für ein maschinelles Programmiersystem können sehr unterschiedlich sein. Sie werden hauptsächlich durch die zu programmierenden Bearbeitungsarten bestimmt. Fünfachsige Fräsbearbeitungen von Freiformflächen stellen beispielsweise höhere Ansprüche an das Programmiersystem als die Bearbeitung von Drehteilen.

So ist die Auswahl eines geeigneten Programmiersystems und damit die wirtschaftliche Fertigung in entscheidendem Maße vom Bearbeitungsprozess und der Komplexität der zu bearbeitenden Bauteile abhängig. Bei einer prinzipiellen Betrachtung heutiger Programmierverfahren in Bezug auf die entstehenden Kosten bei unterschiedlicher Komplexität der Werkstücke ergeben sich die in ◘ Bild 11.63 aufgezeigten qualitativen Verläufe.

Die manuelle Programmierung kommt lediglich bei geringer Komplexität der Bauteile wirtschaftlich zum Einsatz, da die Programmierung von nicht durch den Befehlssatz der DIN 66025 unterstützten Konturen (z. B. Splines) nur sehr zeitaufwendig oder überhaupt nicht vorgenommen werden kann. Die Programmierkosten der maschinellen Programmierung hingegen steigen allgemein mit zunehmender Komplexität der Bauteile weniger steil an. Die maschinellen Pro-

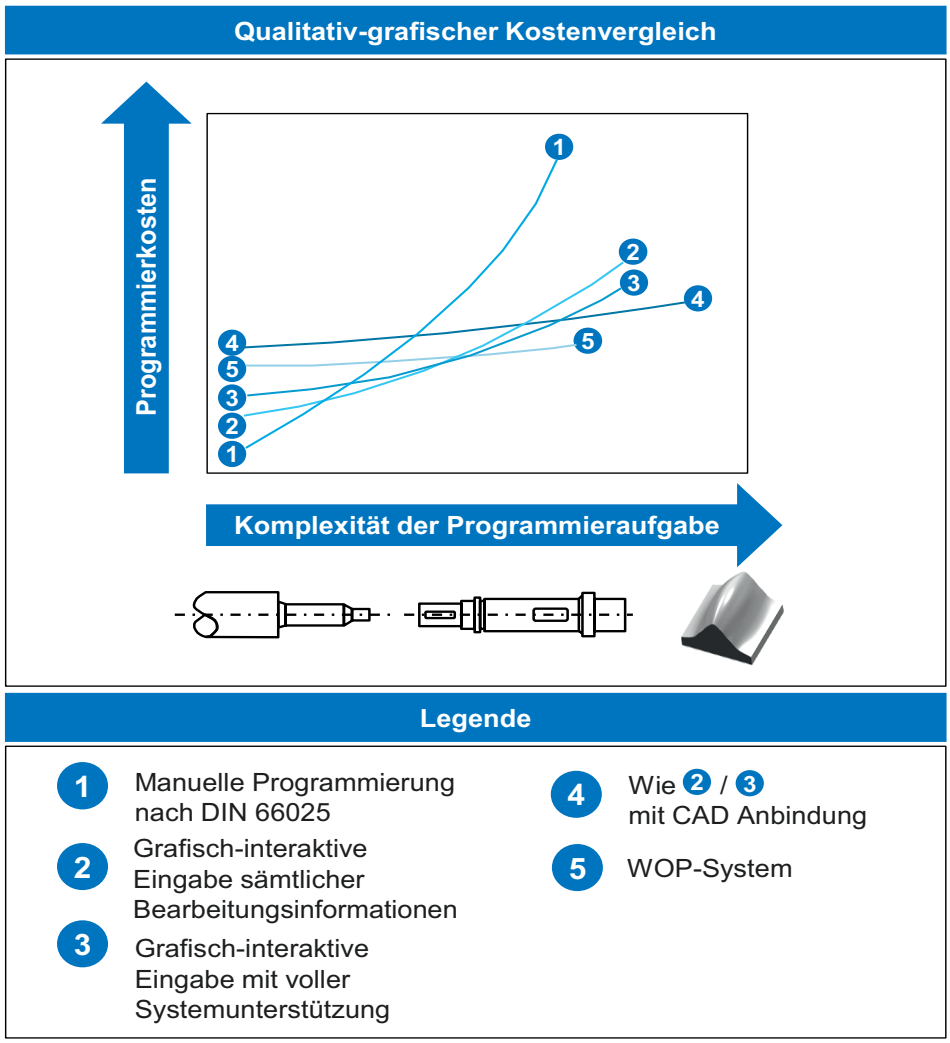


Bild 11.63 Qualitativ-grafischer Kostenvergleich der verschiedenen Programmierverfahren

grammiersysteme sind nochmals in vier unterschiedliche Gruppen unterteilt, die sich im Wesentlichen an den Funktionalitäten und der Einbindung der Systeme in einem Systemverbund orientieren.

Die ersten beiden Gruppen stellen NC-Programmiersysteme dar, die sich durch die Systemunterstützung des Programmierers bei der Programmerstellung unterscheiden. Beim ersten System (2) ist der Benutzer gezwungen, sämtliche Informationen, die den Fertigungsprozess definieren, im Dialog mit dem System einzugeben. Unterstützungen, wie automatische Werkzeugauswahl, Technologiedatenermittlung oder automatische Generierung der Bearbeitungsabfolge, sind nicht vorgesehen. Die zweite Gruppe (3) von Programmiersystemen bietet diese Funktionen. Hier ist lediglich die Eingabe von Fertig- und Rohteilgeometrie und einiger allgemeiner Informationen (Zielmaschine, verfügbare Werkzeuge, Werkstückmaterial usw.) notwendig, um, kontrolliert durch den Benutzer, weitgehend automatisch das Programm zu generieren. Diese vollautomatische Unterstützung ist in diesem Umfang bisher jedoch nur für einfache Bearbeitungsverfahren realisiert worden.

Gruppe (4) repräsentiert die Systeme, die im Hinblick auf ein durchgängiges Rechnerkonzept innerhalb eines Systemverbundes integriert sind. Komplexe Geometriedaten können aus CAD-Systemen abgerufen und weiterverarbeitet werden. So ist durch die Nutzung bereits datentechnisch erfasster Geometrieinformationen eine kostengünstigere Fertigung möglich.

Die letzte Gruppe (5) beinhaltet schließlich die Werkstattorientierten Programmiersysteme. Die genannten Vorteile eines einheitlichen, facharbeitergerechten Programmiersystems für die Bereiche Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Werkstatt sowie die Auflösung zentraler Fertigungsstrukturen ermöglichen ein schnelles und flexibles Reagieren auf unvorhergesehene Ereignisse. Eine Bearbeitung von komplexen 3D-Flächen ist jedoch hiermit zurzeit nur eingeschränkt möglich.

Eine weitere Gruppe wird derzeit in der Industrie erprobt. Eine Aussage zu den Kosten ist zum derzeitigen Stand daher

fiktiv und von der erfolgreichen Umsetzung neuer, objektorientierter Programmierschnittstellen in Steuerungen und CAD/CAM-Systemen abhängig. Daher wurde diese Gruppe noch nicht in Bild 11.63 aufgenommen. Eine Schnittstelle wie die ISO 14649 bietet vor allem in den Bereichen ein Einsparpotenzial, in denen komplexe NC-Programme erstellt und zwischen verschiedenen Maschinen und CAD/CAM-Systemen ausgetauscht werden müssen. Da das Datenmodell von allen Systemen direkt gelesen werden kann, entfällt der Aufwand für Postprozessoren, und die NC-Programmverwaltung wird vereinfacht. Das Format lässt sich jedoch nicht mehr vom Maschinenbediener in einem Text-Editor erstellen und manipulieren. Stattdessen sind Programmiersysteme notwendig. Von den Kosten solcher Systeme wird es abhängen, ob sich der Investitionsaufwand auch für kleinere Unternehmen, die wenig komplexe Teile fertigen und bei denen in der Regel keine aufwendigen Umplanungsarbeiten anfallen, lohnen wird.

11.4.3 Digitalisierung von Werkstückgeometrien zur NC-Datengenerierung

Eine Möglichkeit zur NC-Datengenerierung besteht in der Ableitung von Weginformationen aus einem mechanischen Speicher (Schablone, Meisterstück, Modell) durch sogenannte Nachformsysteme. Die Entwicklung derartiger Systeme begann bereits im 18. Jahrhundert mit den ersten, damals noch handbetätigten Nachformmaschinen. Nach der Jahrhundertwende wurden automatisch arbeitende Servonachformsysteme entwickelt, die in Nischenberei-

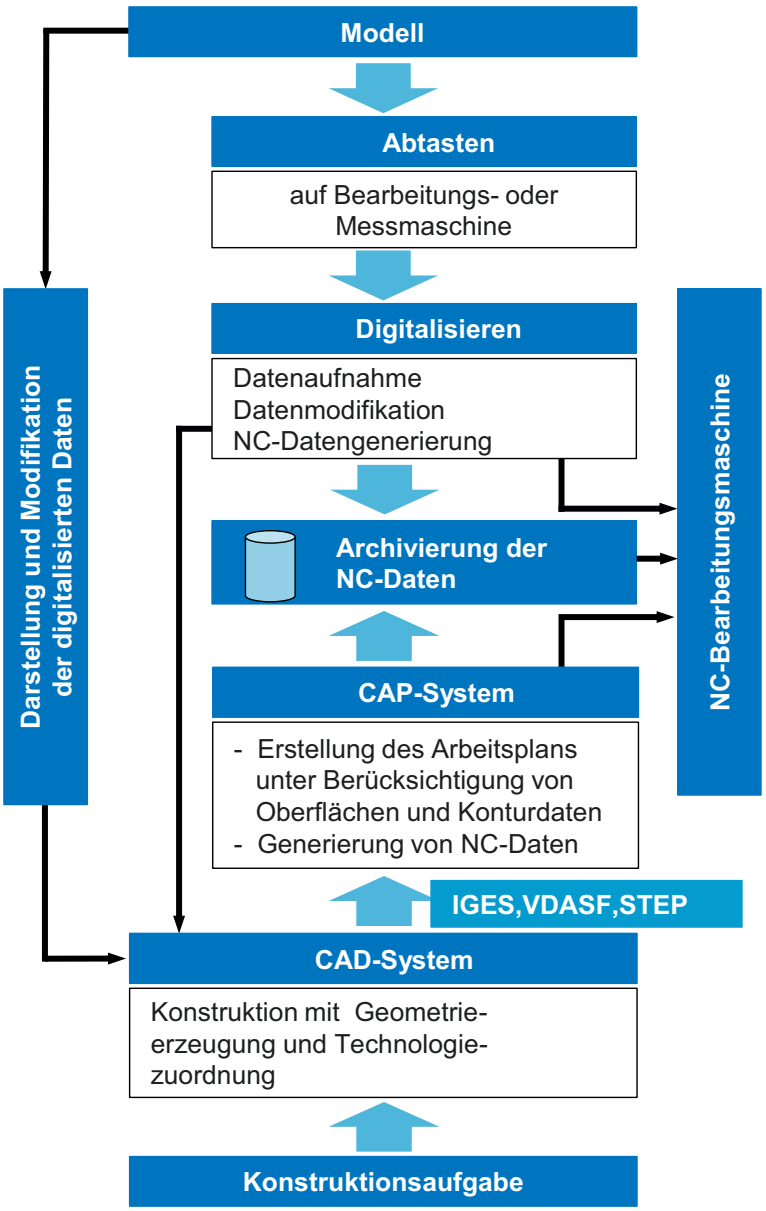


Bild 11.64 Aufbau eines NC-Nachformsystems mit CAD/CAP/CAM-Kopplung

chen bis heute in modifizierter Bauweise im Formenbau eingesetzt werden. Die Bedeutung dieser Einrichtungen hat jedoch durch den Einsatz von NC-Werkzeugmaschinen in Verbindung mit CAD/CAP-Systemen stark abgenommen und sie werden für Neukonstruktionen nicht mehr eingesetzt.

Kennzeichen klassischer, direkt arbeitender Nachformsysteme ist, dass Abtast- und Bearbeitungsvorgang zeitlich und räumlich miteinander verknüpft sind. Das Werkstück wird somit simultan zum Abtastvorgang bearbeitet, wobei Abtast- und Bearbeitungssystem in der Regel eine zusammenhängende Einheit darstellen. Ein solches Nachformsystem weist mehrere Nachteile auf. Aufgrund der direkten Kopplung zwischen Abtast- und Bearbeitungssystem bestehen kaum Möglichkeiten einer Manipulation der Fühlerdaten mit dem Ziel, Maßveränderungen oder Glättungen von Oberflächen vorzunehmen. Außerdem können Maschinenschwingungen, hervorgerufen durch den Bearbeitungsvorgang, negativen Einfluss auf die Geometrieerfassung durch den Taster ausüben. Darüber hinaus dürfen auch die Lagerhaltungskosten für die abgetasteten Modelle nicht unterschätzt werden. Die Modelle müssen so lange aufbewahrt werden, wie die Notwendigkeit einer Neu- oder Nachbearbeitung des Teils besteht, wobei Zeiträume von zehn Jahren und mehr keine Seltenheit sind.

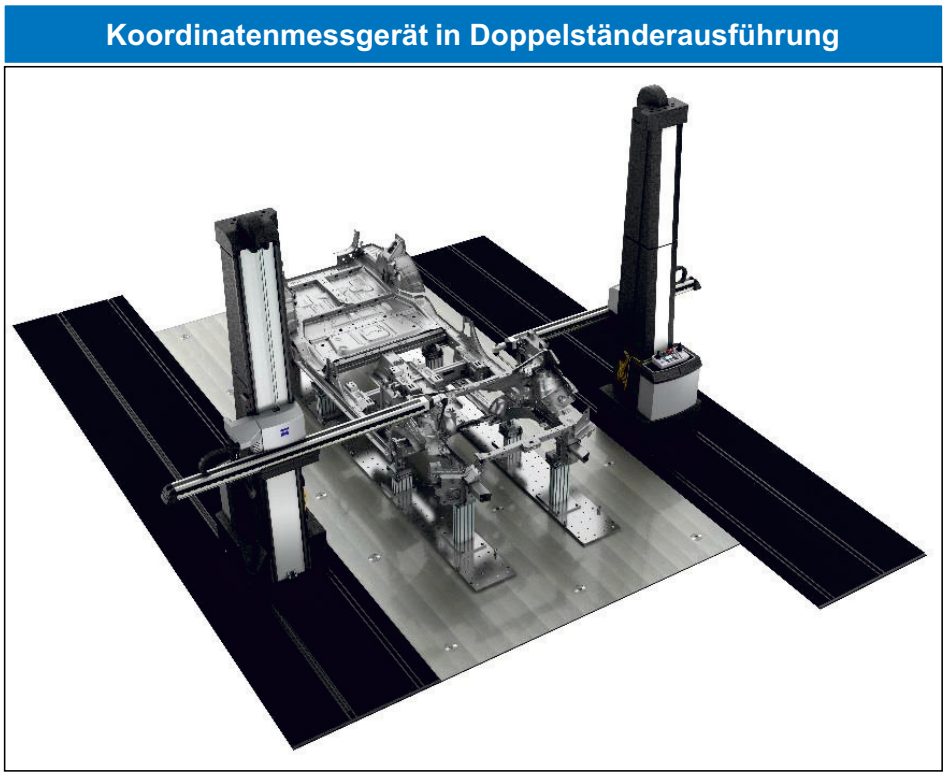
Aufgrund dieser Nachteile wurden Nachformsysteme entwickelt, bei denen Abtast- und Bearbeitungsvorgang sowohl zeitlich als auch räumlich vollkommen voneinander getrennt sind [WOLL86]. Den grundsätzlichen Aufbau eines solchen Systems zeigt Bild 11.64. Es besteht im Wesentlichen aus einer Abtasteinheit, einer Digitalisier- und Datenkomprimiereinrichtung sowie einer NC-Bearbeitungsmaschine.

Dabei unterscheiden sich heute verfügbare Systeme insbesondere durch die eingesetzten Messgeräte und Tastsysteme sowie hinsichtlich der rechentechnischen Weiterverarbeitung und Umsetzung der gewonnenen Geometrieinformationen in NC-Datensätze.

11.4.3.1 Messgeräte zur Digitalisierung von Werkstücken

In der industriellen Praxis haben sich Geräte und Messverfahren aus dem Bereich der Koordinatenmesstechnik als äußerst flexible und effiziente Werkzeuge zur geometrischen Prüfung von Werkstücken durchgesetzt. In der Koordinatenmesstechnik werden Objektgeometrien durch die mathematische Verknüpfung einzelner Oberflächenpunkte in einem gemeinsamen Koordinatensystem definiert. Die Erfassung dieser Raumpunkte erfolgt durch sogenannte Koordinatenmessgeräte [PFEI98]. Wesentliches Haupteinsatzgebiet von Koordinatenmessgeräten ist die Erfassung der Ist-Geometrie an den für die Funktion eines Bauteils relevanten Teilgeometrien (Bohrungen, Flansche o. Ä.) zur Bestimmung von Maß-, Form- und Lageabweichungen durch Vergleich mit der Soll-Geometrie. Grundsätzlich eignen sich aber nahezu alle heute verfügbaren Koordinatenmessgeräte auch zur Di-

Bild 11.65 Koordinatenmessgerät in doppelter Einständerführung für große Werkstücke. Quelle: Carl Zeiss



Koordinatenmessgerät

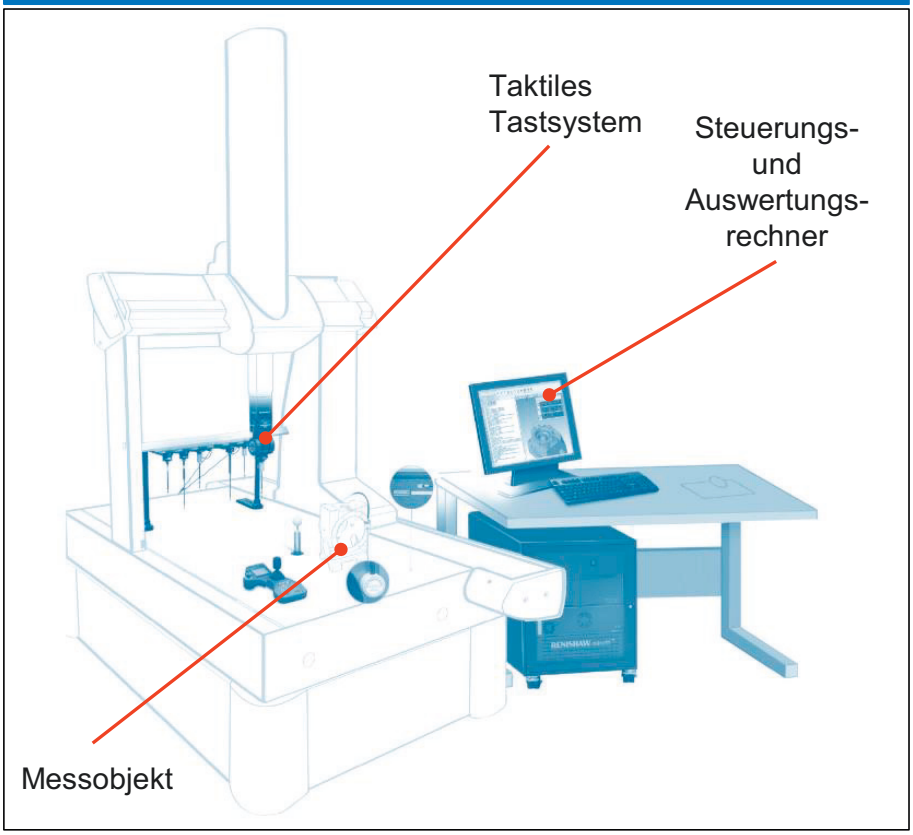


Bild 11.66 Koordinatenmessgerät zur Vermessung kleinerer Objekte. Quelle: Renishaw

Optischer Lichtscanner zur berührungslosen Digitalisierung



Bild 11.67 Optisches Koordinatenmessgerät zur Digitalisierung sehr kleiner Objekte. Quelle: Renishaw

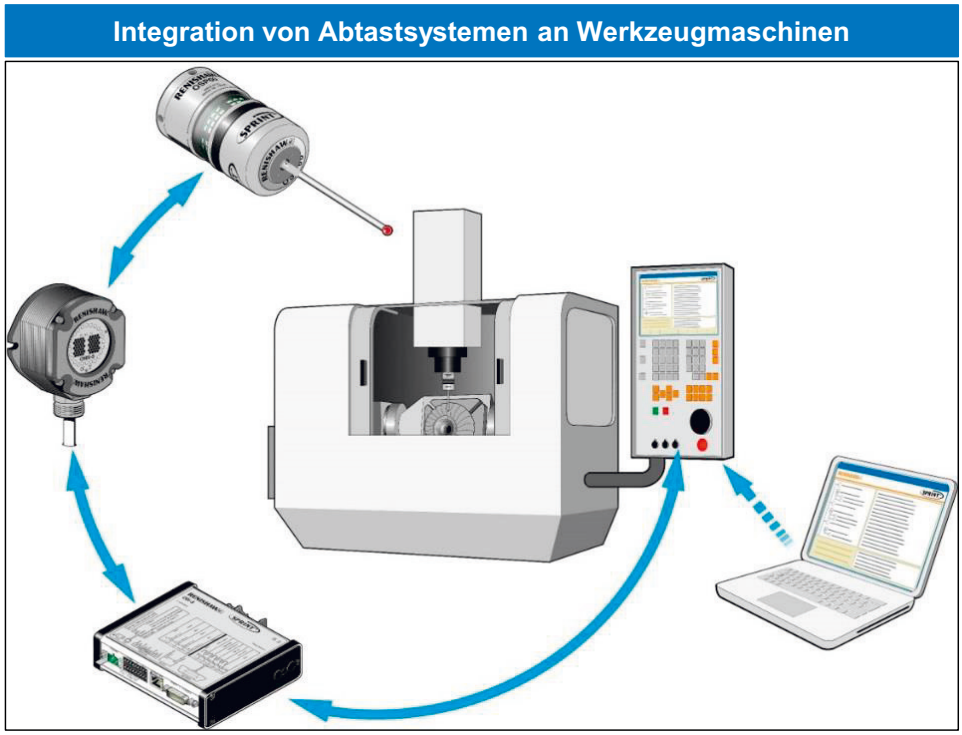


Bild 11.68 Integration von Abtastsystemen an Werkzeugmaschinen. Quelle: Renishaw

gitalisierung, d. h. zur vollständigen oder teilweisen Erfassung von Objektgeometrien, mit dem Ziel, ein digitales Abbild zu generieren.

Bild 11.65 zeigt ein Koordinatenmessgerät in Doppelständerausführung zur Vermessung großer Objekte. Wesentliche Bestandteile sind ein präzises, kartesisches Führungsvorschubsystem und ein taktiles Tastsystem. Je nach Aufgabenstellung können auch andere Tastsysteme automatisch eingewechselt werden. Geräte dieser Art werden für Abtasträume von bis zu 25 m^3 und mehr gebaut. Somit lassen sich Modelle in der Größenordnung von Pkws vollständig digitalisieren.

Zur kostengünstigen Digitalisierung kleinerer Objekte wurden eine Reihe speziell ausgelegter Abtastgeräte entwickelt. Bild 11.66 zeigt beispielhaft ein dreiachsiges Koordinatenmessgerät mit taktilem Tastsystem für Werkstücke bis 0,1 m^3. Durch die reduzierten Maße sind hohe Scan-Geschwindigkeiten bis 140 Messpunkte/s bei gleichzeitig hoher Genauigkeit (< 50 µm) möglich. Die erzielbaren, sehr geringen Antastkräfte erlauben den Einsatz sehr filigraner Tastsysteme, sodass auch feine Details aufgelöst werden können.

Eine andere Variante zur schnellen, berührungslosen Digitalisierung sehr kleiner, freigeformter Modelle, z. B. im Dentalbereich, zeigt Bild 11.67. Es handelt sich hierbei um einen berührungslosen Dentalscanner. Durch den Einsatz eines hochgenauen optoelektronischen Sensors werden mit diesem Gerät Genauigkeiten von unter 10 µm realisiert.

Neben Koordinatenmessgeräten eignen sich auch Werkzeugmaschinen zur Digitalisierung von Werkstücken. Durch den Einsatz bereits vorhandener Werkzeugmaschinen und die dadurch reduzierten Investitionskosten werden Digitalisiersysteme auch für klein- und mittelständische Unternehmen finanzierbar [BART99]. Ein Beispiel für ein solches System zeigt Bild 11.68. Es besteht im Wesentlichen aus einem taktilen Tastsystem, das über einen entsprechenden Adapter mit der Standard-Werkzeugaufnahme der Werkzeugmaschine verbunden wird, sowie einem Rechner und einer speziellen Software zur Steuerung der Messabläufe und zur Verarbeitung der Messdaten. In weiteren Ausbaustufen kann das System stärker in die Maschinensteuerung integriert und damit eine Performance-Steigerung der Messabläufe erzielt werden.

11.4.3.2 Abtaststrategien

Die vollständige Beschreibung einer Objektgeometrie ist bei Regelgeometrien zumeist durch wenige Raumpunkte und die zugehörigen mathematischen Beschreibungen möglich. Unter Umständen ist hier insbesondere bei einfachen Körpern eine Digitalisierung durch manuelles Antasten von Einzelpunkten vorteilhaft. Bei komplexeren Geometrien und insbesondere zur Beschreibung von Freiformflächen sind wesentlich größere Datenmengen erforderlich. Daher werden die Messpunkte hier, je nach verwendetem Tastsystem, meist im sogenannten Scanning-Betrieb, also durch die kontinuierliche Erfassung von Raumpunkten entlang der Werkstückgeometrie erfasst. Entscheidend für die Qualität der Digitalisierungsergebnisse ist die Verwendung einer geeigneten Abtaststrategie, die, je nach verwendetem Mess-

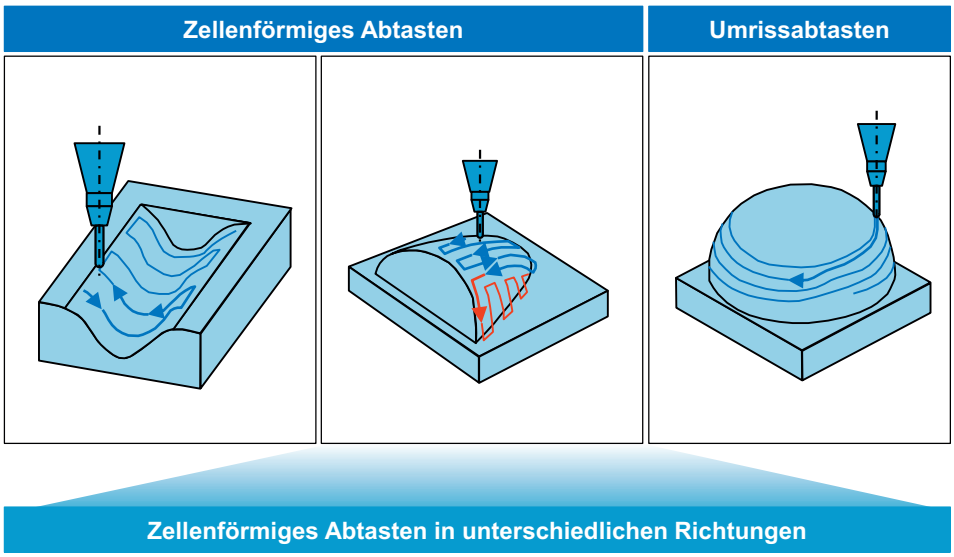


Bild 11.69 Beispiele für Strategien zur Abtastung unterschiedlicher Modellformen

gerät, Tastsystem und vorliegender Werkstückgeometrie bzw. in Abhängigkeit von der zu erzielenden Genauigkeit, Detaillierung, Abtastdauer etc., gewählt werden muss. Übliche Strategien sind hier z. B. zeilenförmiges Abtasten, abschnittsweises Abtasten in unterschiedlichen Richtungen oder Umrissabtasten, Bild 11.69.

Eine Alternative zum Scanning-Betrieb besteht in der Digitalisierung durch iterative Annäherung der Objektoberfläche durch Einzelpunktantastung. Dabei wird in einem ersten Schritt, meist durch manuelles Antasten einzelner Randpunkte, eine Ausgangsgeometrie definiert. Anschließend werden in einem iterativen Prozess nach einer vorgegebenen Strategie automatisch weitere Einzelpunkte angetastet und diese bei Überschreiten einer geometrischen Mindestabweichung als neue Stützpunkte in die vorliegende Geometriebeschreibung eingefügt. Dieser Prozess wird beendet, sobald eine vorgegebene Mindestabweichung durch Hinzunahme weiterer Punkte nicht mehr überschritten wird.

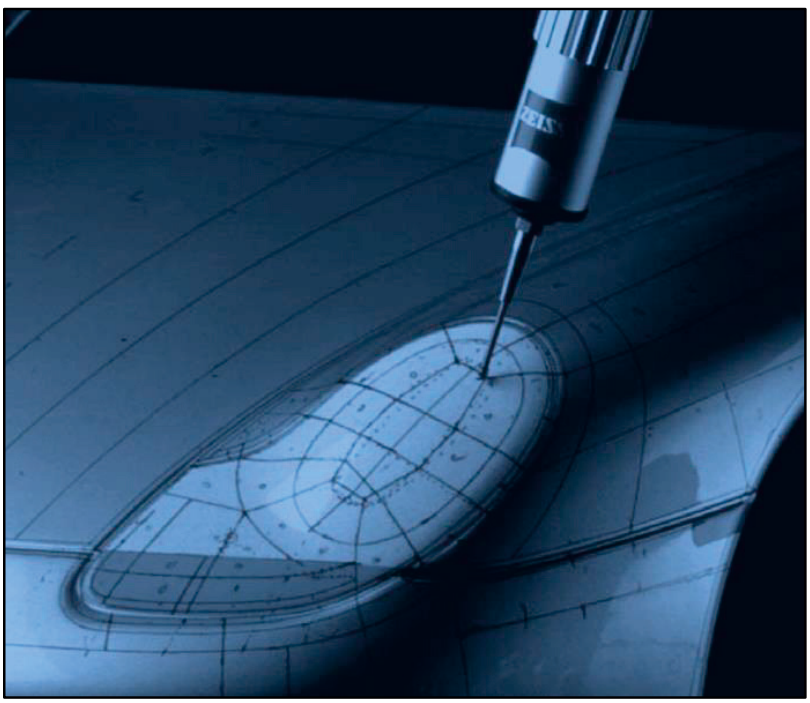


Bild 11.70 Segmentierung einer Objektgeometrie. Quelle: Carl Zeiss

Für eine vollständige Erfassung komplexer Oberflächen ist häufig eine Segmentierung der Objektgeometrie in einzelne Teilflächen erforderlich. Diese Teilflächen werden auf dem Objekt markiert und der Abtaststeuerung durch manuelles Abtasten der Randkurven bekannt gemacht, Bild 11.70.

Nach dieser Unterteilung können die oben genannten Abtaststrategien auf die einzelnen Segmente angewendet werden.

11.4.3.3 Tastsysteme

Die in Digitalisiersystemen eingesetzten Tastsysteme zur Messpunktaufnahme lassen sich im Wesentlichen in berührende (taktile) und berührungslose (meist optoelektronische) Tastsysteme einteilen.

Taktile Tastsysteme

Taktile Tastsysteme bestehen in der Regel aus einem Tastkopf, einem oder mehreren Taststiften und einer Rubinkugel je Taststift, mit der der Kontakt zur Oberfläche des Werkstücks hergestellt wird. Es lassen sich schaltende und messende Ausführungen unterscheiden, deren prinzipieller Aufbau in Bild 11.71 dargestellt ist.

Schaltende Tastsysteme besitzen eine Knickstelle, über die bei Berührung des Werkstücks der Taststift ausgelenkt wird, Bild 11.71 unten. Durch die Auslenkung des Taststiftes werden ein Schaltsignal und damit die Messwertaufnahme durch Auslesen der Wegmesssysteme des Messgerätes ausgelöst. Bei Auslenkung des Taststiftes werden die Verfahrachsen des Messgerätes durch die Steuerung gestoppt und anschließend entgegengesetzt zur Antastrichtung zurückgefahren. Daher ist mit schaltenden Systemen lediglich eine Einzelpunktantastung möglich, wobei allerdings sehr hohe Genauigkeiten erzielt werden. Durch die langsame Arbeitsweise des Verfahrens und die daraus resultierende geringe Zahl der mit vertretbarem Zeitaufwand erfassbaren Messpunkte eignet es sich im Wesentlichen zur Digitalisierung von Regelgeometrien, die sich mit Hilfe weniger Punkte mathematisch beschreiben lassen.

Den Aufbau eines messenden taktilen Tastsystems zeigt Bild 11.71 oben. Die Taststiftaufnahme ist hier an drei rechtwinklig zueinander angeordneten Federparallelogrammen befestigt, deren Auslenkung infolge einer Auslenkung des Taststiftes über einen integrierten eindimensionalen Wegaufnehmer gemessen wird. Messende Tastsysteme erlauben es in Verbindung mit einer entsprechenden Nachformsteuerung, den Taststift während der Digitalisierung in Kontakt mit der Oberfläche zu halten. Der Messpunkt berechnet sich dann aus der gemessenen Auslenkung des Taststiftes und der Stellung der Maschinenachsen aus den Positions-

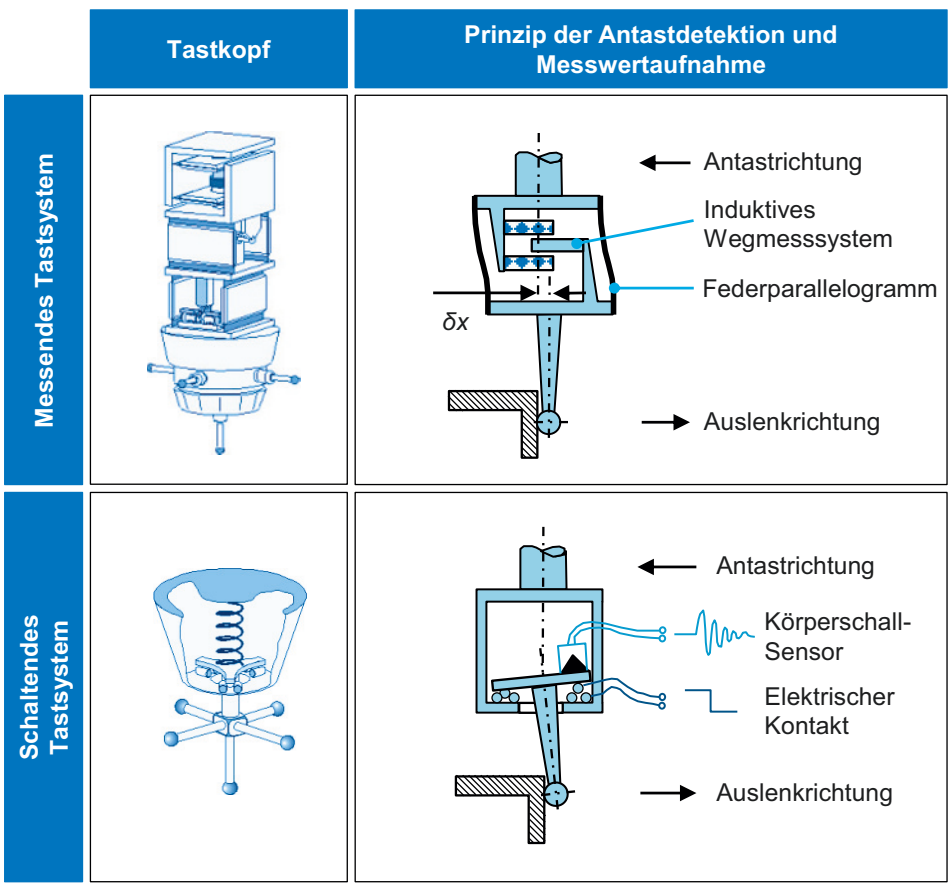


Bild 11.71 Taktile Tastsysteme.
Quelle: [PFEI98]

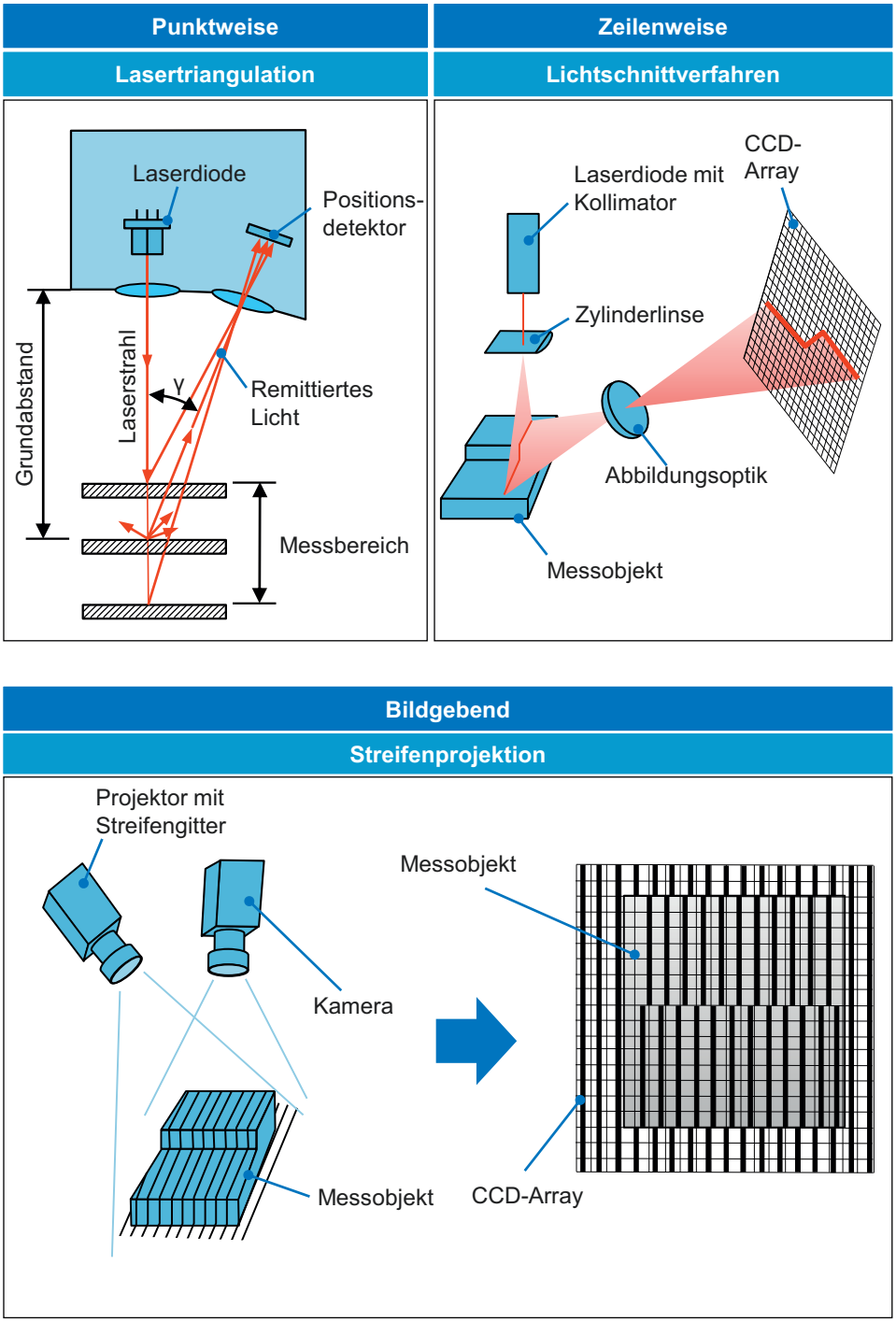


Bild 11.72 Funktionsprinzipien ausgewählter optoelektronischer Messverfahren zur dreidimensionalen Formerfassung

11

werten der Wegmesssysteme. Durch die kontinuierliche Arbeitsweise des Verfahrens ergeben sich deutlich kürzere Messzeiten als bei schaltenden Systemen bei gleichzeitig hohen Genauigkeiten.

Optoelektronische Tastsysteme

Für die Digitalisierung von Werkstückgeometrien werden ebenfalls optoelektronische Tastsysteme eingesetzt. Durch ihr berührungsloses Funktionsprinzip eignen sie sich besonders für die schnelle Digitalisierung auch komplexer Geometrien und weicher bzw. empfindlicher Materialien. Das Funktionsprinzip in diesem Zusammenhang eingesetzter Verfahren zeigen Bild 11.72 und Bild 11.73.

Für das optische Abtasten von Körpern zur Digitalisierung sind punktweise messende Triangulationssensoren aufgrund des im Prinzip einfachen physikalischen Aufbaus und des variabel einstellbaren Messbereiches gut geeignet. Daher kommen sie in der Industrie verstärkt zum Einsatz. Zur Messung des Abstands zwischen Sensor und Werkstück sendet eine Laserdiode einen Lichtimpuls aus, Bild 11.72 oben

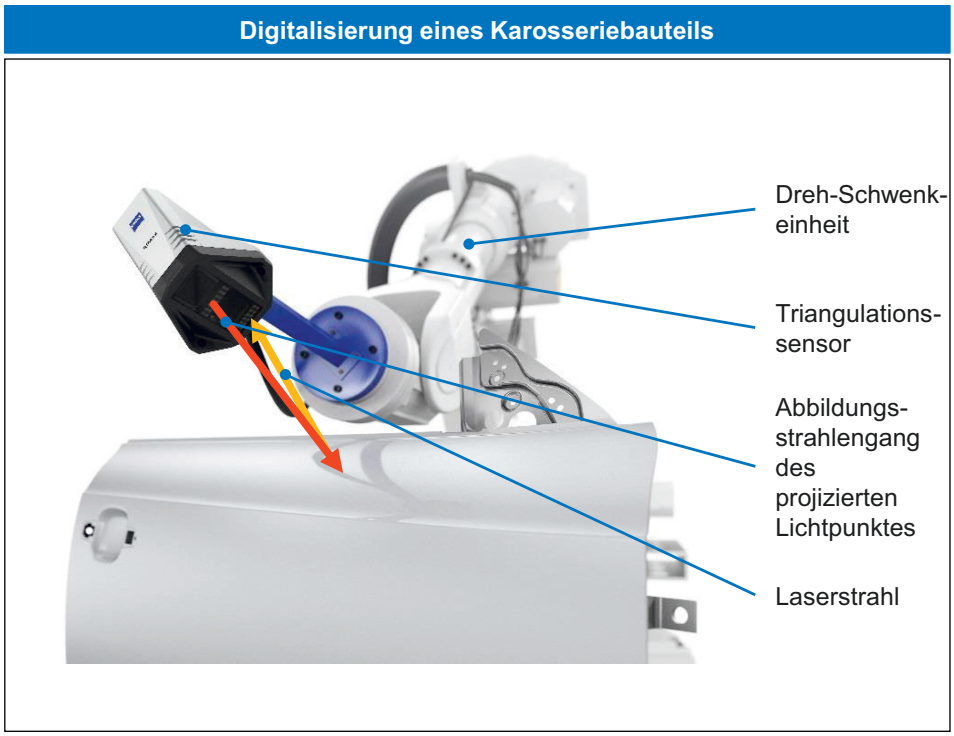


Bild 11.73 Digitalisierung eines Karosseriebauteils mit Hilfe eines Triangulationssensors am Dreh-Schwenk-Arm. Quelle: Carl Zeiss

links. Dieser trifft auf das Werkstück und wird in Abhängigkeit von der Oberfläche diffus, total oder gerichtet reflektiert. Die vom Objekt zurückgestrahlte Lichtenergie wird über eine Linse, die in einem definierten Winkel γ, dem Triangulationswinkel, zum Sendestrahl angeordnet ist, auf ein Empfangselement, meist eine CCD-Zeile (Charge Coupled Device) oder eine positionsempfindliche Diode (PSD) abgebildet. Anhand der Position des Lichtpunktes auf dem Empfangselement kann die Entfernung des Objektes bestimmt werden. Die Abtastrate bei in der Industrie üblichen Sensoren liegt bei 10 bis 20 kHz und kann bis auf 100 kHz gesteigert werden.

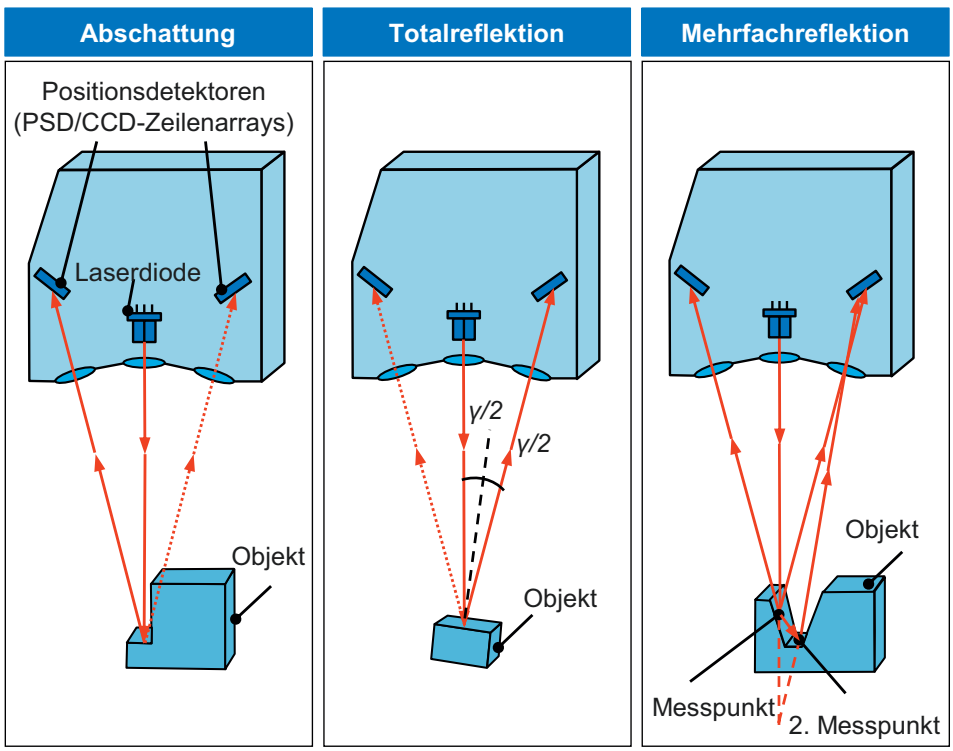


Bild 11.74 Typische Fehlerquellen bei der Triangulation

Der Nachteil aller optischen Taster nach dem Triangulationsprinzip besteht darin, dass die absolute Messgenauigkeit des Sensors von den Reflexionseigenschaften des Messobjektes abhängt. Sie kann deshalb nur gegenüber einem diffus reflektierenden Referenzwerkstoff angegeben werden. Im Allgemeinen wird hier von weißem Papier ausgegangen. Dabei lassen sich mit punktweise messenden Triangulationssensoren Genauigkeiten von unter 1/1000 des Messbereiches erreichen. An glänzenden Körpern, und damit auch bei Metallen, wird das Licht nicht diffus, sondern teilweise auch total reflektiert. Dadurch kann es zu Messfehlern kommen, die insbesondere bei Höhenunterschieden am Messobjekt auftreten, ◘ Bild 11.74 Die Oberfläche muss in diesen Fällen mit einem matten Sprühlack bedeckt werden. Die zunehmend eingesetzten CCD-Empfangselemente erlauben gegenüber den analogen positionsempfindlichen Dioden eine weitgehende rechnerische Kompensation von Oberflächeneinflüssen und Neigungsfehlern, sodass moderne Sensoren robust gegenüber Messfehlern sind.

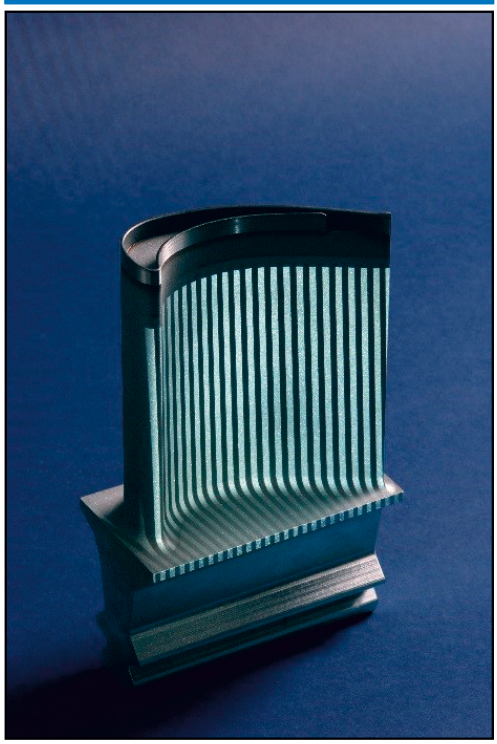
Obwohl im Prinzip ein Empfangselement zur Bestimmung der Entfernung ausreicht, geht zur Reduzierung der oben genannten Probleme der Trend zu Sensoren mit zwei Empfangselementen. Durch Auswertung der von beiden Empfangselementen ausgegebenen Messwerte lassen sich Oberflächen- und Neigungseinflüsse sowie Abschattungsfehler reduzieren. Speziell zur Digitalisierung von komplexen Freiformflächen existieren mittlerweile auch rotationssymmetrische Triangulationssensoren. Durch koaxiale Anordnung von Sender und kreisförmig um den Sender angeordnetem Empfangselement besitzen diese Sensoren eine höhere Unempfindlichkeit gegenüber Messfehlern, insbesondere bei Abschattungen.

Optische Tastsysteme nach dem Lichtschnittverfahren arbeiten ebenfalls mit dem Triangulationsprinzip, ◘ Bild 11.72 oben rechts. Dabei wird eine Lichtzeile durch Aufweitung des Laserstrahls über eine Zylinderlinse oder durch einen oszillierenden Spiegel erzeugt. Als Empfangselement dient ein CCD-Array, das gegenüber dem Laser um einen vorgegebenen Triangulationswinkel versetzt ist. Durch die quasiparallele Auswertung einer kompletten Lichtzeile bei üblichen Messfrequenzen von 5 bis 50 Hz können mit diesen Sensorsystemen gegenüber punktweise messenden Sensoren die erforderlichen Messzeiten zur Digitalisierung von Werkstückgeometrien bei geringeren erzielbaren Genauigkeiten und Auflösungen deutlich verkürzt werden.

Flächenhaft messende Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung haben in den letzten Jahren durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowohl an Universitäten als auch in der Industrie beachtliche Fortschritte erzielt. Durch die Möglichkeit, komplette Ansichten eines Objektes durch eine einzige Messung zu erfassen, sind dabei extrem schnelle Digitalisierungen auch komplexer Körper möglich. Daher werden diese Verfahren heute zunehmend im Bereich der Digitalisierung eingesetzt. Grundsätzlich können flächenhaft messende Verfahren in aktive und passive Verfahren unterschieden werden. Aktive Verfahren, wie z. B. das Streifenprojektionsverfahren, besitzen ein oder mehrere Beleuchtungsvorrichtungen, über die geeignete Beleuchtungsmuster auf die Messobjekte projiziert und von einer oder mehreren Kameras erfasst werden. Passive Verfahren, wie z. B. die Stereobildverarbeitung, verzichten auf diese Beleuchtungsmuster. Das Objekt wird hier durch mindestens zwei Kameras mit unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen erfasst. Aus der bekannten Position und Orientierung der Kameras zueinander lassen sich die 3D-Koordinaten eines Objektpunktes aus den zweidimensionalen Abbildungen der Kamerabilder über das Triangulationsprinzip berechnen. Die hierzu notwendige Identifikation und Zuordnung der Objektpunkte in den jeweiligen Kamerabildern ist aber häufig nicht eindeutig möglich, weswegen passive Verfahren in der Industrie heute nur bedingt zur Anwendung kommen [PFEI98].

Als Beispiel für ein aktives, flächenhaft messendes Verfahren zur dreidimensionalen Geometrieerfassung soll hier das Streifenprojektionsverfahren dienen. Beim Streifenprojektionsverfahren werden von einem Projektor über ein Gitter mit konstantem Gitterabstand Streifen auf ein Objekt projiziert, ◘ Bild 11.72 unten. Diese Streifen werden von einer oder mehreren Kameras erfasst und die Gitterver-

Streifenprojektionsverfahren zur Geometrievermessung



◘ **Bild 11.75** Streifenprojektionsverfahren zur Geometrieerfassung. Quelle: Fraunhofer IPT

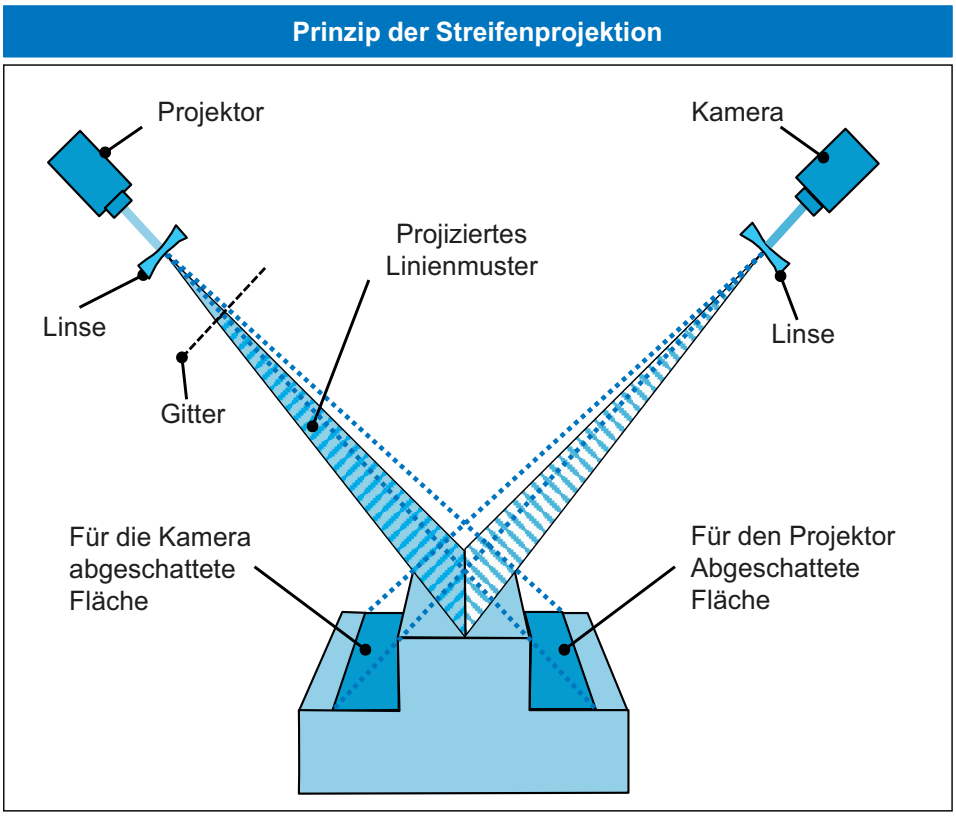


Bild 11.76 Abtasten einer räumlichen Modelloberfläche

zerrungen von einem Bildverarbeitungssystem zu einer Beschreibung der Oberfläche ausgewertet. Sind der Grundabstand, der Neigungswinkel von Kamera und Projektor sowie die Position des Gitters bekannt, lässt sich die Form des Objektes über den Strahlensatz berechnen. Bild 11.75 zeigt als Beispiel die Digitalisierung einer Freiformfläche. Die im Bild unterhalb des Messobjektes sichtbaren Markierungen dienen zur Kalibrierung des Systems.

Damit keine schleifenden Schnitte zwischen Projektionsstrahlen und Abbildungsstrahlen auftreten und eine gute Tiefenauflösung erreicht wird, ist ein relativ großer Grundabstand zwischen Kamera und Projektor erforderlich, wodurch sich Abschattungen ergeben können. Die Einsatzgrenzen dieser Messsysteme liegen, wie in Bild 11.76 gezeigt wird, in der Vermessung von unstetigen und steilen Objektoberflächen. Steile Objektoberflächen werden entweder von einer geringen Anzahl projizierter Linien getroffen oder durch eine geringe Anzahl von Abbildungsstrahlen auf das CCD-Array abgebildet. Mit zunehmender Steigung nehmen daher die Auflösung und damit auch die Messgenauigkeit des Sensorsystems ab. Bei noch größeren Höhenunterschieden entstehen abgeschattete Bereiche, die nicht mehr vermessen werden können und zu Fehlstellen in der digitalisierten Objektoberfläche führen. Für eine vollständige und genaue Digitalisierung der geometrischen Form eines Objektes ist daher häufig die Erfassung des Objektes aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen erforderlich.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich bei der Vermessung von Objekten mit unstetigen Übergängen, wie z. B. scharfen Kanten. An den Stufen reißen die projizierten Linien ab und müssen hinter den Stufen einander zugeordnet werden, was bei komplexen Körpern nicht ohne Weiteres eindeutig möglich ist. Dieses Problem kann durch eine sequenzielle Beleuchtung des Objektes mit unterschiedlichen, speziell kodierten Lichtmustern gelöst werden (Graycode-Verfahren). Durch die Kodierung ist bei Auswertung der jeweiligen Kamerabilder eine eindeutige Zuordnung der Bildpunkte zu den projizierten Linien möglich.

Die Auswertung der Kamerabilder erfolgt bei der Streifenprojektion durch Berechnung der Phasenlage der projizierten Linien, wobei Genauigkeiten von ca. 1/20 der Linienbreite erreichbar sind. Eine Erhöhung von Messgenauigkeit und Auflösung lässt sich einerseits durch eine Verringerung der Linienbreite erzielen, die allerdings von der Auflösung der Kamera begrenzt wird. Andererseits kann das Streifenprojektionsverfahren zur Genauigkeitssteigerung durch verschiedene Verfahren erweitert werden, wobei hier insbesondere das Phasenshift-Verfahren und das Moiré-Verfahren zu nennen sind. Beim Phasenshift-Verfahren wird das Streifenmuster zur Erhöhung der Auflösung innerhalb einer Streifenperiode sequenziell verschoben. Dadurch wird eine Phasengenauigkeit bis zu 1/100 der Streifenbreite erreicht. Beim Moiré-Verfahren wird zusätzlich zu dem Gitter im Strahlengang des Projektors auch ein Gitter in den Strahlengang der

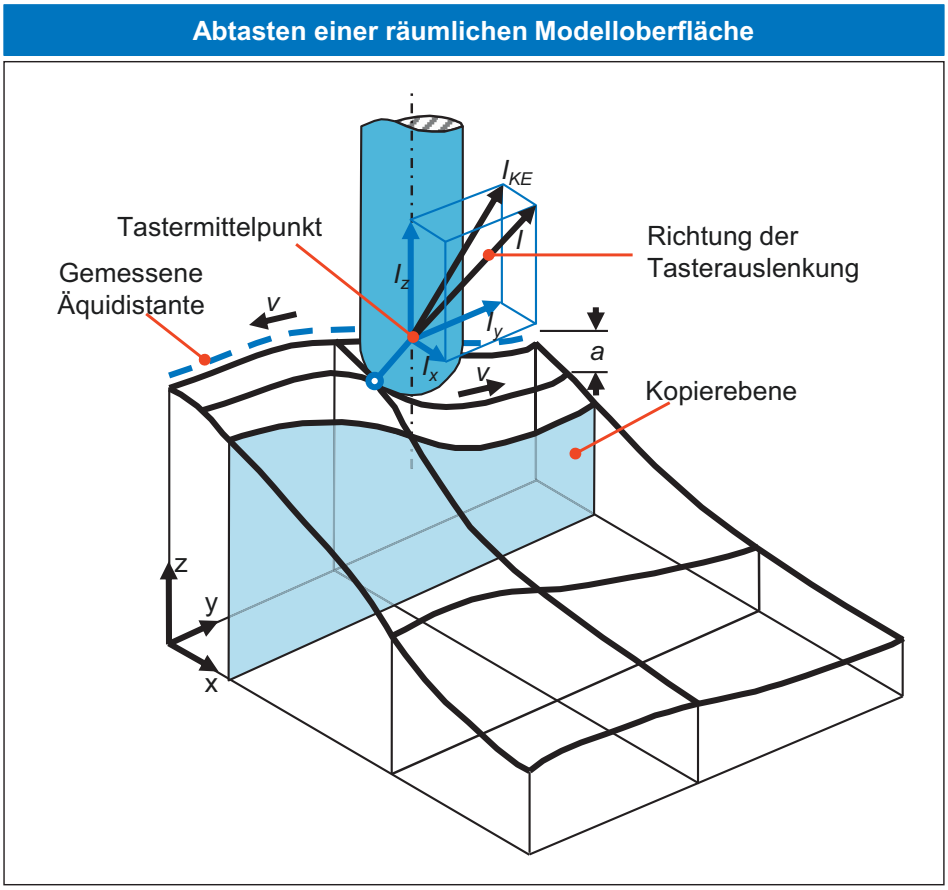


Bild 11.77 Abtasten einer räumlichen Modelloberfläche

Kamera gebracht. Bei der Abbildung der auf das Objekt projizierten Streifen ergibt sich aufgrund des Gitters vor der Kamera eine Schwebung von dunklen und hellen Linien auf dem CCD-Array, die zur Berechnung der Objektgeometrie ausgewertet werden. Mit diesem Verfahren lassen sich Höhenauflösungen im Bereich von Nanometern erreichen. Daher wird dieses Verfahren auch zur Maschinenuntersuchung eingesetzt.

11.4.3.4 Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Messdaten

Die Weiterverarbeitung der durch die Messwertaufnahme gewonnenen Daten verlangt, je nach Qualität und Ordnungsgrad der gemessenen Punktewolke, eine Vielzahl weiterer, teilweise sehr komplexer rechentechnischer Verarbeitungsschritte, auf die im Folgenden nur kurz eingegangen werden kann.

Erfolgt die Messwertaufnahme über ein taktiles Tastsystem, so beschreiben die gewonnenen Messdaten die Stellung des Mittelpunktes der Tastkugel zur jeweiligen Messzeit. Da die Tastkugel eine endliche Ausdehnung besitzt, weicht der eigentlich gesuchte Punkt, der Berührpunkt der Tastkugel mit der Objektoberfläche, von der gemessenen Position ab. Gemäß Bild 11.77 wird daher eine Äquidistante zur wirklichen Kontur des Werkstücks gemessen, die sich aus dem Tastkugelradius und der Auslenkung des Taststiftes l ergibt. Die wahre Werkstückkontur muss daher durch Verrechnung dieser Äquidistanten über eine sogenannte Tastkugelradius-Korrektur ermittelt werden.

Ein generelles Problem bei der Digitalisierung von Objektgeometrien ist die anfallende Datenmenge. Mit der Größe der Modelle entsteht durch das Abtasten ein wachsender Speicherbedarf, der nicht prinzipiell begrenzt ist. Da eine Bearbeitung der Digitalisierungsdaten in aufbereiteten Datenstrukturen wesentlich effizienter ist, erscheint es nicht sinnvoll, mit unnötig großen Datenmengen zu rechnen.

Herkömmliche CAD-Systeme sind für die Verarbeitung der großen Datenmengen, wie sie bei der Digitalisierung entstehen, nicht ausgelegt. Die Beschreibung der Geometrie in CAD-Systemen erfolgt üblicherweise anhand von Volumeninformationen oder Körperkanten, was eine äquivalente Geometrie effizienter abbildet. Daraus folgt die Forderung nach wirksamen Verfahren zur Datenreduktion, um die anfallenden Datenmengen zu minimieren, ohne einen Informationsverlust für die Abbildung des abgetasteten Modells hinnehmen zu müssen.

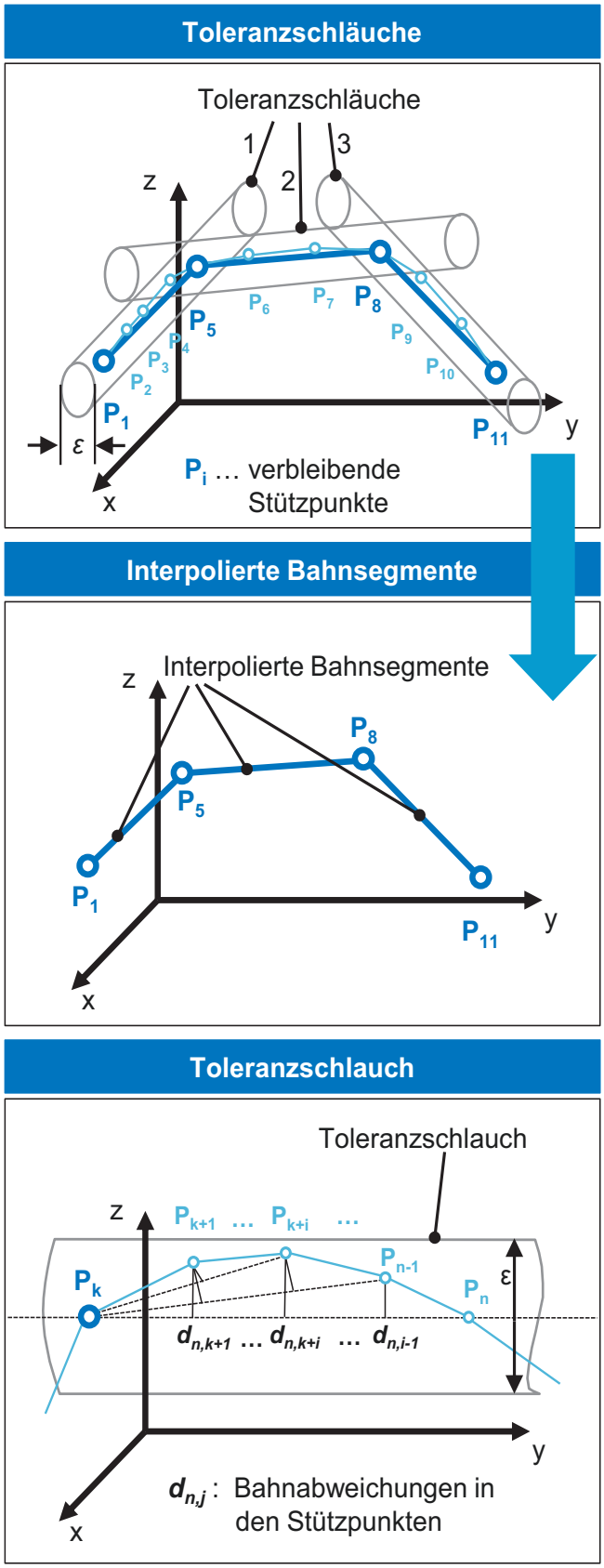


Bild 11.78 Datenreduktion bei linearer Interpolation. Nach Pritschow

Übliche Verfahren der Datenreduktion bei sequenziell tastenden Sensorsystemen überprüfen während der Abtastung, ob die durch die Datenreduktion entstandenen Bahnfehler noch innerhalb eines zulässigen Toleranzbereichs liegen. Hierfür werden Toleranzschläuche definiert, wobei deren Form von der Art des gewählten Interpolationsverfahrens abhängt [o.V.86]. Bild 11.78 zeigt die Vorgehensweise anhand eines Beispiels für die Linearinterpolation. Dabei wird eine Folge von Abtastpunkten P_k bis P_n durch ein Geradenstück ersetzt, das von P_k bis zu dem zuletzt ermittelten Abtastpunkt P_n geht, Bild 11.78 unten. Liegen die Zwischenpunkte P_{k+1} bis P_{n-1} noch innerhalb eines um das Geradenstück gelegten Toleranzschlauches, ist die Linearinterpolation zwischen den Punkten P_k und P_n zulässig und es kann der nächste Abtastwert P_{n+1} mit in die Untersuchungen einbezogen werden. Dies erfolgt in der Art, dass jetzt ein Geradenstück von P_k nach P_{n+1} gelegt wird und dann überprüft wird, ob sich die Punkte P_{k+1} bis P_n noch innerhalb des um das neue Geradenstück liegenden Toleranzschlauches befinden.

Diese Vorgehensweise der schrittweisen Verlängerung des Geradenstücks setzt sich so lange fort, bis für das betrachtete Geradenstück irgendein Zwischenpunkt nicht mehr innerhalb des entsprechenden Toleranzschlauchs liegt. In diesem Fall steht dann fest, dass die letzte Verlängerung, beispielsweise der Übergang von P_n auf P_{n+1} als neuer Endpunkt nicht mehr zulässig war und der vorherige Endpunkt P_n als neuer relevanter Stützpunkt zu registrieren ist. Gleichzeitig können alle Zwischenpunkte P_{k+1} bis P_{n-1} gelöscht werden, da sie nicht mehr benötigt werden. Anschließend läuft der Reduktionsalgorithmus neu an, d. h. der Punkt P_n wird zum Anfangspunkt eines neuen Geradenstücks, dessen Endpunkt sich durch die weiteren Abtastwerte ergibt.

In Bild 11.78 oben ist ein Konturstück gezeigt, bei dem über das beschriebene Reduktionsverfahren aus elf aufgenommenen Bahnpunkten sieben Zwischenpunkte gelöscht werden können. In dem beschriebenen Beispiel wird von einer linearen Interpolation ausgegangen. Denkbar sind aber auch Zirkular- oder Spline-Interpolationsverfahren, über die unter Umständen die Zahl der erforderlichen Abtastwerte noch weiter reduziert werden kann. Hier ist dann die Form des Toleranzschlauches entsprechend anzupassen, was beispielsweise bei der Zirkularinterpolation zu einem kreisförmigen Schlauch führt.

Insbesondere bei der Digitalisierung dreidimensionaler Objekte mit Hilfe flächenhaft messender optischer Antastsysteme sind vor einer Weiterverarbeitung der Messdaten zumeist eine Vielzahl teilweise interaktiver Bearbeitungsschritte erforderlich, auf die hier allerdings nicht im Detail eingegangen werden soll. So müssen verschiedene Ansichten eines Objektes in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden, wobei redundante Informationen aus sich überlappenden Bereichen zu eliminieren sind. Sind Lage-

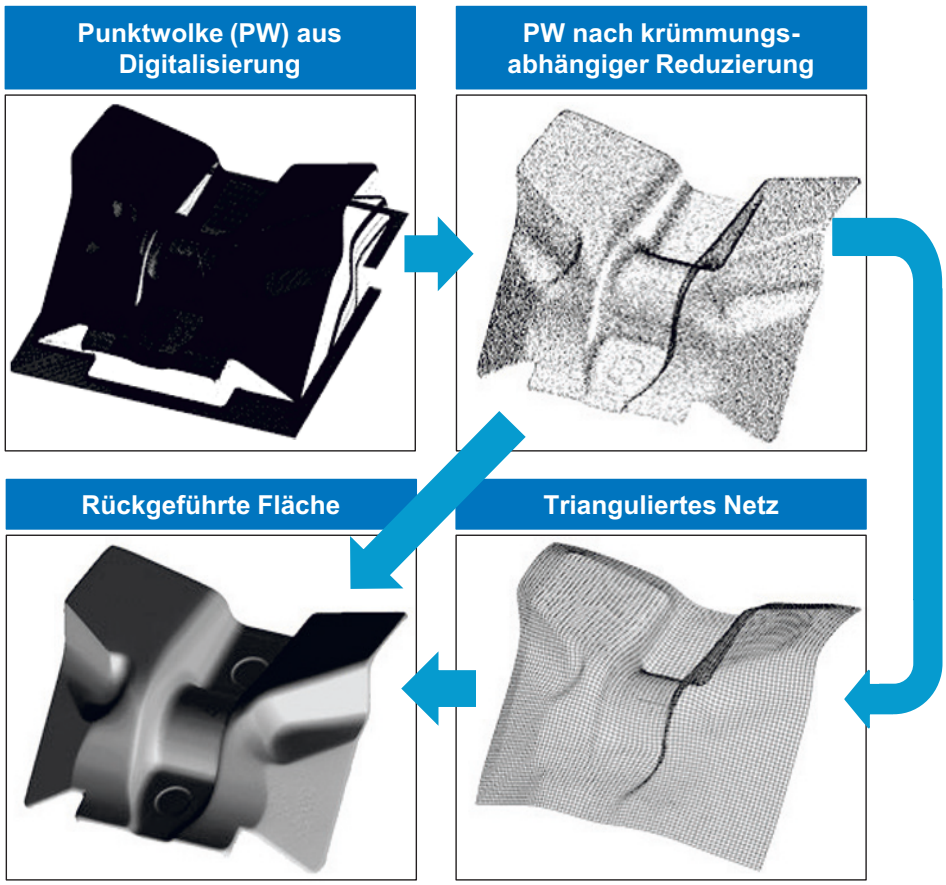


Bild 11.79 Flächenrückführung von Punktewolken. Quelle: Carl Zeiss



Bild 11.80 Digitalisiertes Oberflächenrelief in Punktdarstellung und berechnete Fräsbahn. Quelle: Creaform

und Richtungsbeziehung der Ansichten zueinander nicht bekannt, können die Parameter für die Transformation auch durch approximative Verfahren aus den überlappenden Bereichen der Einzelansichten berechnet werden (Matching-Verfahren). Des Weiteren ergibt sich das Problem der Objekterkennung aus den Kamerabildern, d. h. die eindeutige Unterscheidung zwischen relevanten, das Messobjekt beschreibenden Bildpunkten und dem Hintergrund. Aufgrund des teilweise extrem großen Datenaufkommens, das bei modernen Kamerasystemen üblicherweise mehrere Megabyte pro Bild übersteigt, ist außerdem der Einsatz leistungsfähiger Algorithmen zur Datenreduktion erforderlich. Diese Datenreduktion wird meist in Abhängigkeit von der Flächenkrümmung durchgeführt, sodass starke Neigungsänderungen in der Oberfläche, wie sie z. B. an Kanten auftreten, durch eine höhere Punktdichte repräsentiert werden als ebene Flächen.

Die Erstellung von NC-Daten auf Basis von Messpunkten wird in der Regel über eine parametrische Beschreibung

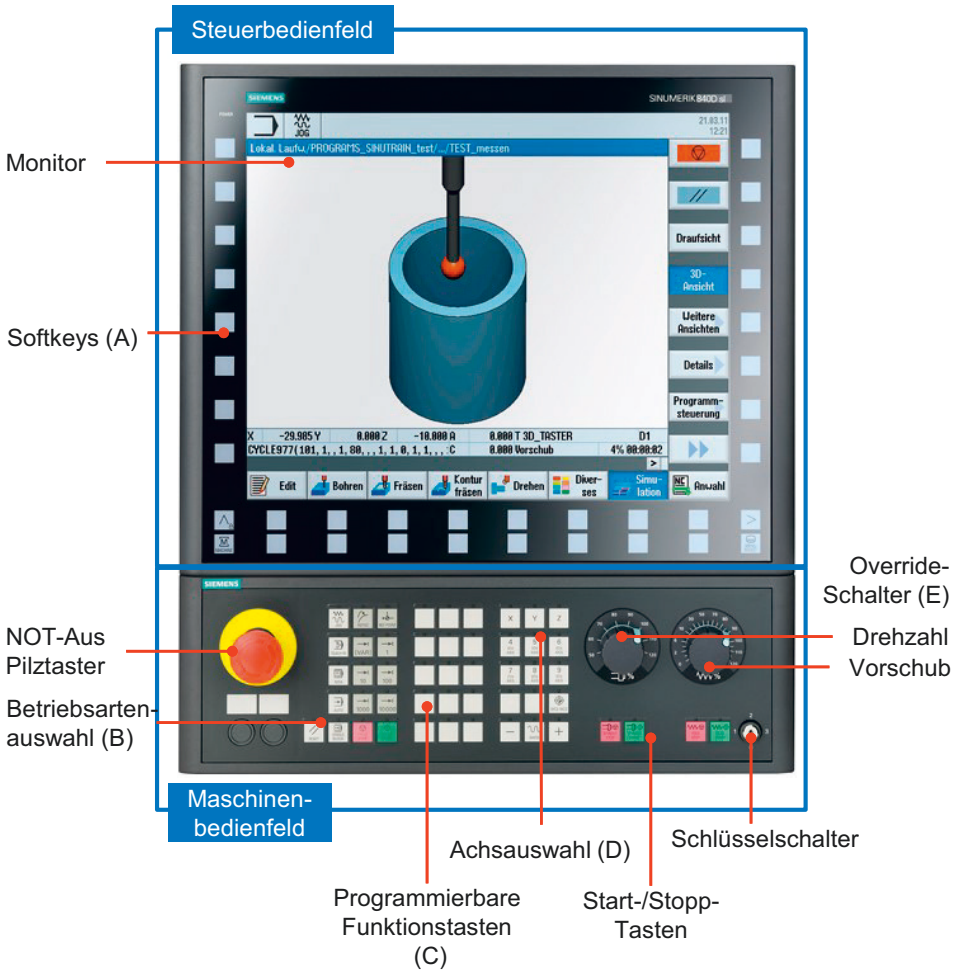


Bild 11.81 Maschinenbedien- und -steuertafel einer Werkzeugmaschine. Quelle: SIEMENS

(z. B. Nurbs-Flächen) oder über eine polygonisierte Darstellung (z. B. triangulierte Dreiecksflächen) der Objektoberfläche durchgeführt. Die Polygonisierung kann dabei auch als Vorstufe für die anschließende Berechnung der parametrischen Darstellung dienen, Bild 11.79 Dieses als Flächenrückführung bekannte Problem ist bis heute nur für relativ einfache Objektgeometrien und in Abhängigkeit von der Struktur der Messdaten automatisierbar.

Komplexe Bauteile müssen entweder bei der Messung oder nachträglich anhand der gemessenen Punktewolke interaktiv in Einzelsegmente zerlegt, in Teilflächen umgewandelt und anschließend wieder zusammengefügt werden. Dabei wird der Anwender von den jeweiligen Systemen durch eine Vielzahl von Funktionen unterstützt. Die hierzu notwendige Software ist entweder Bestandteil des Digitalisiersystems oder als Modul einiger CAD/CAM-Systeme erhältlich. Daneben existieren speziell ausgelegte Programme, die eine umfangreiche Funktionalität zur Flächenrückführung besitzen.

Ein Beispiel für die Visualisierung der NC-Datengenerierung mit Hilfe eines CAD-Systems zeigt Bild 11.80. Ein handgeführter Scanner scannt die reale Bauteiloberfläche in verschiedenen Positionen und Orientierungen, links, und erstellt daraus revers eine digitale Form, rechts.

11.5 Benutzerschnittstellen an Werkzeugmaschinen

11.5.1 Bedienfelder an Werkzeugmaschinen

Als Schnittstelle zwischen Benutzer und NC-Maschine wird ein Bedienfeld eingesetzt, über das eine manuelle Aktivierung der verfügbaren Funktionen erfolgt. In der Regel besteht dieses Bedienfeld aus verschiedenen Komponenten, die sowohl für die Bedienung maschinenspezifischer als auch steuerungsspezifischer Funktionen erforderlich sind. Bild 11.81 gibt einen Überblick über den Aufbau sowie den Funktionsumfang eines Steuer- und Maschinenbedienfeldes [SIEM12].

Das Steuerbedienfeld, das im oberen Bildteil dargestellt ist, umfasst diverse Softkeys (A) sowie einen Monitor (üblicherweise ein TFT-Flachdisplay). Integriert in das Steuerbedienfeld ist heute meist ein Industrie-PC in Flachbauweise

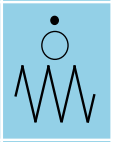
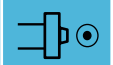
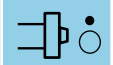
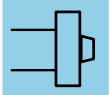
Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
	Rücksetzen		Zuschalten		Vorschub zuschalten
	Löschen		Abschalten		Vorschub abschalten
	Handeingabe		Vorschub		Spindel zuschalten
	Automatikbetrieb		Schneller Vorschub Eilgang		Spindel abschalten
	Referenzpunkt		Daten-Eingabe		Programm-Start
	Programmierter Halt		Spindel		Programm-Stopp

Bild 11.82 Funktionssymbole zur Verwendung an Werkzeugmaschinen. Auszug aus den DIN-Normen 24900, 30600 und 55003

mit Windows-Betriebssystem. Über diese Eingabeschnittstelle lassen sich beispielsweise NC-Programme editieren, Korrekturwerte manuell setzen oder NC-Informationen abrufen. Die Softkeys werden dazu genutzt, Funktionen der NC-Steuerung aus einem strukturierten Menübaum aufzurufen. Beispiele für diese Funktionen sind die Eingabe von Werkzeugkorrekturdaten, die Beeinflussung von Programmparametern sowie der Aufruf einer Bearbeitungssimulation. In Abhängigkeit von der gewählten Betriebsart können darüber hinaus weiterführende Informationen zum Maschinenstatus vom Benutzer abgerufen werden.

Das Maschinenbedienfeld enthält demgegenüber Funktionselemente, die für die manuelle Steuerung der Maschine erforderlich sind. Für eine Beschreibung der zur Verfügung stehenden Funktionen lassen sich die Elemente in verschiedene Gruppen einteilen.

Über die Tasten der Gruppe B, vgl. Bild 11.81, kann

- die Anwahl der Betriebsart (Einrichten, Handeingabe, Automatik, Einzelsatz),
- das Rücksetzen der Steuerung (Reset-Funktion),
- die Anwahl des Referenzierbetriebs sowie
- die Einstellung der Empfindlichkeit für den inkrementellen Betrieb (z. B. 0,01 mm/Impuls)

erfolgen.

Die Tastengruppe C kann vom Werkzeugmaschinenhersteller frei belegt werden. Über diese Tasten werden zumeist maschinenspezifische Einrichtungen aktiviert (z. B. Einschalten des Späneförderers, Aktivierung der Kühlmittelzufuhr, Spannen und Lösen des Werkzeugs usw.).

Für eine manuelle Steuerung der Maschinenachsen werden die Tasten der Gruppe D benötigt. Hierzu ist eine entsprechende Anwahl der Achsen (X, Y, Z, …) sowie die gewünschte Fahrrichtung in positiver oder negativer Achsrichtung über das Tastenfeld einzugeben.

Mit Hilfe der Drehschalter (Gruppe E) kann eine Beeinflussung der programmierten Spindeldrehzahl sowie der Vorschubgeschwindigkeit erfolgen. Die Spindeldrehzahl kann durch den „Override“ in der Regel in einem Bereich von 50 bis 120 % des programmierten Wertes manuell geändert werden. Der Vorschub kann zumeist im Bereich zwischen 0 bis 150 % variiert werden. Den Drehschaltern sind weitere Tastenelemente zugeordnet, über die der Vorschub bzw. die Drehzahl übergreifend ein- bzw. ausgeschaltet werden kann.

Der Tastenblock des Steuerbedienfeldes enthält alle Funktionen einer normalen PC-Tastatur einschließlich verschiedener Sonderzeichen für die Cursor- und Bildschirmsteuerung. Grundsätzliche Unterschiede bestehen lediglich

hinsichtlich der Anordnung und Symbolik der Tastenelemente.

Die Symbolik auf den Funktionstasten des Steuer- und Maschinen-Bedienfeldes ist in DIN-Normen beschrieben [DIN82; DIN81; DIN83a]. Bild 11.82 zeigt einen Ausschnitt der wichtigsten Funktionssymbole. In diesem Zusammenhang wurde im Projekt Hümnos ein herstellerübergreifender Styleguide zur Gestaltung bzw. Vereinheitlichung der Benutzungsoberflächen von Maschinen-Steuerungen erarbeitet. Die Richtlinie enthält ein Begriffslexikon mit der Übersetzung wichtiger Fachbegriffe sowie Regeln zur Gestaltung von Steuerungsoberflächen und Bediendialogen [OSAC97].

11.5.2 Manuelle Prozessführung

11.5.2.1 Allgemeine Übersicht

Im Hinblick auf den werkstattorientierten Einsatz der Bearbeitungsmaschinen – insbesondere in der Einzel- und Kleinserienfertigung – kommt der manuellen Prozessführung eine zentrale Bedeutung zu. Im Gegensatz zur Serienfertigung, bei der eine automatisierte Überwachung der ablaufenden Prozesse im Vordergrund steht, ist hier aufgrund des umfassenden Aufgabenspektrums der Einsatz von qualifiziertem und erfahrenem Fachpersonals notwendig. Das bedeutet, dass vom Einrichten der Maschine über die manuelle Bearbeitung sowie hinsichtlich der Programmierung und Überwachung des Fertigungsprozesses Kenntnisse über die ablaufenden Prozesse vorausgesetzt werden müssen. Ergänzend zu den in ▶ Kap. 11.4.2.4 beschriebenen werkstattorientierten Programmierverfahren sollen hier die Bereiche des Einrichtens, der manuellen Bearbeitung und Prozessführung im Automatikbetrieb sowie das Gebiet der benutzerorientierten Prozessanalyse beschrieben werden.

11.5.2.2 Bedienelemente zur Prozessführung

Für die Durchführung der Bedienoperationen im Rahmen der betrachteten Aufgabenbereiche stehen dem Benutzer verschiedene Bedienelemente zur Verfügung, über die eine manuelle Steuerung der Achswege sowie der Achsgeschwindigkeiten im Einricht- oder Automatikbetrieb erfolgen kann. Nachdem die vorbereitenden Arbeiten, wie beispielsweise die Durchführung der Referenzpunktfahrt, das Spannen, Abstützen und Ausrichten des Werkstückes, abgeschlossen sind, besteht grundsätzlich die Forderung, die exakte Lage des Werkstückes im Maschinenkoordinatensystem zu beschreiben. Dazu ist eine manuelle Positionierung der NC-Achsen erforderlich. Für die Durchführung dieser Operation



Bild 11.83 Handbediengerät einer Werkzeugmaschine. Quelle: SIEMENS

sind standardmäßig Tipptasten am Bedienfeld der Steuerung vorgesehen, die eine Grob- und Feinpositionierung der NC-Achsen in Verbindung mit den Achswahl- und Richtungstasten sowie mit dem Vorschuboverride-Schalter ermöglichen.

Im Falle der Grobpositionierung erfolgt eine Bewegung der NC-Achse, solange die entsprechende Tipptaste betätigt wird (kontinuierliche Bewegung). Die Geschwindigkeit der Achse wird hierbei über den Vorschuboverrideschalter eingestellt. Im Gegensatz dazu kann bei der Feinpositionierung der NC-Achse ein definierter Achsweg bei jeder Tippoperation manuell eingeleitet werden (inkrementelle Bewegung). Der Einstellbereich für die Vorgabe des Achsweges umfasst in der Regel einen steuerungsspezifisch einstellbaren Wertebereich. Hierdurch lassen sich über die Bedientafel die erforderlichen Achspositionen im Bereich der Maschinengenauigkeit manuell anfahren.

Als Bestandteil einer erweiterten Benutzerschnittstelle sind für den Einrichtbetrieb elektronische Handbediengeräte verfügbar, ◘ Bild 11.83.

Der Benutzer kann diese Steuertafel in die Hand nehmen und sich in die Nähe des Prozessgeschehens begeben. Hierdurch ist eine verbesserte Beobachtung kritischer Arbeitssituationen (z. B. das Feinpositionieren der NC-Achsen) möglich.

Eine Alternative zu den beschriebenen Tipptasten für die Steuerung der NC-Achsen stellt der Einsatz eines Handrads dar. Prinzipiell ist dieses Bedienelement im Hinblick auf die Funktion identisch mit den mechanischen Handrädern an konventionellen Bearbeitungsmaschinen. Der wesentliche Unterschied zwischen der mechanischen und der elektrischen Umsetzung der Drehbewegung besteht jedoch darin, dass bei der elektronischen Komponente eine Kopplung auf signaltechnischer Ebene zur Maschinensteuerung besteht. Das bedeutet, dass bearbeitungsabhängige Prozessinformationen (z. B. die während der Bearbeitung auftretenden Kräfte) durch den Benutzer nicht erfasst werden können. Jedoch kann hier eine manuelle Vorgabe der Weggrößen über den Drehwinkel sowie in Abhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit eine Geschwindigkeitssteuerung über ein einziges Bedienelement erfolgen. Hierdurch lassen sich sowohl die Grob- und Feinpositionierung der NC-Achsen im Einrichtbetrieb, als auch die Durchführung einfacher manueller Bearbeitungsoperationen ohne Zuhilfenahme weiterer Bedienelemente erzielen. Entsprechend der Ausführungsform konventioneller Bearbeitungsmaschinen können in die Bedientafel mehrere elektronische Handräder integriert werden. Die Eingabeelemente besitzen dann zumeist eine feste Zuordnung zur jeweils betrachteten Achse, wodurch die Anwahl der aktiven Achse über die Achswahltasten entfällt. Eine derartige Gestaltung der Bedientafel gestattet darüber hinaus die manuelle Bewegungsführung mehrerer Achsen zur gleichen Zeit.

Für eine direkte Beeinflussung des programmgesteuerten Ablaufs erhalten die eingangs erwähnten Override-Schalter eine besondere Bedeutung. Für den Benutzer stellt die Variation der Geschwindigkeitsparameter eine Möglichkeit dar, einerseits den Fertigungsprozess hinsichtlich technologischer Randwerte zu optimieren. Andererseits können im Falle des ersten Durchlaufs eines NC-Programms die Verfahrgeschwindigkeiten der Achsen mit Hilfe des Vorschuboverrides zu Testzwecken herabgesetzt werden. In diesem Zusammenhang erweist sich ebenfalls der Einzelsatzbetrieb als nützlich. Bei Anwahl dieser Betriebsart wird nach jedem NC-Satz die Bearbeitung unterbrochen und kann durch ein erneutes Betätigen der Taste „NC-Start“ satzweise fortgesetzt werden. Über eine Kontrolle der satzbezogenen Restweganzeige bzw. der nachfolgenden NC-Sätze wird somit ein Testbetrieb ermöglicht.

11.5.2.3 Möglichkeiten für die Realisierung einer benutzerorientierten Prozessführung

Gegenstand früherer und aktueller Forschungsvorhaben ist die Gestaltung anwendungs- und anwendergerechter Mensch-Maschine-Interaktionsformen an Werkzeugmaschinen. Dabei werden geeignete technische Komponenten entwickelt, die es gestatten, das benutzerspezifische Erfahrungswissen in den Fertigungsprozess einfließen zu lassen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, durch die Anwendung dieser Komponenten neues Erfahrungswissen zu sammeln. In Zusammenhang mit den hier betrachteten Elementen zur manuellen Prozessführung konnten aus zahlreichen Untersuchungen in der betrieblichen Praxis Anforderungen an die Gestaltung dieser Komponenten unter interdisziplinären Gesichtspunkten zusammengetragen werden. Die Umsetzung der beschriebenen Forderungen in ein geeignetes technisches Konzept lässt sich anhand der Darstellung nach ◘ Bild 11.84 erläutern.

Als Grundlage wurde für die manuelle Steuerung von NC-Fräsmaschinen ein mehrachsiges Bedienelement in Form eines Joysticks konzipiert. Aus Gründen des begrenzten Aussteuerbereiches des Bedienelementes von ca. ±20° wurde eine geschwindigkeitsproportionale Eingabemöglichkeit vorgesehen. Das heißt, dass in Abhängigkeit vom Auslenkwinkel der betreffenden Joystick-Achse eine entsprechende Geschwindigkeit der zugeordneten NC-Achse eingestellt wird.

Für die Berücksichtigung benutzerspezifischer Belange sowie prozessbezogener Anforderungen (z. B. Grob- und Feinpositionierung) muss die Festlegung des Geschwindigkeitssollwertes in Abhängigkeit von der Auslenkbewegung flexibel konfigurierbar gestaltet sein. Diese Forderung kann dadurch realisiert werden, dass die Beziehung zwischen Auslenkwinkel des Bedienelementes und der zugeordneten Sollgeschwindigkeit der NC-Achse über Kennlinien erfolgt. Entsprechend der Darstellung nach ◘ Bild 11.84 können diese Kennlinien für die Umsetzung der Joystickauslenkung in Verfahrgeschwindigkeit für die jeweiligen Anwendungen modifiziert werden [NN99].

Bild 11.84 Technisches Konzept für die Bedienelemente zur manuellen Prozessführung

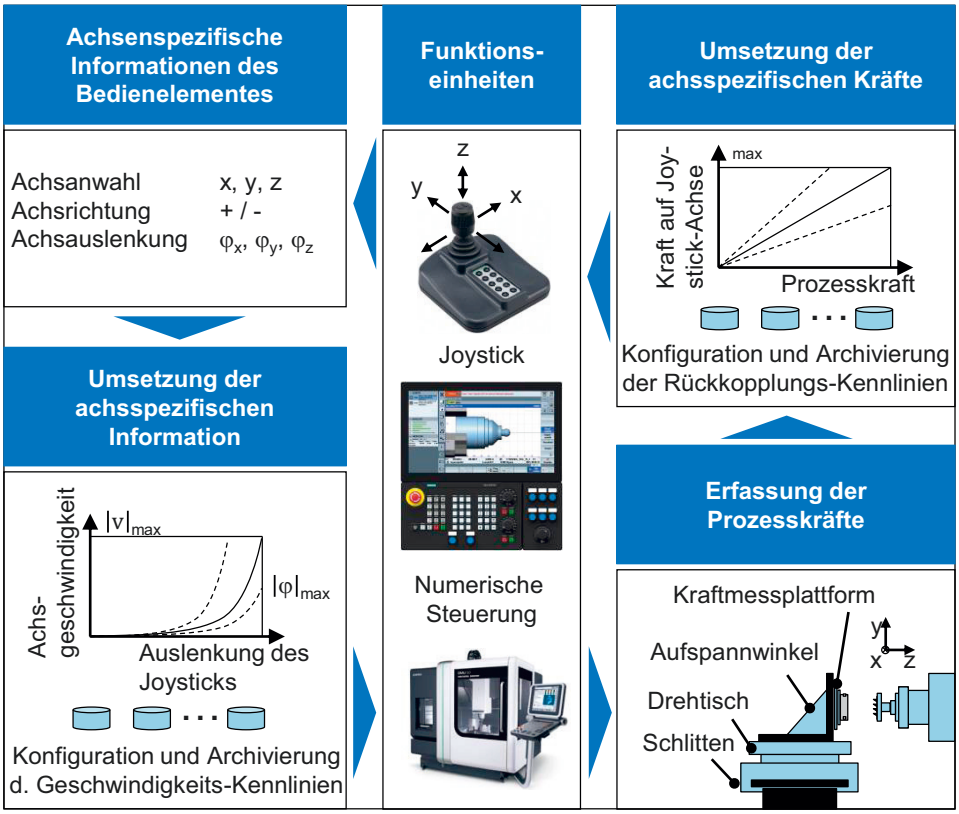
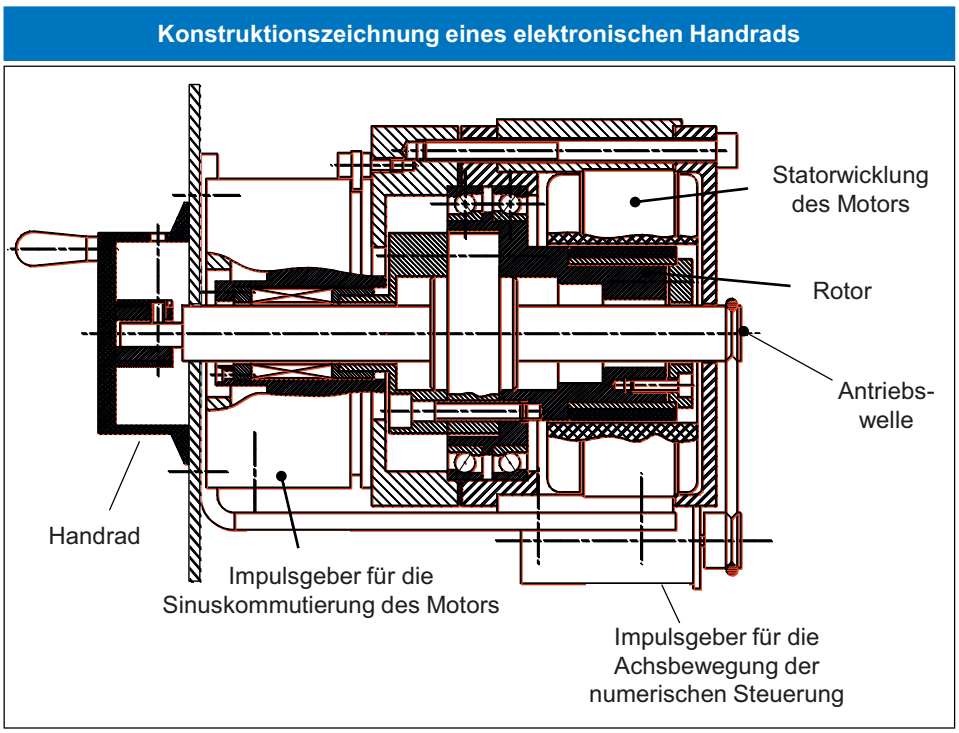


Bild 11.85 Elektronisches Handrad mit integrierter Rückkopplungseinheit



Um dem Benutzer auch ein Gefühl für den Prozessverlauf zu geben, wurden die auftretenden Bearbeitungskräfte im Falle der spanenden, manuellen Bearbeitung auf die Stellachsen des Bedienelementes zurückgekoppelt. In Abhängigkeit von der jeweiligen Bearbeitungssituation lassen sich in die Auswertung der Bearbeitungskräfte ebenfalls werkzeugspezifische Rückkopplungskennlinien aufnehmen, die eine Zuordnung zwischen auftretender Werkzeug- bzw. Maschinenbelastung und der resultierenden Rückkopplungskraft beschreiben, ◘ Bild 11.84.

Die Realisierung der Prozesstransparenz durch die Rückkopplung der bearbeitungsabhängigen Prozesskräfte ist nicht auf das hier vorgestellte Bedienelement beschränkt. Wie in ◘ Bild 11.85 gezeigt, kann ein konventionelles elektronisches Handrad ebenfalls mit einem geeigneten Rückkopplungsmechanismus ausgestattet werden [WECK97].

Hinsichtlich der hier realisierten Komponente wird für die Rückkopplung der Prozesskräfte ein direkt angetriebener Elektromotor verwendet. Hierbei wird die lineare Beziehung zwischen dem eingespeisten Strom und dem Drehmoment des Motors ausgenutzt. Als Funktion der gemessenen Prozesskraft kann hierüber ein kraftproportionales Gegenmoment auf einfache Weise erzeugt werden.

Erste praktische Untersuchungen haben gezeigt, dass durch den Einsatz der hier vorgestellten Bedienelemente Möglichkeiten für eine verbesserte Prozessführung an Werkzeugmaschinen bereitgestellt werden können. Diese Aussage gilt für beide technische Komponenten zur Durchführung manueller Bearbeitungsoperationen bei einfachen Werkstückgeometrien. Besonders erwähnenswert ist jedoch der Joystick, der sowohl für den einfachen Positionierbetrieb der NC-Achsen als auch für die spanende Bearbeitung als ideales, benutzerorientiertes Eingabeelement bezeichnet werden kann [WECK05].

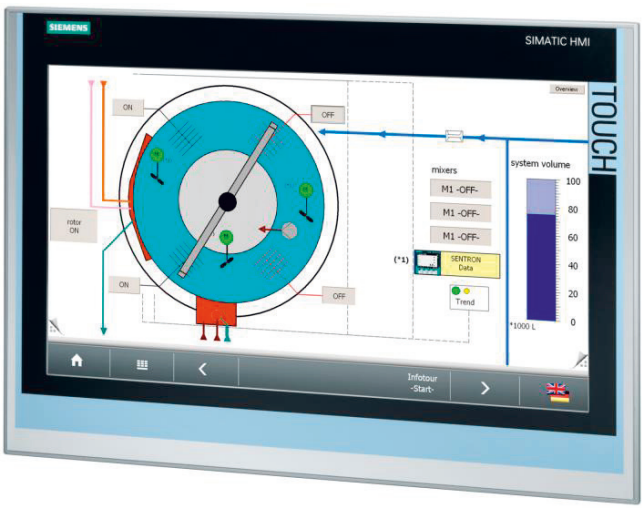
Abseits der eigentlichen Prozesssteuerung stellt die Navigation innerhalb der Bedienoberfläche sowie die Steuerung der Werkzeugmaschine ebenfalls einen wesentlichen Teil der Mensch-Maschine-Interaktion dar. Bis vor einigen Jahren erfolgte die Interaktion ausschließlich über physikalische Bedienelemente, vgl. ◘ Bild 11.81. Inzwischen sind auch touchsensitive Flächen Stand der Technik.

Abhängig vom Anwendungsgebiet und den daraus resultierenden Anforderungen stehen unterschiedliche Touchtechnologien zur Verfügung, die im Folgenden kurz dargestellt werden:

a) Kapazitiv: Kapazitive Touchscreens können unterteilt werden in oberflächen-kapazitiv und projiziert-kapazitiv. Bei der **oberflächen-kapazitiven** Touchtechnologie wird eine durchsichtige leitfähige Folie (meist beschichtet mit Metalloxid) auf eine Glasoberfläche aufgebracht. Über das Anlegen von Wechselspannung in den Ecken des Bildschirms wird ein homogenes elektrisches Feld erzeugt. Bei Berührung der Scheibe mit einem leitfähigen Gegenstand (z. B. Finger) findet ein Ladungstransport in dessen Richtung statt, wodurch sich das elektrische Feld ändert. Die resultierenden Ströme in den Bildschirmecken werden gemessen und aus ihrem Verhältnis die genaue Position des Berührpunkts errechnet. Bei der **projiziert-kapazitiven** Methode wird ein Leiterbahngitter aus zwei übereinander liegenden, voneinander isolierten Leiterbahnebenen aufgespannt, von denen eine als Treiber (Signalgeber), die andere als Sensor fungiert. Befindet sich ein leitfähiger Gegenstand in unmittelbarer Nähe eines Kreuzungspunkts zweier Leiterbahnen, so lässt sich die Kapazitätsänderung detektieren und daraus die Koordinaten des Berührpunkts berechnen. Das Gitter wird in der Regel zwischen zwei Glasscheiben angebracht und ist somit vor Umwelteinflüssen geschützt. Die abdeckende Glasschicht kann dabei eine Dicke von bis zu 20 mm aufweisen, ohne die Touch-Funktionalität nennenswert zu beeinträchtigen [SCHÖ08].

b) Resistiv: nicht leitfähige Abstandshalter werden in einem dichten Raster zwischen einer äußeren flexiblen Polyesterschicht und einer rückseitigen Glas- oder Kunststoffscheibe angebracht. Die Innenseiten der Scheiben werden mit einem Halbleitermaterial (beispielsweise Indiumzinkoxid) beschichtet. Anschließend wird an je einer Seite eine elektrische Gleichspannung angelegt. Unter mechanischem Druck (Berührung) werden die beiden Schichten verbunden und der Stromkreis geschlossen. Die Position des Druckpunkts kann über das Spannungsteilerprinzip nach x- und y-Richtung aufgelöst werden [SCHÖ08].

c) Optisch: Basierend auf der gleichen Technologie existieren hier unterschiedliche Ansätze, die aber alle auf der Verwendung von Infrarotlicht basieren. Dieses wird entweder seitlich durch eine Glasscheibe gelenkt (Frustrated Total Internal Reflection (FTIR)) oder von hinten auf die Glasscheibe projiziert (Diffused Illumination (DI)).



◘ **Bild 11.86** Touchbasierte HMI-Bedienung für die Prozessüberwachung. Quelle: SIEMENS

Im ersten Fall wird das Licht innerhalb der Scheibe durch Auflegen eines Fingers gebrochen und führt zu einer Streuung im Berührpunkt. Im zweiten Fall wird das Licht direkt vom Finger reflektiert. In beiden Fällen wird eine von hinten auf das Glas gerichtete Infrarotkamera verwendet, um über die Reflektion der Infrarotstrahlen die Position im Kamerabild zu ermitteln [SCHÖ08]. Eine weitere Variante lässt sich in Form eines zweidimensionalen Infrarot-Lichtvorhangs realisieren. Beliebige, nicht transparente Objekte unterbrechen die Infrarotstrahlen in zwei Richtungen und liefern dadurch die x/y-Koordinaten des Touchpunktes [SPAT09].

d) Akustisch: Auch bei den akustisch-basierten Touchtechnologien existieren mehrere Varianten.
Beim **Oberflächenwellen-Verfahren** (engl. Surface Acoustic Wave (SAW)) werden über Signalgeber aktiv horizontal und vertikal Ultraschallwellen in eine Glasscheibe eingebracht und sensorisch am gegenüberliegenden Ende erfasst. Durch Auflegen des Fingers oder eines anderen schwingungsdämpfenden Mediums wird die Amplitude der Wellen verändert. Die dadurch hervorgerufene energetische Änderung wird durch die Sensoren gemessen und zur Positionsermittlung verwendet.
Das **Biegewellen-Verfahren** (engl. Dispersive Signal Technology (DST)) kommt, im Gegensatz zur SAW-Technologie, ohne aktive Signalquelle aus. Mittels am Bildschirmrand installierter Piezo-Sensoren werden Schwingungen detektiert, die bei der Berührung des Touchscreens erzeugt werden. Über Laufzeitunterschiede der Signale kann die Position des Berührpunktes errechnet werden. Zur Auswertung der Signalverläufe müssen spezielle Algorithmen angewendet werden, die anwendungsfall-spezifische Einflussfaktoren wie Glasdisperionseffekte und Störeinflüsse wie Reflektionen berücksichtigen bzw. herausfiltern.
Eine weitere Möglichkeit, Biegewellen auszuwerten, ist die **akustische Pulserkennung** (Acoustic Pulse Recognition (APR)) [NORT06]. Ähnlich wie bei der DST wird eine Bildschirm-Berührung durch Piezo-Detektoren erfasst, jedoch wird bewusst auf eine aufwendige Bereinigung und Laufzeitauswertung des Signals verzichtet. Vielmehr wird der charakteristische Signalverlauf jedes einzelnen Bildschirmpunkts als eindeutiger akustischer Fingerabdruck aufgefasst und im Controller gespeichert. Das auf diese Weise erstellte, für jeden Berührpunkt einzigartige Akustikprofil wird zur eindeutigen Lagebestimmung verwendet.

Weiterführende Informationen zum Aufbau und der Funktionsweise der verfügbaren Touchtechnologien können unter anderem [SCHÖ08; NORT06] und [SPAT09] entnommen werden.

Allen Touchtechnologien ist der Nachteil des fehlenden taktilen Feedbacks aufgrund der planen Touchoberfläche gemein. Im Gegensatz zu mechanischen Bedienelementen erfährt der Bediener kein haptisches Feedback auf seine Eingaben, was zu Eingabefehlern und einer mangelnden Benutzerzufriedenheit führen kann. Optisches und akustisches Feedback ist im Zusammenspiel mit softwarebasierten Benutzeroberflächen leicht zu generieren, jedoch im Kontext einer Blindbedienung der Maschine im Hallenbereich nur schwer oder gar nicht für den menschlichen Benutzer wahrnehmbar. Aus diesem Grund wird auch an Feedbackmechanismen für touchbasierte Benutzereingaben geforscht. In den meisten Fällen basieren die vorhandenen Lösungen auf Mikroaktuatoren, die amplituden- und frequenzmodulierte Schwingungssignale in die Touchoberfläche einbringen, um somit auch bei Blindbedienung einer Produktionsmaschine dem Bediener eine Rückmeldung über eine erfolgte Eingabe oder eventuelle Fehlerzustände zu vermitteln [BREC12a].

11.5.2.4 Entwicklungstendenzen

Eine Betrachtung der Entwicklungen im Bereich moderner Produktionsstätten zeigt, dass die Kleinserien- und Einzelfertigung im Verhältnis zur Großserienproduktion an Bedeutung zugenommen hat. Voraussetzung für eine effiziente Fertigung ist jedoch, dass für das qualifizierte Bedienpersonal geeignete Interaktionsformen an den Fertigungseinrichtungen zur Verfügung stehen. Diese Forderung umfasst dabei alle Tätigkeitsbereiche des Facharbeiters an der Werkzeugmaschine, ausgehend von der NC-Programmierung bis hin zur manuellen Prozessführung.

Der beschriebene Trend wird derzeit in der Werkzeugmaschinenbaubranche unmittelbar berücksichtigt. Beispielsweise werden von zahlreichen Herstellern – zumeist für den Fertigungsbereich „Drehen“ – Werkzeugmaschinen angeboten, die über eine optimierte Mensch-Maschine-Schnittstelle neue Formen der benutzerspezifischen Eingabe ermöglichen (vgl. ► Kap. 11.5.2.3). Hier spielen insbesondere die beschriebenen technischen Komponenten und Technologien hinsichtlich der manuellen Prozessführung und grundlegenden HMI-Bedienung eine entscheidende Rolle.

Neue Möglichkeiten für eine direkte Mensch-Maschine-Interaktion ergeben sich durch die Verwendung von Sprach-ein- und -ausgabe [HOYM05]. Für einen definierten Funktionsumfang lassen sich zu bestimmten Teilen handlungsorientierte Eingabeoperationen an dem Tastenfeld der NC durch einen direkten verbalen Wortschatz abbilden. Hiervon ausgenommen sind sicherheitstechnische Funktionen (z. B. Not-Aus), deren Wirkung unabhängig von der jeweiligen Erkennungsrate immer gewährleistet sein muss. Versuchsreihen unter Einsatz dieser Technik haben gezeigt, dass die Transformation hin zu anderen Eingabemodalitäten insbesondere dann von Bedeutung ist, wenn sich Tätigkeiten des Facharbeiters am Bedienfeld der Steuerung durch eine verbale Eingabe effizienter, d. h. einfacher und schneller, gestalten lassen. In diesem Zusammenhang ist der Zugriff auf ver-

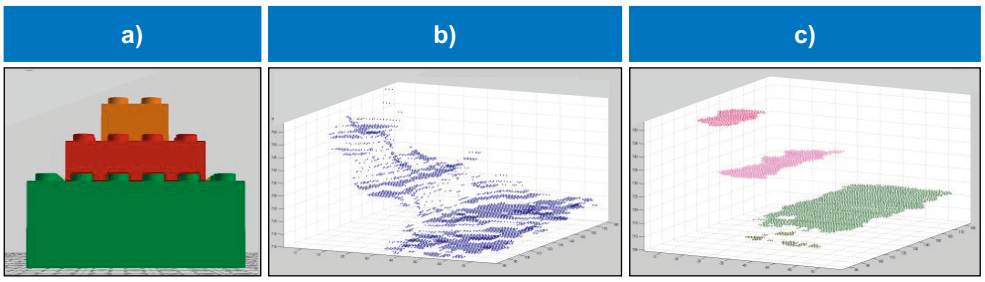


Bild 11.87 Tiefenkamera-gestützte Objekterkennung. Nach [BREC12b]

schiedene Steuerungs- bzw. Maschinenfunktionen, wie beispielsweise

- das Betätigen von Schaltern und Tastern für maschinenspezifische Zusatzeinrichtungen (Werkzeugwechsel, Palettenzuführung usw.),
- die direkte Anwahl von Informationsdarstellungen aus dem Menübaum der NC,
- die Eingabe von Zahlen zur Programmierung

möglich.

Smartphones und die mit ihnen verbundene sprunghafte Weiterentwicklung der Multitouch-Technologie hat die Akzeptanz derartiger Schnittstellen deutlich gesteigert. Während bei dualem Multitouch nur eine Zwei-Punkt-Erkennung gegeben ist, ermöglicht True-Multitouch die Erkennung nahezu beliebig vieler Touchpunkte für touchgestützte Mehrpersonen-Anwendungen. Auch in der Produktionstechnik sind bereits erste Geräte mit (dual) Multitouch-Unterstützung für einfache Bedienen-und-Beobachten-Aufgaben verfügbar. Die unterstützten Bediengesten beschränken sich im Wesentlichen auf die aus dem Mobilfunk bekannten Eingabemuster (Zoomen von Bildern und Wischen/Blättern bildhafter Darstellungen) und sind in der Regel auf zwei Finger beschränkt.

Die Raumgestenerkennung geht noch einen Schritt weiter und erweitert die Gestenerkennung auf die dritte räumliche Dimension. Kameragestützte Systeme, wie beispielsweise die Microsoft Kinect®, erzeugen zur Laufzeit neben reinen 2D-Bildinfomrationen auch 3D-Raumdaten, um so den Arbeitsraum und darin befindliche Objekte nachzuverfolgen. Gegenwärtig laufen Forschungsaktivitäten zur Validierung automatisierter Montageprozesse. Hier werden in mehreren Schritten Bildmerkmale extrahiert, um eine Objekterkennung durchzuführen. Bild 11.87 veranschaulicht diesen Vorgang. Ein Referenzobjekt wird optisch in einem Kamerabild erfasst (a). Aus einer Punktwolke (b), die eine grobe Annäherung der räumlichen Geometrie wiedergibt, lassen sich über Filteralgorithmen die genauen Dimensionen oder einzelne Merkmale extrahieren (c).

Künftig könnten derartige Systeme verwendet werden, um über räumliche Gesten Produktionsanlagen zu steuern. Forschungsschwerpunkte bilden hier neben den eigentlichen bildgebenden hardwareseitigen Verfahren die Bedienkonzepte, über die ein Benutzer intuitiven Zugang zum Maschinen-HMI erfährt. Ein besonderer Fokus liegt in diesem Zusammenhang auch auf der Eingabesicherheit. Fehleingaben durch falsch interpretierte oder versehentlich durchgeführte Gesten des Bedieners und daraus resultierender Schaden an Mensch oder Maschine sind softwareseitig zu verhindern.

11.5.3 Benutzerorientierte Darstellung prozess- und systembezogener Kenngrößen

11.5.3.1 Ausgangssituation

Als Grundlage der in ▶ Kap. 11.5.2 beschriebenen manuellen Prozessführung sind vielfältige Informationen für den Benutzer erforderlich, die zum einen aus dem Bearbeitungsprozess heraus vermittelt werden müssen. Zum anderen können systemspezifische Informationen dazu beitragen, ein bearbeitungsabhängiges Optimum durch den manuellen Eingriff des Facharbeiters zu ermöglichen.

Aufgrund der Bauform moderner Produktionsmaschinen erweist sich die Prozessanalyse für den Benutzer als problematisch. Im Vergleich zur rein manuellen Steuerung und Bedienung der Maschinen werden Werkzeugmaschinen aus sicherheitstechnischen Gründen gekapselt betrieben, sodass die Wahrnehmung von Prozessänderungen erheblich eingeschränkt ist [WECK92]. Beim Einsatz von Großwerkzeugmaschinen ergibt sich für den Benutzer eine ähnliche Problematik aufgrund der räumlichen Distanz zur Bearbeitungsstelle. Diese Abkopplung des Bedienpersonals vom Fertigungsprozess wird an Werkzeugmaschinen noch dahingehend verstärkt, dass sich die Komplexität von Bearbeitungsprozessen im Laufe der Jahre zunehmend erhöht hat und Prozesse mit einer weitaus höheren Geschwindigkeit ablaufen.

Für den Bereich der benutzerorientierten Prozessüberwachung und -analyse sind zum einen zusätzliche technische Komponenten in Form von Sensoren an NC-Maschinen zu applizieren, die eine Unterstützung der menschlichen Informationsverarbeitung ermöglichen. Zum anderen kann durch eine Bereitstellung systemspezifischer Kenngrößen eine verbesserte Darstellung des Prozessverlaufs erreicht werden.

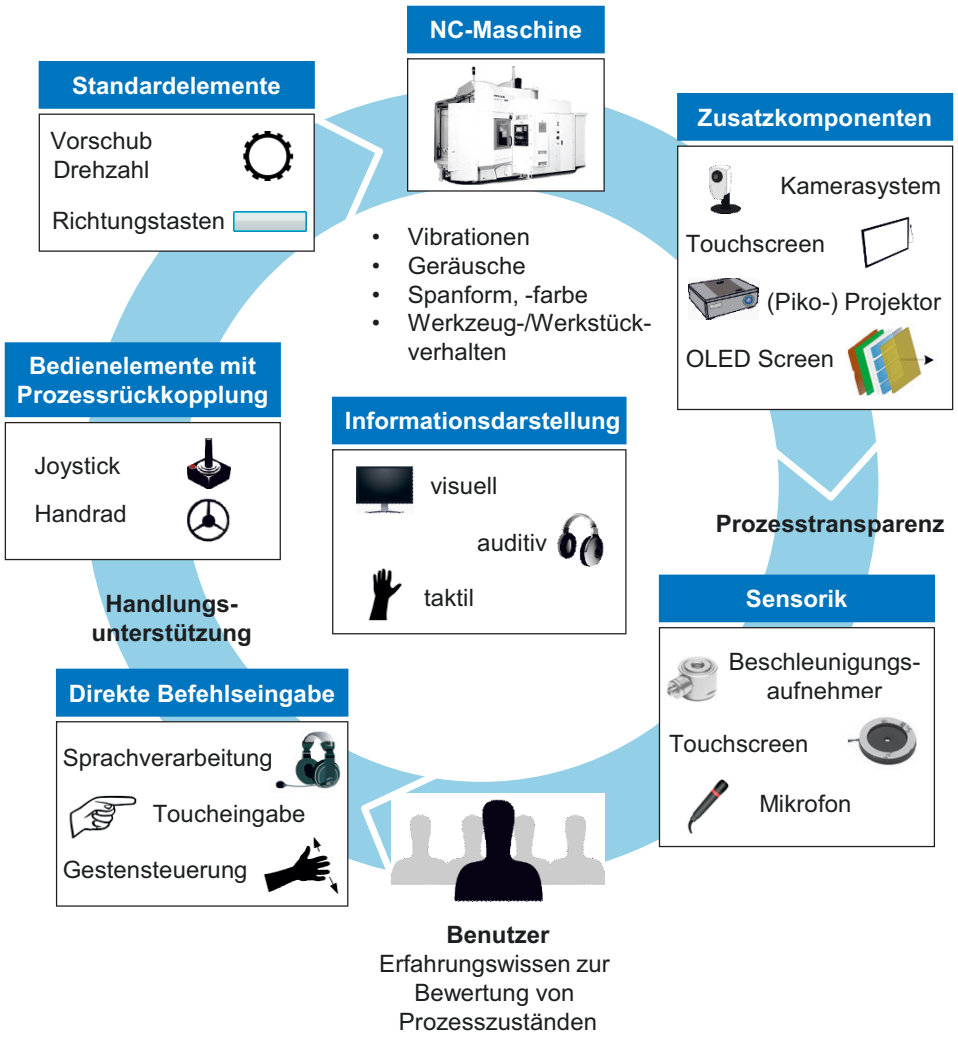


Bild 11.88 Prozessüberwachung und -regelung mit Hilfe des Benutzers

11.5.3.2 Benutzergerechte Vermittlung der Kenngrößen

Für eine Darstellung der prozessabhängigen Kenngrößen wird zumeist eine rein visuelle Abbildung der Informationen, beispielsweise auf dem Bildschirm des Steuerbedienfeldes, verwendet. Eine benutzergerechte Vermittlungsform bedeutet jedoch, dass die Prozessinformationen in einer dem Menschen angepassten Form für möglichst viele Wahrnehmungskanäle zur Verfügung gestellt werden. In diesem Zusammenhang spielt der Begriff der ganzheitlich sinnlichen Wahrnehmung eine entscheidende Rolle. Bild 11.88 gibt auf der einen Seite einen Überblick darüber, welche charakteristischen Prozessgrößen dem Benutzer für eine Zustandsbewertung zur Verfügung stehen bzw. wie diese Signale messtechnisch erfasst werden können. Auf der anderen Seite ist gezeigt, welche Darstellungsformen für die unterschiedlichen Informationen gewählt werden können, um eine verbesserte Prozessanalyse zu gewährleisten.

In Anlehnung an die automatisierte Prozessüberwachung können für die Erfassung der Nutzsignale zum Teil Sensoren eingesetzt werden, die in ▶ Kap. 6.4 detailliert beschrieben werden. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Erfassung akustischer und taktiler Prozessinformationen, wo beispielsweise Beschleunigungsaufnehmer und Piezoelemente zum Einsatz kommen. Im Hinblick auf die Auswertung wird hier auf eine automatische Signalklassifikation verzichtet. An diese Stelle tritt bei der facharbeiterorientierten Prozessüberwachung eine geeignete Vermittlung der jeweiligen Informationen für den Benutzer. Er ist dann in der Lage, eine anschließende Bewertung vorzunehmen. Gegenüber den technisch vermittelten Prozesskenngrößen auf der Basis von Sensoren werden auch Zusatzkomponenten für Werkzeugmaschinen eingesetzt, deren Verwendung eine Sichtverbesserung zur visuellen Prozessbeobachtung des Benutzers zum Ziel hat. Ein Beispiel für diese Applikationen bildet das im Bild 11.88 erwähnte integrierte Kamerasystem. Über die Einbeziehung der in ▶ Kap. 6.4 beschriebenen Bedienelemente als handlungsunterstützende Einrichtungen für die manuelle Prozessführung an Werkzeugmaschinen wird letztlich der Prozessregelkreis durch den Benutzer geschlossen.

Durch die jüngsten technologischen Fortschritte rücken zusätzliche Möglichkeiten intuitiver, benutzerzentrierter Visualisierungen in den Mittelpunkt. Die zunehmende Miniaturisierung der Hardware hat im Markt der Projektoren ein neues Segment erschlossen: sogenannte Pikoprojektoren. Diese Geräte verfügen über sehr geringe Ausmaße und lassen sich in mobilen Endgeräten montieren. In Kombination mit einer initialen Projektion von Streifenmustern lassen sich Oberflächenverzerrungen und Kontrastunterschiede ausgleichen. Zusätzlich werden OLED Bildschirme (Organic Light Emitting Diode) durch Produktserien in großer Stückzahl erstmals wirtschaftlich einsetzbar. Durch diese Technologien können bislang ungenutzte Flächen zur Laufzeit als Visualisierungs- und Interaktionsfläche verwendet werden, womit neue Forschungsfelder für die Mensch-Maschine-Interaktion in der Produktionstechnik erschlossen werden.

11.5.3.3 Technische Realisierung und Anwendungsbeispiele

In ► Kap. 11.5.2 wird bereits gezeigt, wie durch den Einsatz eines kraftrückgekoppelten Bedienelementes zur Prozessführung im manuellen Betrieb die Prozesstransparenz hinsichtlich einer taktilen Rückmeldung gesteigert werden kann. Ergänzend hierzu sollen sowohl für den optischen als auch für den akustischen Bereich anhand ausgewählter technischer Realisierungen weiterführende Möglichkeiten für die Prozessbeobachtung erläutert werden.

Ein Anwendungsbeispiel befasst sich mit der Nutzung von Augmented Reality für die Prozessbeobachtung. Augmented Reality (AR) bedeutet, dass einem Betrachter virtuelle Objekte angezeigt werden, die in seine reale Umgebung eingebettet oder dieser überlagert sind [AZUM97]. Hierzu werden die virtuellen Objekte meist auf einem Head Worn Display (HWD), einem am Kopf getragenen Bildschirm mit Durchsichteigenschaft, dargestellt. So ist die gleichzeitige Betrachtung von realer Welt und virtuellen Objekten möglich. Aktuelle Forschungstätigkeiten beschäftigen sich mit der Frage, wie in das Umfeld einer Werkzeugmaschine sinnvoll virtuelle Informationen eingebettet werden können. Da die anzuzeigenden Maschineninformationen stets situationsabhängig sind, wird der Bearbeitungsprozess in Szenarien eingeteilt. Das höchste Unterstützungspotenzial für den Benutzer wird dabei in den im Folgenden beschriebenen Szenarien Einrichten, Einfahren (inklusive Beobachtung des laufenden Prozesses) und Störungsmanagement gesehen.

Beim Einrichten von Werkstücken mit komplexer Geometrie ist häufig auch der Aufbau der Aufspannvorrichtungen von hoher Komplexität. Mit Hilfe von AR-Techniken sollen deshalb die im Produktionsauftrag vorgegebenen Spannvorrichtungen als virtuelle Darstellung über das real zu spannende Werkstück überlagert werden. Auf diese Weise wird dem Facharbeiter ein gutes Hilfsmittel an die Hand gegeben, die Spannvorrichtung schneller und einfacher anzubringen, als dies mit einem textuell beschriebenen Aufbau möglich wäre.

Beim Einfahren eines Programms ist die visuelle Prozessüberwachung und -beobachtung besonders wichtig, da hier sicherheitskritische Parameter auf ihre Korrektheit überprüft werden. Die Sichtverhältnisse während der Bearbeitung sind jedoch durch Späneflug und Kühlmittelverwirbelungen so stark eingeschränkt, dass eine Beurteilung des Prozesszustandes generell schwierig ist. Bei der Simulation des Bearbeitungsprozesses im HWD können diese Probleme mit

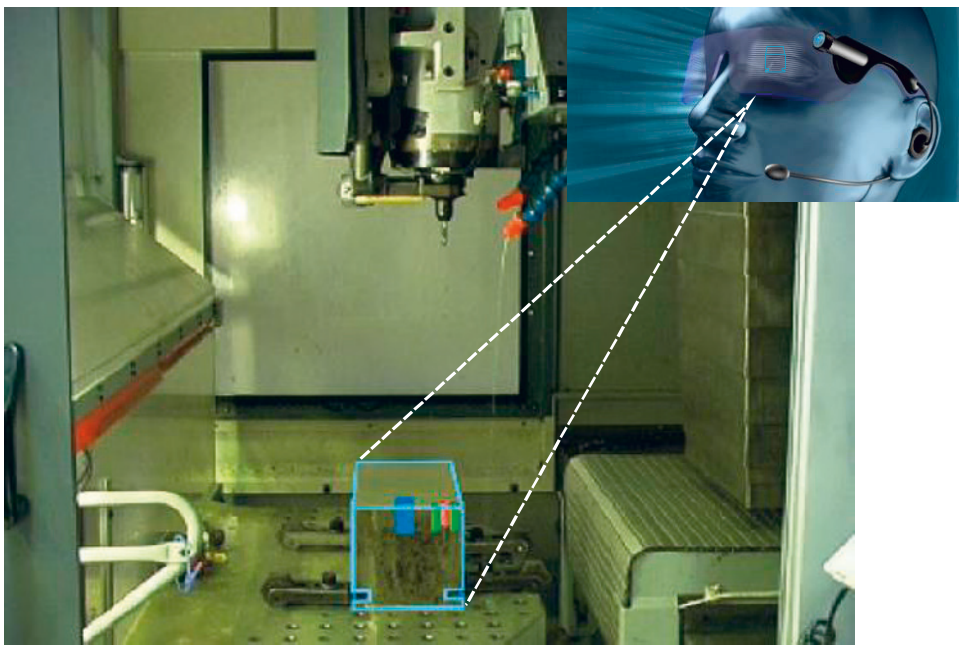


Bild 11.89 Augmented Reality zur visuellen Prozessüberwachung

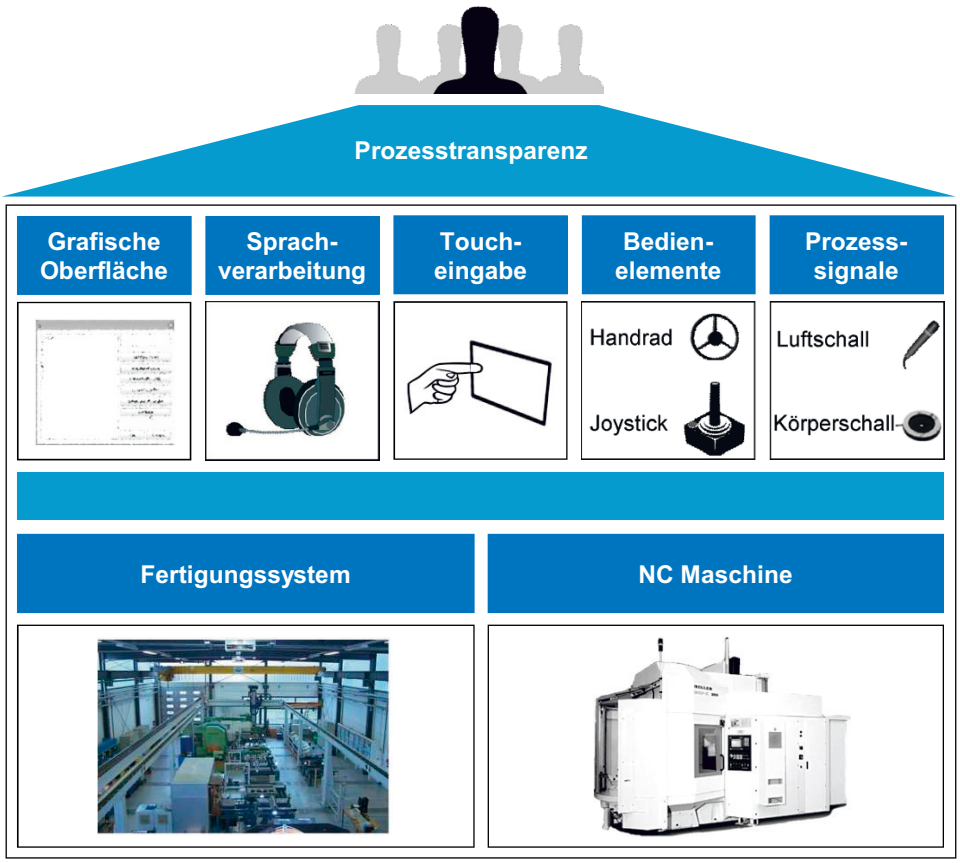


Bild 11.90 Gestaltungsvarianten für Mensch-Maschine-Schnittstellen

Hilfe von Augmented Reality überwunden werden. Dazu werden dem Werker die aktuelle Werkzeugbewegung, die zu bearbeitenden Features, wie z. B. Nuten oder Bohrungen, und einige wesentliche Bezugskanten des Werkstücks in den ablaufenden Produktionsprozess eingeblendet. Bild 11.89 verdeutlicht dieses Szenario.

Das Störungsmanagement an Werkzeugmaschinen wird besonders effektiv durch mobile Maschinenbediensysteme unterstützt. Zum Beispiel kann Augmented Reality genutzt werden, um Fehlermeldungen in das Sichtfeld des Werkers einzublenden. Eine Optimierung dieser Darstellungsmethode ist aus verschiedenen Gründen wünschenswert: Die bisherige Fehler- und Diagnoseunterstützung findet ihre Grenzen in der oftmals unzulänglichen textuellen Beschreibung von Situationen und Informationen. Hier vereinfacht eine AR-Darstellung von Bildern, Symbolen oder Markierungen (z. B. als virtueller Kreis um einen realen Schalter) die Arbeitsabläufe wesentlich. Durch die Integration von Bauteilbezeichnungen und Montagehinweisen kann die Störungsdiagnose wesentlich effizienter gestaltet werden. Zum Beispiel können (virtuell) animierte Reparaturanleitungen, die einem defekten Maschinenteil optisch überlagert werden, dazu beitragen, Reparaturzeiten zu verkürzen und dadurch Kosten zu senken [PLAP99].

Technisch ist für eine Überlagerung der virtuellen Informationen mit den realen Komponenten der Werkzeugmaschine eine exakte Erfassung der Werkerposition notwendig. Hierzu werden sogenannte „Head-Tracker“ eingesetzt. Diese erfassen die Kopfposition oder Blickrichtung des Benutzers. Die Tracking-Methoden können auf den unterschiedlichsten physikalischen Wirkprinzipien basieren. Sehr verbreitet sind magnetische, optische, Inertial- und Ultraschall-Tracker. Die größten Genauigkeiten ergeben allerdings hybride Tracking-Verfahren, die die Vorteile der genannten Verfahren kombinieren. Wenig geeignet für den Einsatz an Werkzeugmaschinen sind die verbreiteten magnetischen Verfahren, da die hohe Präsenz von Metall in der Maschinenumgebung die erreichbaren Genauigkeiten wesentlich verringert.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass für die Darstellung der Prozessinformationen aus technischer Sicht sehr viele Möglichkeiten existieren, eine Informationstransformation auf die jeweiligen Wahrnehmungskanäle des Benutzers durchzuführen. Für eine gezielte Bereitstellung der Prozessinformation ist daher für jeden Anwendungsfall zu prüfen, welche Darstellungsform die günstigste Benutzerunterstützung, bezogen auf den spezifischen Aufgabenbereich, bietet. In Bild 11.90 ist ein Überblick über angepasste Techniklösungen für Mensch-Maschine-Schnittstellen dargestellt. Die Realisierungen basieren hierbei auf Anforderungen, die sich aus den verschiedenen Bereichen rechnergestützter Schnittstellen ergeben. Zum einen erweisen sich grafisch-interaktive ggf. touchbasierte Benutzungsoberflächen in Kombination mit Spracheingabe für

die Steuerung komplexer Fertigungssysteme und Werkzeugmaschinen als geeignet, Bild 11.90, links.

Zum anderen ist es sinnvoll, kombinierte Ein-/Ausgabeelemente für den Arbeitsplatz an der Werkzeugmaschine zu nutzen. Ferner soll unter dem Begriff der Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht allein die Aufbereitung und visuelle Darstellung von Informationen verstanden werden. Die Gestaltung möglicher Interaktionsformen muss in einem ersten Schritt die systematische Analyse des benutzerspezifischen Arbeitsumfeldes beinhalten. Erst unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen lassen sich geeignete, technische Konzepte erstellen, die die Grundlage adäquater Techniklösungen bilden.

Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AC	engl. Axes Control
AP	Anwendungsprotokoll
API	engl. Application Programmers Interface
APR	engl. Acoustic Pulse Recognition
APT	engl. Automatically Programmed Tools
AR	engl. Augmented Reallity
ASIC	engl. Appplication Specific Integrated Circuit
BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	engl. Computer Aided Design
CAQ	engl. Computer Aided Quality
CAM	engl. Computer Aided Modelling
CAP	engl. Computer Aided Planning
CCD	engl. Charge Coupled Device
CLDATA	engl. Cutter Location Data
COM	engl. Component Object Model
CNC	engl. Computerised Numerical Control
CPU	engl. Central Processing Unit
DDE	enlg. Dynamic Data Exchange
DI	engl. Diffused Illumination
DNC	engl. Distributed Numerical Control
DST	engl. Dispersive Signal Technology
DWG-Format	engl. Drawing
DXF	engl. Data Exchange Format
FFS	Flexible Fertigungssysteme
FFZ	Flexible Fertigungszelle
FTIR	engl. Frustrated Total Internal Reflection
HAC	engl. Human Axis Control
HMC	engl. Human Machine Control
HMI	engl. Human Machine Interface
HWD	engl. Head Worn Display
IC-Technik	engl. Integrated Circuit
IGES	engl. Initial Graphics Exchange Specification
LC	engl. Logic Control
MC	engl. Motion Control
MDE	Maschinendatenerfassung
M.I.T.	Massachusetts Institute of Technology
MMC	engl. Man Machine Control
MMS	engl. Manufacturing Message Specification
NC	engl. Numerical Control
NCU	engl. Numerical Control Unit
OLED	engl. Organic Light Emitting Diode
OPC	engl. OLE for Process Control
PC	engl. Personal Computer
PCH	engl. Pallet Changer
PCI	engl. Peripheral Component Interconnect
Pkw	Personenkraftwagen
PLC	engl. Programmable Logic Controller
PPS	Produktplanungs- und Steuerungssystem
PSD	positionsunempfindliche Diode
RFID	engl. Radio Frequency Indetification
SAW	engl. Surface Acoustic Wave
SC	engl. Spindle Control
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STEP	engl. Standard for the Exchange of Product Model Data
T	engl. Tool
TC	engl. Tool Changer
TCP	engl. Tool Center Point
TDO	Technologie Daten Organisation
TFT-Farbdisplay	engl. Thin Film Transistor
VDAFS	Verein Deutscher Automobilhersteller Flächen Schnittstelle
WOP	Werkstattorientierte Programmierung
WSS	Werkstatt-Steuerungs-System

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	–	Startkonturpunkt
$P_1 \ldots P_6$	–	Konturpunkte
$P_k \ldots P_n$	–	Abtastpunkte
$ax_{j,k}$	–	Koeffizient des Trägerflächensegments
$ay_{j,k}$	–	Koeffizienten des Trägerflächensegments
$az_{j,k}$	–	Koeffizient des Trägerflächensegments
$d_{n,j}$	m	Bahnabweichung in den Stützstellen
i_{ordu}	–	Polynomordnung des Flächensegments in u-Richtung
i_{ordv}	–	Polynomordnung des Flächensegments in v-Richtung
r_s	m	Scheidenradius

u	–	lokales Parameter des Flächensegments
v	–	lokales Parameter des Flächen segments
α	rad	Anstellwinkel
β	rad	Voreilwinkel
δx	m	Auslenkung des Messtasters

Literaturverzeichnis

[ANDE90] Anderl, R.; Castro, P.: CAD/CAM – Auf dem Weg zu einer branchenübergreifenden Integration. Berlin: Springer, 1990

[AZUM97] Azuma, R.: A survey of Augmented Reality. In: Presence 6, 1997, Nr. 4, S. 355–385

[BART99] Bartelt, V.: Konzeption und Entwicklung eines Systems zur Digitalisierung und anschließenden Bearbeitung unbekannter Freiformflächen. Dissertation RWTH Aachen, 1999

[BREC12a] Brecher, C.; Kolster, D.; Herfs, W.: Audio-Tactile Feedback Mechanisms for Multi-Touch HMI Panels of Production Engineering Systems. In: International Journal of Automation Technology, 2012, Nr. 3

[BREC12b] Brecher, C.; Breitbach, T.; Müller, S.; Mayer, M. P.; Odenthal, B.; Schlick, C. M.; Herfs, W.: 3D Assembly Group Analysis for Cognitive Automation. In: Journal of Robotics, 2012, Nr. 9, S. 1–18

[BROU00] Brouer, N.: NC-Steuerungskern mit Datenschnittstelle für eine Autonome Produktionszelle. Aachen: Shaker Verlag, 2000

[COSC93] COSCOM: CIM-Bausteine CAD-CAM-DNC. Ebersberg, 1993. Firmenschrift

[DIN74] Norm DIN 66215 (1974). Programmierung numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen. CLDATA. Allgemeiner Aufbau und Satztypen

[DIN81] Norm DIN 55003 Teil 3 (1981). Bildzeichen numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen

[DIN82] Norm DIN 24900 Teil 10 (1982). Bildzeichen für den Maschinenbau

[DIN83a] Norm DIN 30603 Teil 1 (1983). Graphische Symbole für Einrichtungen

[DIN83b] Norm DIN 66025 Teil 1 (1983). Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen

[DIN88] Norm DIN 66025 Teil 2 (1988). Industrielle Automation. Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Wegbedingungen und Zusatzfunktionen

[DIN96] Norm DIN ISO 2806 (1996). Industrielle Automatisierungssysteme – Numerische Steuerung von Maschinen – Begriffe

[EVER94] Eversheim, W.; Müller, G.; Katsy, B. R.: NC-Verfahrenskette. Berlin: Beuth, 1994

[FRAN91] Franz, D.: CAD/CAM-Basisbetrachtungen. Berlin, 1991. Firmenschrift, Siemens AG

[HAAS93] Haasis, S.; Zimmermann, R.: Effizienter Einsatz der CAD/NC-Kopplung. Ehningen: expert, 1993

[HARD13] Hardwick, M.; Zhao, Y. F.; Proctor, F. M.; Nassehi, A.; Xu, X.; Venkatesh, S.; Odendahl, D.; Xu, L.; Hedlind, M.; Lundgren, M.; Maggiano, L.; Loffredo, D.; Fritz, J.; Olsson, B.; Garrido, J.; Brail, A.: A roadmap for STEP-NC-enabled interoperable manufacturing. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 68. Jg., 2013, Nr. 5–8, S. 1023–1037

[HEKE92] Hekeler, M.: Werkstattorientierte Produktionsunterstützung. Esslingen, 1992. Firmenschrift, TRAUB AG

[HOYM05] Hoymann, H.: Entwicklung einer sprachlichen Benutzungsschnittstelle für Werkzeugmaschinen. Diss. RWTH Aachen, 2005

[INDR99] Indramat GmbH: Indramat MTC 200. Lohr, 1999. Firmenschrift

[ISO00] Norm ISO 14649-CD (2000). Data model for CNC controllers, commitee draft

[ISO89] Norm ISO/DIS 6132 (1989). Industrial automation systems – Numerical control of machines – Extended format and data structure

[KAMP70] Kamp, W.: NC-Maschinen, Fachwörter und Definitionen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1970

[KELL08] Keller, S.; Reuter, W.: CNCplus Production 5.0. Wuppertal, 2008. Firmenschrift

[KIEF99] Kief, H. B.: NC/CNC-Handbuch 2000. München: Hanser, 1999

[KLEI95] Klein, F.: NC-Steuerung für die 5-achsige Fräsbearbeitung auf der Basis von NURBS. Diss. RWTH Aachen, 1995

[KREB92] Krebser, G.: Betriebssystem für NC. Berlin: Springer, 1992

[KROM94] Kromberg, J.: Erfüllter Traum. In: NC-Fertigung, 1994, Nr. 2

[MILB89] Milberg, J.: NC-Werkzeugmaschinen und rechnerintegrierte Produktion. Vorlesungsumdruck, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre. TU München, 1989

[NN99] N. N.: Der weite Weg zur Werkstatt-CNC. In: maschine + werkzeug, 1999, Nr. 10, S. 136–143

[NORT06] North, K.; D'Souza, H.: Acoustic Pulse Recognition Enters Touch-Screen Market. In: Information Display. 12. Jg., 2006

[OSAC00] OSACA Association: OSACA Handbuch 2.0. Stuttgart, 2000

[OSAC97]: Style guide Werkzeugmaschinen. Ein Handbuch zur Gestaltung von Benutzungsoberflächen für Werkzeugmaschinen. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 1997

[PFEI93] Pfeiffer, H.-J.: Optimierung und Kontrolle von NC-Drehprogrammen durch Simulation. In: VDI-Z-Special CAD/CAM, 1993, Nr. 5, S. 6–18

[PFEI98] Pfeifer, T.: Fertigungsmesstechnik. München: Oldenbourg, 1998

[PLAP99] Plapper, V.; Wenk, C.; Weck, M.: Augmented Reality unterstützt den Teleservice. In: wt Werkstatttechnik 89. 6. Jg., 1999

[PRIT86] Pritschow, G.; Storr, A.; Gruhler, G.; Schuhmacher, H. (Hrsg.): Off-Line Programming System with Geometrical Data Recording by Manually Guided Industrial Robot. IFIP Working Conference on Off-Line-Programming of Industrial Robots. Amsterdam, 1986

[PROS17] PROSTEP AG: http://www.ProSTEP.de. [Stand: 2017]

[ROBE99] Robert Bosch GmbH: Bosch Typ 3 osa. Erbach, 1999. Firmenschrift

[SAUT87] Sauter, R.: Numerische Steuerungen im Werkzeugmaschinenbau – Funktionen, Programmierung und Betrieb. Würzburg: Vogel, 1987

[SCHÖ08] Schöning, J.; Brandl, P.; Daiber, F.; Echtler, F. H. O.; Hook, J.; Löchtefeld, M.; Motamedi, N.; Muller, L.; Olivier, P.; Roth, T.; Zadow, U.: Multi-Touch Surfaces : A Technical Guide. München, 2008. Technical Report TUM-10833

[SHAH72] Shah, R.: NC Guide. Zürich: NCA Verlag, 1972

[SIEM12] Siemens AG: Siemens Automation Webseite. URL: http://www.automation.siemens.com. [Stand: 25.09.2012]

[SIEM16] Siemens AG: Sinumerik 840 D. Katalog CA 01. Erlangen, 2016. Firmenschrift

[SIEM97] Siemens AG: User's Manual, SINUMERIK 840D, OEM-Package NCK. Erlangen, 1997

[SIEM99] Siemens AG A&D: Schneller von der Zeichnung zum Werkstück: Einfacher Fräsen mit ShopMill. Erlangen, 1999. Firmenschrift

[SIMO71] Simon, W.: Die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen. München: Hanser, 1971

[SOSO90] Sosonkin, V. L.: Mikroprozessorsysteme für CNC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen. Berlin: Verlag Technik, 1990

[SPAT09] Spath, D.; Weisbecker (Hrsg.), A.; Laufs, U.; Block, M.; Link, J.; Ardilio, A.; Schuller, A.; Bierkandt, J.: Multi-Touch: Technologie, Hard-/Software und deren Anwendungsszenarien. Stuttgart, 2009. Firmenschrift

[SPUR91] Spur, G.: Vom Wandel der industriellen Welt durch Werkzeugmaschinen: eine kulturgeschichtliche Betrachtung der Fertigungstechnik. München: Hanser, 1991

[SPUR93a] Spur, G.; Woijcik, L.: Flexibel vom CAD-Modell zum NC-Programm. In: ZwF, 1993, Nr. 2, S. 71–74

[SPUR93b] Spur, G.: Zusammenhang von Informationstechnik und Fertigungstechnik. In: FMS Flexible Manufacturing Systems; Past – Present – Future. 25th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Bled, 1993

[SPUR94] Spur, G.; Specht, D.; Schröder, S.: Die numerische Steuerung. In: Culture and technical innovation, 1994, S. 621–735

[TRAU92] TRAUB AG (Hrsg.): Drehen. (Reihe: CNC-Ausbildung für die betriebliche Praxis. Bd. 3). München: Hanser, 1992. Firmenschrift

[VDI90] VDI-Gemeinschaftsausschuß CIM; VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb (Hrsg.): Produktdatenverarbeitung. (Reihe: Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion. Bd. 2). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990

[WECK05] Weck, M.; Brecher, C.; Wisniowski, J.; Wolf, J.: Prozessgekoppelter Joystick zur Maschinenführung. In: wt – Werkstattstechnik online. 95. Jg., 2005, Nr. 5, S. 314–319

[WECK91] Weck, M.: Simulation in CIM. Köln: Verlag TüV Rheinland, 1991

[WECK92] Weck, M.; Mertens, R.; Schubert, I.: Sicherheit an Großmaschinen I und II. Aachen, 1992. VDW-Forschungsbericht

[WECK93] Weck, M.: Die offene Steuerung – Zentraler Baustein leistungsfähiger Produktionsanlagen. In: AWK'93: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993, S. 4

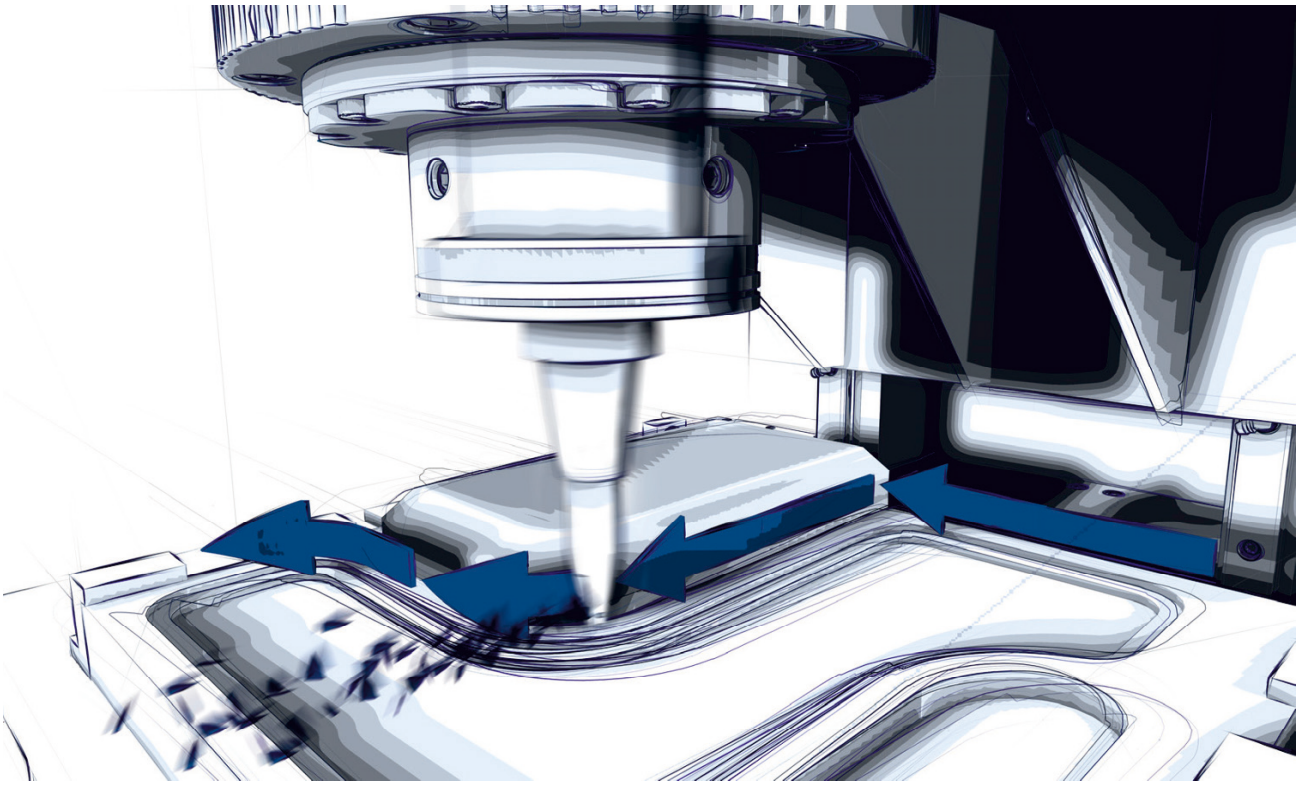
[WECK96] Weck, M.: „Wie offen hätten Sie's denn gern?" – Offene Systeme in der Fertigung. In: AWK '96: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996, S. 2

[WECK97] Weck, M., Brouër, N., und Daude, R.: Steuerung und Benutzungsschnittstelle einer Autonomen Produktionszelle. In: Weck, M.; Spur, G.; Pritschow, W. (Hrsg.) Zukunftsweisende Steuerungs- und Maschinenkonzepte für die Fertigung. (Reihe: 2). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997, S. 1–17

[WERK79] Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen: Handbuch des Informationszentrums für Schnittwerte (INFOS). Zerspanseminar. Eigendruck WZL/RWTH Aachen, 1979

[WOLL86] Wollenberg, R.: Geometriedatenerfassung bei räumlichen Modellen. In: tz für Metallbearbeitung, 1986, Nr. 80, S. 8

Kapitel 12



Führungsgrößenerzeugung und Interpolation

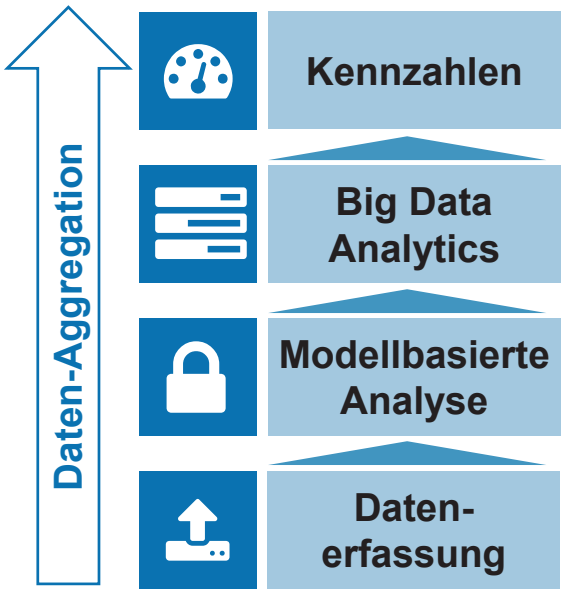
Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Dr.-Ing. Alexander Epple, Christian Fimmers M. Sc., Dipl.-Inform. Michael Königs und Marian Wiesch M. Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

www.wzl.rwth-aachen.de

Maschinendatenanalyse

im Kontext von Industrie 4.0





- **Prozessdatenerfassung an Produktionsanlagen**
- **IT-Infrastruktur: Horizontale und vertikale Vernetzung**
- **Modellbasierte Datenaufbereitung und -interpretation**
- **Fertigungsgerechte Big Data Analytics**

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Steinbachstr. 19
52074 Aachen
+49 241 80 27441
Maschinendatenanalyse@wzl.rwth-aachen.de

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Abteilung Maschinendatenanalyse

Führungsgrößenerzeugung und Interpolation



12.1 Interpolation – 515
12.1.1 Funktionen zur satzorientierten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen – 516
12.1.2 Funktionen zur satzübergreifenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen – 522
12.1.3 Interpolation einfacher Bahnen – 526
12.1.4 Spline-Interpolation – 528
12.1.5 Sonstige Verfahren – 538

12.2 Geometrische Transformationen – 538
12.2.1 Nullpunktverschiebungen – 538
12.2.2 Werkzeugkorrekturen – 539
12.2.3 Kinematische Transformation für die 5-Achs-Fräsbearbeitung – 540

12.3 Externe Lage- und Geschwindigkeitsbeeinflussung – 545
12.3.1 Kompensation geometrischer Fehler – 545
12.3.2 Vorschub-Override und externe Geschwindigkeitsbeeinflussung – 554
12.3.3 Referenzpunktfahrt – 555

Abkürzungsverzeichnis – 556

Formelzeichenverzeichnis – 556

Literaturverzeichnis – 558

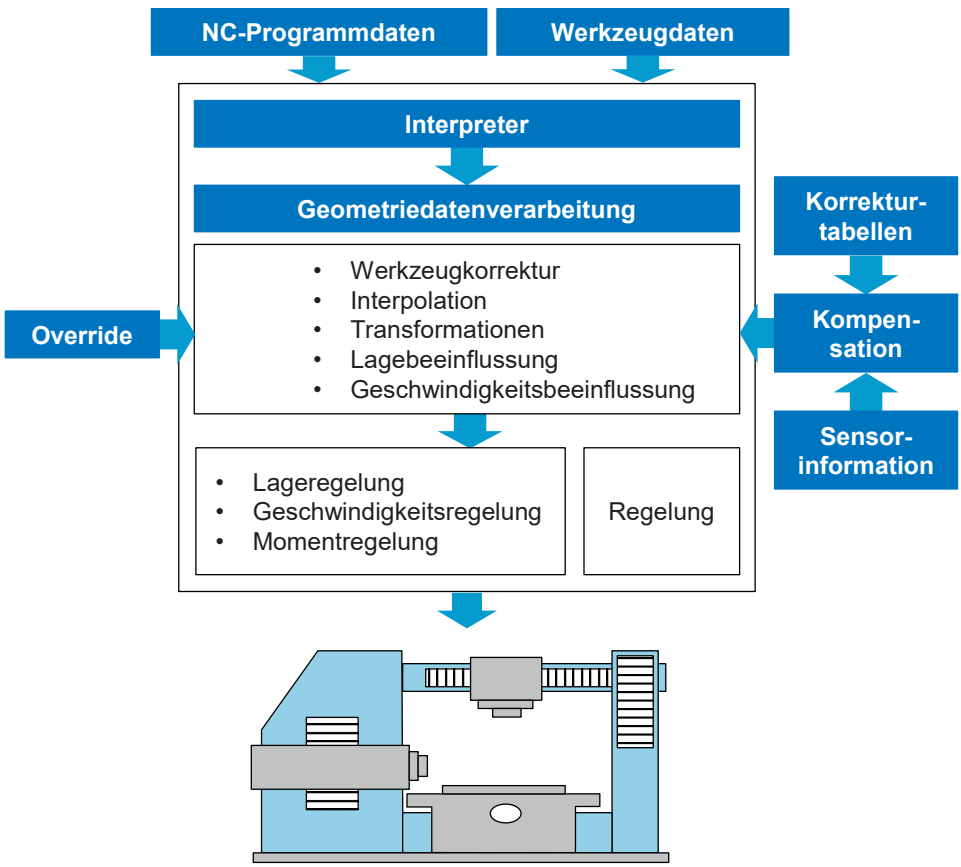
© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_12

Der Verarbeitung geometrischer Daten kommt in einer NC-Steuerung eine Schlüsselrolle zu, da durch sie die in Form von NC-Programmen vorgegebenen Verfahrinformationen in Bearbeitungsbewegungen umgesetzt werden. Diese Aufgabe schließt sowohl die Erzeugung einer den programmierten Daten entsprechenden Bahn als auch die Berücksichtigung von Korrekturen sowie Überwachungsfunktionen ein. Korrekturen und Überwachungsfunktionen müssen online durchgeführt werden; eine Offline-Vorberechnung ist ausgeschlossen.

Heutige NC-Steuerungen sind prinzipiell als digitale Rechner realisiert. Das bedeutet auch, dass der gesamte Funktionsumfang in Form von Software erstellt und implementiert wird. Hardware-Lösungen für Interpreter oder Interpolatoren gehören der Vergangenheit an. Die Steuerungssoftware wird vom Hersteller mit Hilfe von Hochsprachen erstellt, welche die früher übliche maschinennahe Programmierung in Assembler abgelöst haben. Die Gründe hierfür liegen u. a. darin, dass frühere Restriktionen durch die begrenzte Leistungsfähigkeit der Prozessoren entfallen sind. Auch machen sich die Hersteller die Vorteile höherer Programmiersprachen, wie erheblich kürzere Entwicklungszeiten, Unabhängigkeit von der verwendeten Rechnerbasis sowie leichtere Wart-, Erweiter- und Wiederverwendbarkeit der Funktionalitäten zunutze.

Die Darstellung der zu verarbeitenden Größen kann alternativ in Ganzzahlarithmetik oder in Fließkommadarstellung erfolgen. In der Vergangenheit kam ausschließlich die Ganzzahlarithmetik zum Einsatz, da numerische Coprozessoren, die eine schnelle Berechnung auf der Basis von Fließkommazahlen ermöglichen, nicht verfügbar waren oder mit zu hohen Kosten einhergingen. Dies hat sich grundlegend geändert, sodass in heutigen NC-Steuerungen eine schnelle Geometriedatenverarbeitung auf der Basis der Fließkommadarstellung erfolgt.

Die Bedeutung des Funktionsblockes Geometriedatenverarbeitung innerhalb der gesamten NC-Steuerung wird im ◘ Bild 12.1 verdeutlicht. Als Eingabe dienen NC-Programmdaten, die in der Regel gemäß DIN 66025 vorliegen [DIN83] (vgl. ▶ Kap. 11), sowie Werkzeugdaten und Korrekturwerte. Die Programmdaten werden durch den Interpreter im Allgemeinen satzweise in ein steuerungsinternes Datenformat umgewandelt und an die Geometriedatenverarbeitung weitergegeben. Diese hat im Wesentlichen die im ◘ Bild 12.1 dargestellten Funktionen: Korrekturen der Bahn entsprechend der aktuellen Werkzeuggeometrie, Interpolation, Lage- und Geschwindigkeitsbeeinflussung sowie Transformation. Hierfür müssen sowohl Benutzereingaben als auch Korrekturwerte infolge der Werkzeuggeometrieabweichungen oder Lagesensorsignale online eingerechnet werden. Die Eingaben des Benutzers erfolgen über Stellelemente, wie z. B.



◘ **Bild 12.1** Stellung der Geometriedatenverarbeitung innerhalb der NC-Steuerung

Drehschalter, oder direkt über die Tastatur der Steuerungstafel. Dabei handelt es sich in erster Linie um vom Benutzer veränderbare Override-Werte für Vorschub und Spindeldrehzahl sowie Nullpunktverschiebungen.

Neben diesen vom Benutzer vorgegebenen Korrekturwerten werden im Funktionsblock der Geometriedatenverarbeitung die durch einen Funktionsblock Kompensationsberechnung ermittelten Stellgrößen additiv verrechnet. Mit Hilfe von Sensorsignalen kann sowohl die Kompensation mechanischer oder thermischer Verlagerungen (Bahnbeeinflussung), als auch die adaptive Regelung von Werkzeugbelastung und Maschinenleistung über die Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt werden.

Nach Abschluss der Korrekturberechnungen werden die ermittelten Sollwerte der Position an die Lageregelung weitergegeben. Diese hat gemeinsam mit der unterlagerten Geschwindigkeits- und Momentenregelung die Aufgabe, die Maschinenachsen so zu regeln, dass die Abweichungen von der Sollbahn trotz hoher Beschleunigungs- und Reibkräfte der Antriebsmechanik und sonstiger Störgrößen (Prozesskräfte, thermische Verlagerungen der Maschinenstruktur usw.) möglichst klein sind.

12.1 Interpolation

Die Interpolation im mathematischen Sinne ist als die Berechnung von Zwischenwerten einer durch Stützpunkte vorgegebenen Funktion nach festgelegten Rechenregeln definiert [MESC66]. Im Zusammenhang mit NC-Steuerungen wird jedoch üblicherweise unter dem Begriff der Interpolation diese Funktion gemeinsam mit der Erzeugung eines gewünschten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofils über der Bahn verstanden.

Die Aufgabe der Interpolation ist es also, zur Erzeugung des geforderten Bahn- und Geschwindigkeitsverlaufes die Soll-Lagewerte für die einzelnen Maschinenachsen so zu berechnen und diese zeitgerecht an die Achsen auszugeben, dass unter Berücksichtigung der örtlichen Bahngeschwindigkeit die vorgegebene Bahn entsteht. Durch das auf dieser Bahn geführte Werkzeug wird die gewünschte Werkstückkontur hergestellt. Die wesentlichen Forderungen, die an eine Interpolation gestellt werden, sind im Folgenden genannt:

- Die von der Interpolation erzeugten Formelemente (Geraden, Kreise, Splines usw.) sollen die gewünschte Werkstückkontur möglichst gut annähern.
- Die Bahngeschwindigkeit muss häufig aus technologischen Gründen in weiten Grenzen vorgebbar sein und unter Berücksichtigung der Beschleunigungsgrenzen der Vorschubantriebe unabhängig von der Konturform nahezu konstant eingehalten werden.
- Die numerisch vorgegebenen Endpunkte müssen vom Interpolator exakt erreicht werden, da sich sonst interpolationsbedingte Bahnfehler (z. B. Rundungsfehler) aufsummieren.
- Externe Korrekturen (z. B. Stellung des Overrides) müssen online verrechnet werden.
- Die Sollwerte der Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie eventuell des Rucks sind möglichst so zu berechnen bzw. zu begrenzen, dass sie von der realen Maschine tatsächlich erreicht werden können.

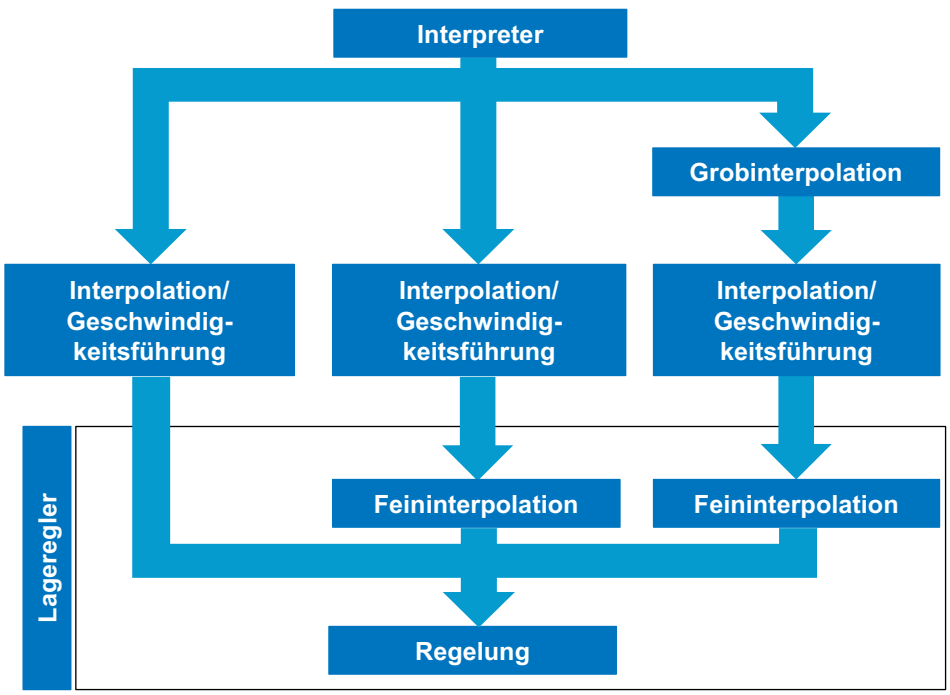


Bild 12.2 Alternative Strukturen der Interpolation

Die Geometrie sowie die Sollgeschwindigkeit der zu erzeugenden Bahn werden der NC-Steuerung durch die in den NC-Programmen enthaltenen Informationen übergeben. Die Programme werden heute üblicherweise in Anlehnung an DIN 66025 ausgeführt (vgl. ▶ Kap. 11.3) [DIN83]. Diese Norm beinhaltet als Geometrieelemente Geraden sowie Kreise und Parabeln in einer Ebene. Die daraus resultierenden Einschränkungen werden von den meisten Steuerungsherstellern durch eigene Erweiterungen der Standard-Programmierschnittstelle umgangen. Somit ist die Programmierung für unterschiedliche Steuerungen im Allgemeinen nicht einheitlich.

Die Interpolation kann aus bis zu drei einzelnen Modulen bestehen. Diese sind ein eventuell vorgelagerter Grobinterpolator, der eigentliche Interpolator sowie ein nachgeschalteter Feininterpolator. Letzterer ist bei den meisten Steuerungen Bestandteil der Lageregelung, ◘ Bild 12.2.

Der Grobinterpolator hat die Aufgabe, komplexe programmierte Geometrieelemente durch einfache Geometrien, wie z. B. Geraden oder Kreise, mit vorgegebener Genauigkeit anzunähern. Der Interpolator berechnet auf den ihm übergebenen Bahnen Zwischenpunkte so, dass durch das zeitrichtige Anfahren dieser Werte mit den einzelnen Achsen die gewünschte Bahn und Geschwindigkeit eingehalten wird. Er ist also neben der Interpolation im mathematischen Sinne zuständig für die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung. Der nachgelagerte Feininterpolator berechnet zwischen den durch den Interpolator erzeugten Achswerten eine festgelegte Anzahl von äquidistanten Zwischenwerten. Die meisten Steuerungen weisen zumindest den Interpolator und den Feininterpolator auf.

Die durch die Interpolation erzeugten Ausgabedaten sind Sollstellungen der Maschinenachsen und Sollzeitpunkt dieser Stellungen. Sie werden in der Regel als Absolutwerte an den Lageregler weitergegeben.

Im Weiteren wird zunächst die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung unabhängig von der zu Grunde liegenden Bahn beschrieben. Anschließend wird die Interpolation einfacher Bahnen erläutert. Dabei wird dargestellt, wie die Erzeugung dieser Bahnen mit der allgemeinen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung zusammenhängt.

12.1.1 Funktionen zur satzorientierten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen

Für die *Geschwindigkeitsführung* sind die physikalischen Größen Position bzw. *Weg s(t), Geschwindigkeit v(t)*, *Beschleunigung a(t)* sowie *Ruck r(t)* von zentraler Bedeutung. Dabei ergibt sich jede Größe in der genannten Reihenfolge durch Differenzieren nach der Zeit aus der jeweils vorherigen:

$$r(t) = \frac{da(t)}{dt} = \frac{d^2v(t)}{dt^2} = \frac{d^3s(t)}{dt^3} \tag{12.1}$$

Aus technologischer sowie wirtschaftlicher Sicht wäre in den meisten Fällen eine Bearbeitung mit der programmierten, konstanten Vorschubgeschwindigkeit ideal, da so die Oberfläche gleichmäßige Rauheitswerte erhielte und die Bearbeitungszeit minimal würde. Dies ist jedoch bei stark gekrümmten oder eckigen Bahnen wegen des begrenzten Beschleunigungsvermögens der Vorschubantriebe nicht immer möglich. Sprunghafte Richtungsänderungen, z. B. an Werkstückecken, würden bei endlicher konstanter Geschwindigkeit unendliche Beschleunigungen und Verzögerungen erfordern. Darum ist es die Aufgabe der Geschwindigkeitsführung, die Vorschubgeschwindigkeit für die betroffenen Bewegungsachsen so vorzugeben, dass die programmierte Kontur unter Berücksichtigung der endlichen Dynamik der Antriebe bestmöglich eingehalten wird. Auch dürfen die Antriebsmechanik der Maschine und die Motoren nicht überlastet werden. Für die Betrachtung der Dynamik sind somit die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aller Achsen zu berücksichtigen. Aus der vektoriellen Überlagerung der Einzelgrößen ergeben sich dann die Bahngeschwindigkeit bzw. -beschleunigung.

Unter Vernachlässigung der Stromanstiegszeit, die bei modernen Motoren in der Größenordnung von 1 bis 10 ms liegt, kann man in erster Näherung von einer *sprunghaften Beschleunigungsänderung* der Antriebe ausgehen, soweit diese unter der möglichen Grenzbeschleunigung liegen. Diese Modellvorstellung führt zu einer Bewegungsführung mit stetigem Verlauf der Geschwindigkeit und hat den Vorteil, dass relativ einfache Rechenalgorithmen Verwendung finden, die auch mit den zur Verfügung stehenden Prozessoren älterer Steuerungen verarbeitet werden können, ◘ Bild 12.3. Die entscheidenden Parameter, die hierzu in der Steuerung festgelegt werden müssen, sind die maximale Achsbeschleunigung, die auch gleichzeitig den größtmöglichen Achsbeschleunigungssprung repräsentiert, sowie die maximalen Achsgeschwindigkeiten.

Diese mit einem theoretisch unendlich großen Ruck arbeitende Geschwindigkeitsführung der Antriebe besitzt aber entscheidende Nachteile. Um die Belastung der mechanischen Antriebskomponenten durch sprunghafte Beschleunigungsänderungen in erlaubten Grenzen zu halten, kann der maximal mögliche Beschleunigungssprung der Antriebe nicht genutzt werden.

Moderne Prozessoren erlauben die Verarbeitung auch komplexerer Berechnungen. In neuen Steuerungen liegt daher zumeist das Modell einer *linearen oder höherwertigen Beschleunigungsänderung* zu Grunde. Dieses Verhalten vermeidet sowohl Geschwindigkeits- als auch Beschleunigungssprünge und weist einen endlichen Ruck auf, ◘ Bild 12.4.

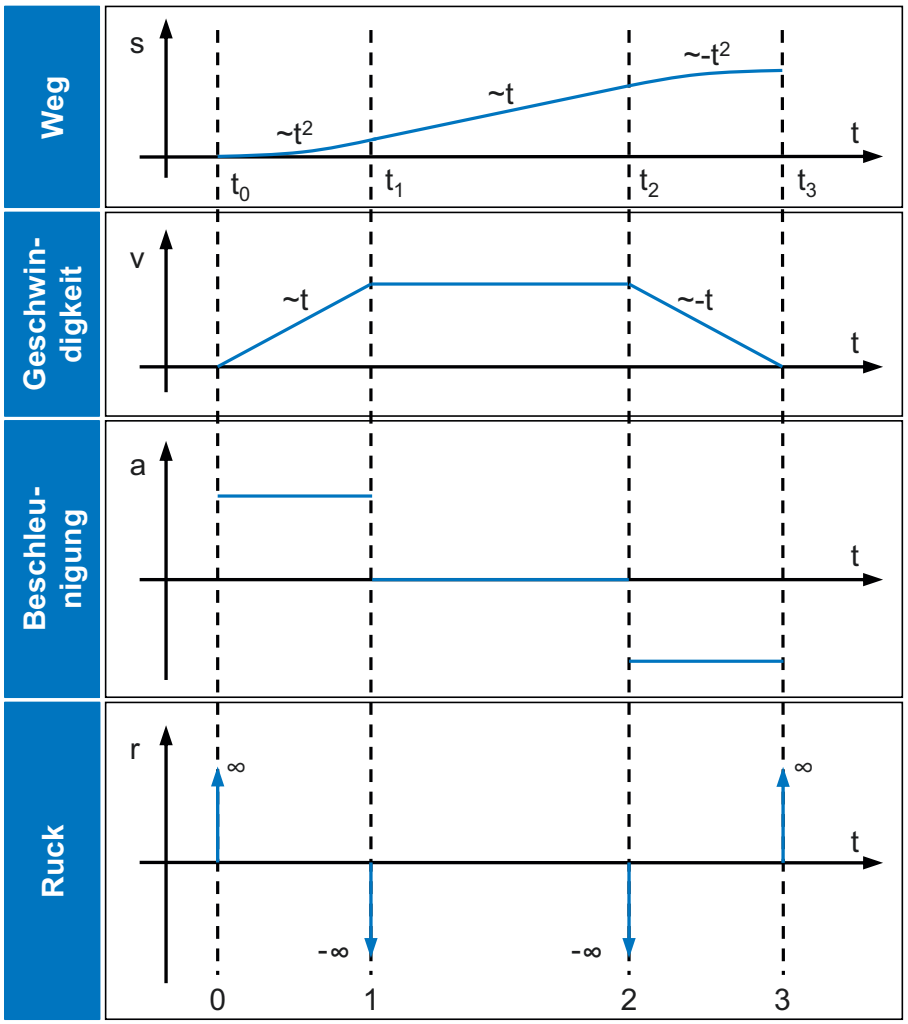


Bild 12.3 Geschwindigkeitsführung mit sprunghafter Beschleunigungsänderung (unendlicher Ruck)

Die bestimmenden Parameter für eine solche Steuerung sind die maximale Achsgeschwindigkeit, die maximale Achsbeschleunigung sowie die maximale zeitliche Änderung der Achsbeschleunigung, also der maximale Ruck. Diese Werte werden in der Steuerung fest vorgegeben und als sogenannte Maschinenparameter abgelegt.

Die Bewegung einer Maschine mit einer solchen Geschwindigkeitsführung erscheint ruhiger und sanfter. Der Zeitverlust durch die geringere Beschleunigungsänderung wird meistens durch das Fahren höherer Maximalbeschleunigungen mehr als nur aufgeholt.

Eine dritte, seltener eingesetzte Art der Geschwindigkeitsführung besteht in einer *Geschwindigkeitsführung mit Beschleunigungssprüngen und anschließender Tiefpassfilterung*. Das sich dabei ergebende Geschwindigkeitsprofil wird meistens als glockenförmig oder $\sin^2$-förmig bezeichnet.

Die Geschwindigkeitsführung kann in numerischen Steuerungen prinzipiell auf zwei Arten realisiert werden. In jedem Falle muss eine Diskretisierung der Stellgröße als Funktion des Weges oder der Zeit erfolgen. Die beiden Arten unterscheiden sich dadurch, dass die Ausgabe von Verfahrbewegungen entweder mit einem konstanten Wegraster oder mit konstantem Zeitraster durchgeführt wird. Konstantes Wegraster bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der je Ausgabe zu verfahrende Relativweg konstant ist, während bei konstantem Zeitraster der zwischen zwei Ausgaben liegende Zeitraum konstant sein muss, Bild 12.5.

In beiden Fällen dient der jeweils andere Parameter, also beim *Zeitrasterverfahren* der Weg und beim *Wegrasterverfahren* die Zeit, zur Modellierung des Geschwindigkeitsprofils. Die Verwendung des Wegrasterverfahrens ist z. B. im Bereich der Schrittmotorentechnik üblich. Die in der Praxis allerdings bei Weitem häufiger eingesetzte Variante ist die des Zeitrasterverfahrens. Darum soll im Weiteren auch ausschließlich diese Methode betrachtet werden. Geht man von einer zeitgetakteten Interpolation aus, so ist es die Aufgabe der Geschwindigkeitsführung, die Ausgabe von Sollpositionen für die einzelnen Achsen so zu steuern,

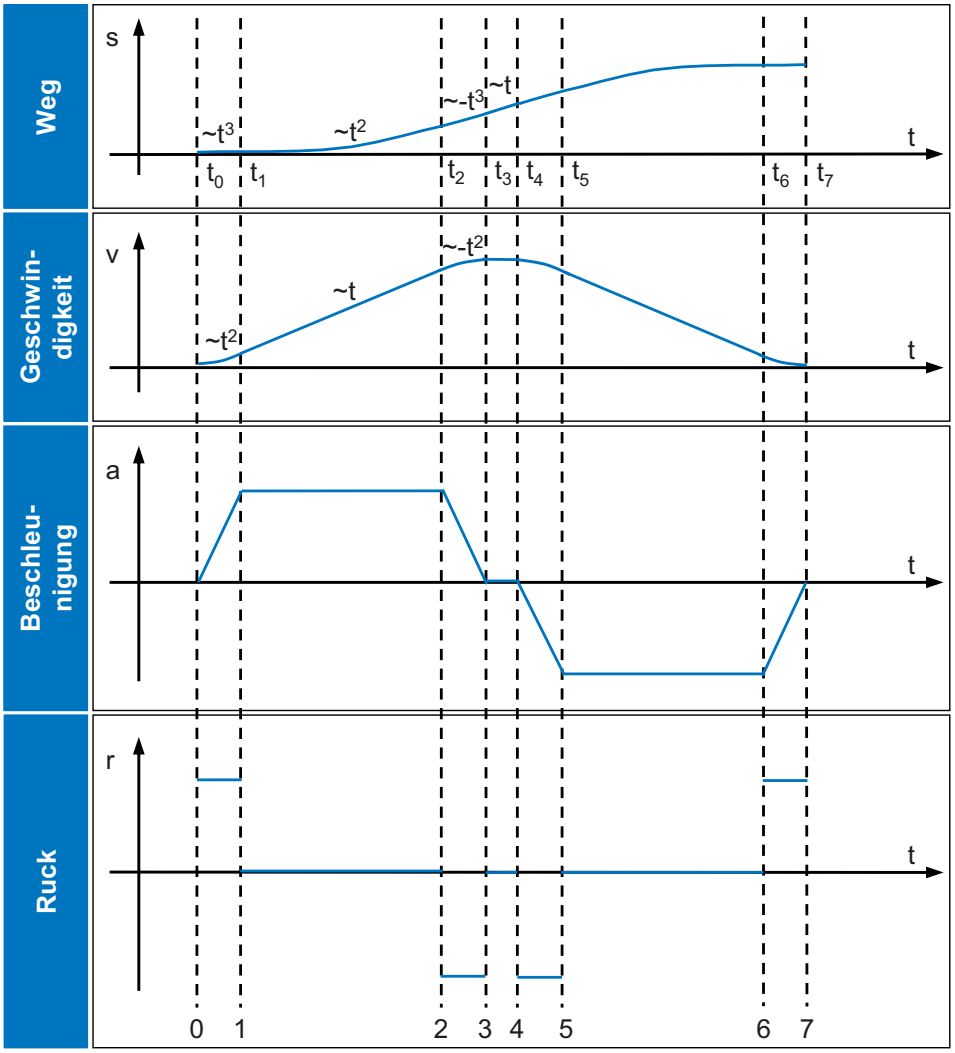


Bild 12.4 Geschwindigkeitsführung mit stetiger Beschleunigung (endlicher Ruck)

dass die je Zeittakt zu verfahrende Solldifferenz der Achsen das vorgegebene Bahn- und Geschwindigkeitsprofil modelliert.

Den für die Interpolation gültigen Zeittakt nennt man *Interpolationstakt*. Die gesamten Berechnungen für die Geschwindigkeitsführung sowie die mathematische Interpolation müssen innerhalb dieses Taktes beendet werden. Anderenfalls würde es zu Stillstand oder Rucken der Maschine kommen. Deshalb muss die Geschwindigkeitsführung die folgenden Teilaufgaben erfüllen:

- Erhöhung der Geschwindigkeit während der Beschleunigungsphase,
- Durchführung der Konstantgeschwindigkeitsphase,
- Verringerung der Geschwindigkeit während der Verzögerungsphase,
- Bremseinsatzpunkterkennung,
- Berücksichtigung des Vorschub-Overrides,
- vorausschauende Geschwindigkeitsführung

Zunächst wird davon ausgegangen, dass die Bahngeschwindigkeit zu Beginn und am Ende eines jeden Satzes null sein soll. Die Interpolation einfacher Bahnen ist Gegenstand des ▶ Kap. 12.1.3. Der Vorschub-Override und seine Verarbeitung in der Steuerung werden im ▶ Kap. 12.3.2 behandelt.

12.1.1.1 Beschleunigungs- und Verzögerungsphase

Die Beschleunigung wird je nach verwendetem Beschleunigungsgesetz in einer oder in drei Phasen durchgeführt. Bei Verwendung von Beschleunigungssprüngen wird in einer einzigen Phase so lange konstant beschleunigt, bis im darauffolgenden Zeitintervall die programmierte oder die als maschinenspezifischer Wert abgelegte maximale Bahngeschwindigkeit erreicht oder überschritten würde. Hier wird die Annahme gemacht, dass die maximale Bahngeschwindigkeit gleich der kleinsten maximalen Achsgeschwindigkeit aller Achsen festgelegt wird. Durch diese Annahme werden die weiteren Berechnungen stark vereinfacht. Mit der Erhöhung der Achsgeschwindigkeit um die Restdifferenz, die kleiner als das maximale Beschleunigungs-

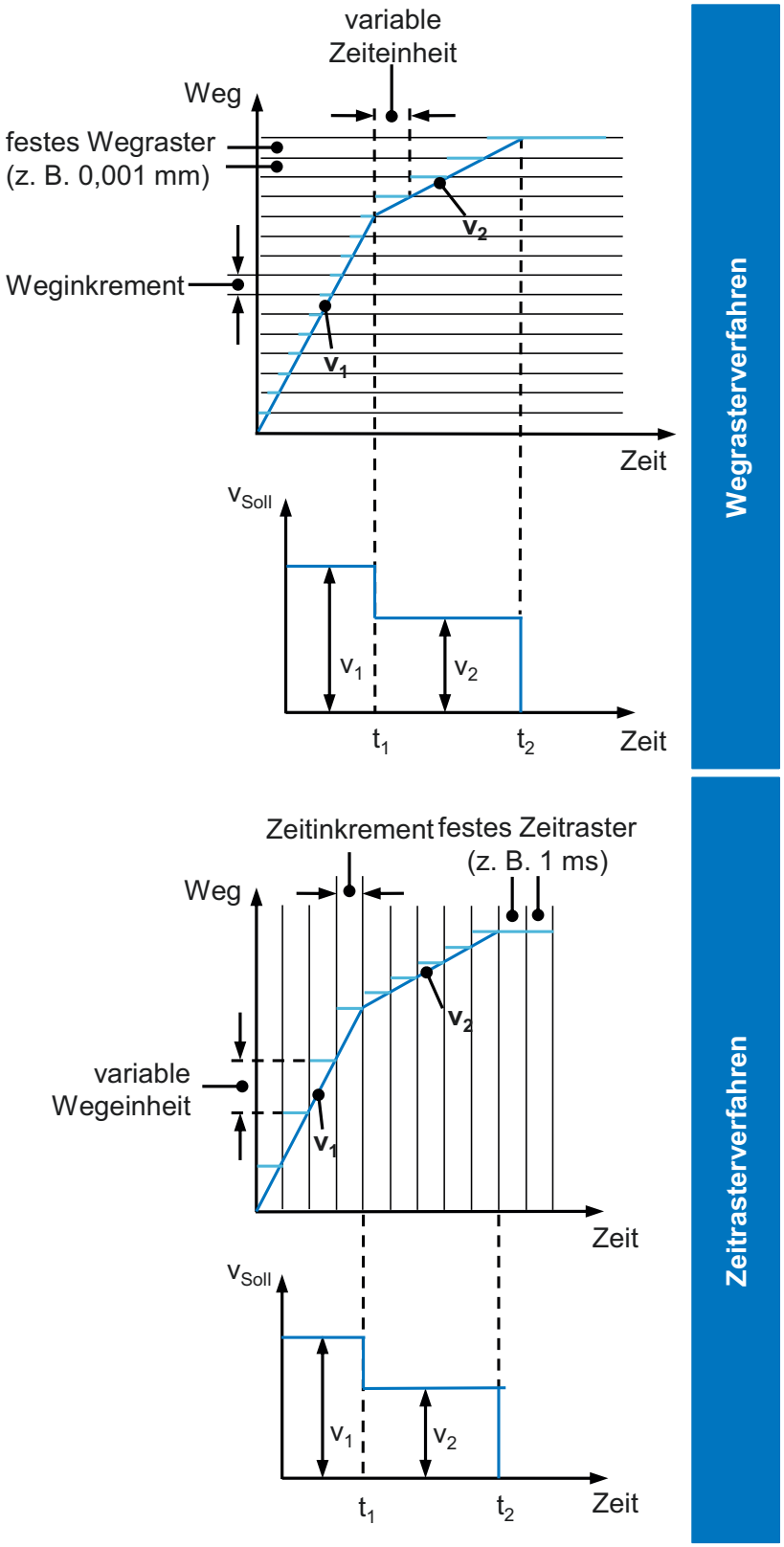


Bild 12.5 Schematische Darstellung des Weg- und Zeitrasterverfahrens

vermögen ist, wird die Beschleunigungsphase abgeschlossen, Bild 12.6.

Diese Restdifferenz ergibt sich daraus, dass zur Erzeugung der programmierten Geschwindigkeitsdifferenz in der Regel kein ganzzahliges Vielfaches der Interpolationstakte erforderlich ist. Beispielsweise beträgt die Geschwindigkeitsänderung innerhalb eines Interpolatortaktes bei einer maximalen Beschleunigung von 1 m/s^2 und einer Taktdauer von 1 ms 1 mm/s

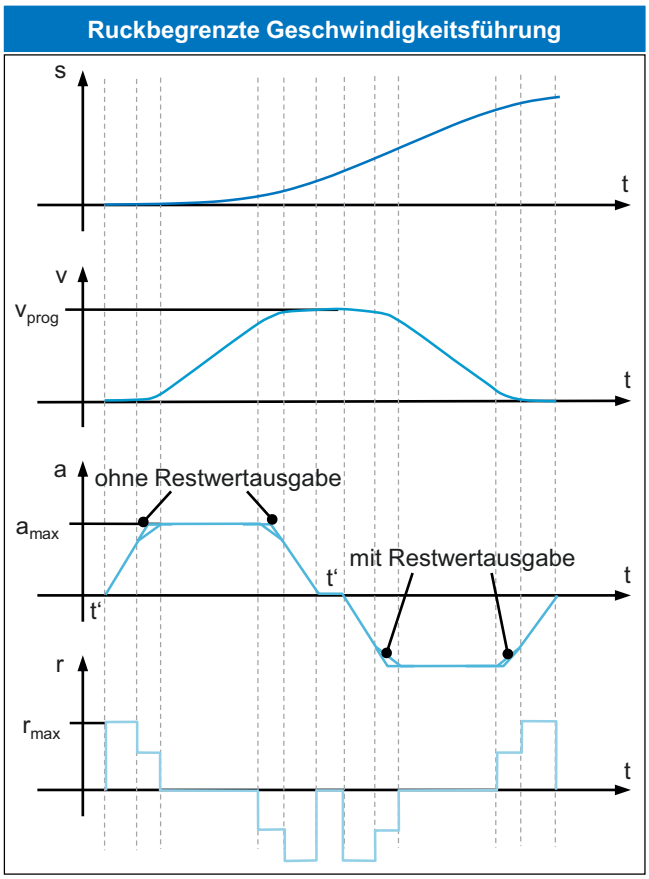


Bild 12.6 Restwertausgabe in der Geschwindigkeitsführung

oder 60 mm/min. Bei einer programmierten Geschwindigkeitsänderung von 126 mm/min oder 2,1 mm/s beträgt die dann nach zwei Takten mit Ausgabe der vollen Beschleunigung im dritten Takt auszugebende Restgeschwindigkeitsdifferenz 0,1 mm/s. Hierzu wird die Beschleunigung für den 3. Interpolationstakt auf $a = (0{,}1\ \text{mm/s}) / 0{,}001\ \text{s} = 0{,}1\ \text{m/s}^2$ zurückgenommen. Wichtig ist hier, dass während der Beschleunigungsphase in jedem Interpolationstakt die erreichte Geschwindigkeit überwacht werden muss. Dasselbe gilt für die im Folgenden beschriebene Bremseinsatzpunkterkennung. Hierbei sind die entsprechenden Werte am Ende des aktuellen Interpolationsintervalls zu überwachen.

Bei Verwendung von Beschleunigungssprüngen gilt für die gesamte Phase der Beschleunigung $0 \Rightarrow 1\ (t_0 \le t < t_1)$ gemäß ◘ Bild 12.3.

$$a(t) = a_{max}$$
$$v(t) = \int_{t_0}^{t} a(t)\,dt + v(t_0) = a_{max} \cdot (t - t_0) + v(t_0) \tag{12.2}$$

Mit $v(t_0) = 0$ wird

$$s(t) = \int_{t_0}^{t} v(t)\,dt + s(t_0) = \int_{t_0}^{t} \left(a_{max} \cdot (t - t_0)\right) dt + s(t_0)$$
$$= \frac{1}{2} \cdot a_{max} \cdot (t - t_0)^2 + s(t_0) \tag{12.3}$$

Hierbei wird, wie auch für die weiteren Ausführungen, angenommen, dass zu Beginn und zum Ende der Bewegung sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung null sind. Wird ein rampenförmiges Beschleunigungsprofil verwendet, so zerfällt die Beschleunigungsphase in die im ◘ Bild 12.4 dargestellten drei Schritte. Der Vergleich mit ◘ Bild 12.3 macht deutlich, dass hier das Beschleunigungsprofil den gleichen qualitativen Verlauf aufweist, wie der Geschwindigkeitsverlauf bei Einsatz von Beschleunigungssprüngen. Die Aufgabe der Beschleunigungsphase gliedert sich nun gemäß ◘ Bild 12.4 in die drei Phasen: lineare Erhöhung der Beschleunigung auf ihren Maximalwert mit konstantem positivem Ruck, konstante Beschleunigung und lineare Verringerung der Beschleunigung auf null mit konstantem negativem Ruck.

Während jeder dieser Phasen kommt es zu einer Ausgabe von Restwerten zur exakten Erreichung der gewünschten Endwerte. Im Bereich des Beschleunigungsanstieges $0 \Rightarrow 1$ gilt für $t_0 \le t < t_1$ (◘ Bild 12.4:

$$a(t) = r_{max} \cdot (t - t_0)$$
$$v(t) = \int_{t_0}^{t} a(t)\,dt + v(t_0) = \int_{t_0}^{t} \left(r_{max} \cdot (t - t_0)\right) dt + v(t_0) \tag{12.4}$$
$$= \frac{1}{2} r_{max} \cdot (t - t_0)^2 + v(t_0)$$

Mit $v(t_0) = 0$ wird

$$s(t) = \int_{t_0}^{t} v(t)\,dt + s(t_0) = \int_{t_0}^{t} \left(\frac{1}{2} r_{max} \cdot (t - t_0)^2 \right) dt + s(t_0)$$
$$= \frac{1}{2} r_{max} \cdot (t - t_0)^3 + s(t_0)$$

Für konstante Beschleunigung $1 \Rightarrow 2$ folgt mit $t_1 \leq t < t_2$ (Bild 12.4):

$$a(t) = a_{max}$$
$$v(t) = \int_{t_1}^{t} a_{max}\,dt + v(t_1) = a_{max} \cdot (t - t_1) + v(t_1)$$
$$s(t) = \int_{t_1}^{t} v(t)\,dt + s(t_1) = \int_{t_1}^{t} \left(a_{max} \cdot (t - t_1) + v(t_1) \right) dt + s(t_1) \quad (12.5)$$
$$= \frac{1}{2} a_{max} \cdot (t - t_1)^2 + v(t_1) \cdot (t - t_1) + s(t_1)$$

mit:

$$v(t_1) = \frac{1}{2} r_{max} \cdot (t_1 - t_0)^2$$
$$s(t_1) = \frac{1}{6} r_{max} \cdot (t_1 - t_0)^3 + s(t_0) \quad (12.6)$$

Für die Beschleunigungsverringerung $2 \Rightarrow 3$ ergibt sich unter der Annahme, dass der negative Ruck den gleichen Betrag wie der positive Ruck hat, für $t_2 \leq t < t_3$ (Bild 12.4):

$$a(t) = a_{max} - r_{max} \cdot (t - t_2)$$
$$v(t) = \int_{t_2}^{t} a(t)\,dt + v(t_2) = \int_{t_2}^{t} \left(a_{max} - r_{max} \cdot (t - t_2) \right) dt + v(t_2)$$
$$= a_{max} \cdot (t - t_2) - \frac{1}{2} r_{max} \cdot (t - t_2)^2 + v(t_2) \quad (12.7)$$
$$s(t) = \int_{t_2}^{t} v(t)\,dt + s(t_2)$$
$$= \frac{1}{2} a_{max} \cdot (t - t_2)^2 - \frac{1}{6} r_{max} \cdot (t - t_2)^3 + v(t_2) \cdot (t - t_2) + s(t_2)$$

mit:

$$v(t_2) = a_{max} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} r_{max} \cdot (t_1 - t_0)^2$$
$$s(t_2) = \frac{1}{2} r_{max} \cdot (t_2 - t_1)^2 \quad (12.8)$$
$$+ \frac{1}{2} r_{max} (t_1 - t_0)^2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot (t_1 - t_0) + (t_2 - t_1) \right) + s(t_0)$$

Die Verzögerungsphase erfolgt im Allgemeinen sowohl bei Beschleunigungssprüngen als auch bei Beschleunigungsrampen weitgehend analog zur Beschleunigungsphase. Ein Unterschied ergibt sich daraus, dass die Restweg- bzw. -geschwindigkeitsausgabe (Bild 12.6) nicht wie während der Beschleunigung am Ende, sondern zu Beginn jedes Abschnitts ausgegeben wird. Das ist erforderlich, um den Zielpunkt möglichst schnell zu erreichen.

12.1.1.2 Konstantgeschwindigkeitsphase

An diese Beschleunigungsphase schließt sich die Konstantgeschwindigkeitsphase an. Ihre Aufgabe besteht darin, wie die Bezeichnung schon erkennen lässt, eine konstante Bahngeschwindigkeit zu gewährleisten. Hierbei ist von Bedeutung, dass eine konstante Bahngeschwindigkeit wie auch eine konstante Bahnbeschleunigung nur im Sonderfall einer linearen Bewegung gleichbedeutend mit einer konstanten Achsgeschwindigkeit bzw. -beschleunigung ist, Bild 12.7, Bild 12.4. Die sich für diese Phase ($t_3 \leq t \leq t_4$) ergebenden Zeit-/Wegverhältnisse lauten:

$$a(t) = 0$$
$$v(t) = v(t_3) = const. \quad (12.9)$$
$$s(t) = v(t_3) \cdot (t - t_3) + s(t_3)$$

12.1.1.3 Bremseinsatzpunkterkennung

Aufgabe der Bremseinsatzpunkterkennung ist es, die Verzögerungsphase rechtzeitig auszulösen, sodass der Endpunkt des aktuellen Verfahrsatzes in jedem Falle exakt und überschwingfrei erreicht werden kann. Darüber hinaus sollte die Verzögerung nicht früher als nötig beginnen, um kürzeste Bearbeitungszeiten sicherzustellen. Dazu wird der am Ende des aktuellen Interpolationstaktes verbleibende Restweg überprüft. Diese Funktion muss nicht nur während der Konstantgeschwindigkeits-, sondern auch während der Beschleunigungsphase aktiv sein. Innerhalb eines Interpolationstaktes wird diese Funktion stets vor allen anderen Berechnungen ausgeführt. In Abhängigkeit von ihrem Ergebnis wird anschließend in die Funktionen für die genannten Phasen, z. B. für konstante Bahngeschwindigkeit oder Verzögerung, verzweigt. Die Zeitpunkte, zu denen ein Übergang zwischen den drei Phasen der Beschleunigung und Verzögerung bei linearer Änderung der Beschleunigung zu erfolgen hat, müssen auf ähnliche Art und Weise überwacht werden.

Arbeitet die Geschwindigkeitsführung bereits in der Konstantphase, so errechnet sich der minimale Restweg, der ab dem Ende des aktuellen Wegintervalls noch zur Verfügung stehen muss, bei Vorgabe von Beschleunigungssprüngen (Bild 12.3) zu:

$$s_{Rest} = \int v(t)\,dt = \int \left(v_{prog} - a_{max} \cdot t \right) dt$$
$$s_{Rest} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{prog}^2}{a_{\max}} \quad (12.10)$$

wobei v_{prog} die programmierte Sollgeschwindigkeit darstellt. Bei linearer Beschleunigungsänderung ergibt sich, unter der Annahme, dass a_{max} in der Verzögerungsphase erreicht wird, eine etwas aufwendigere Berechnung. Mit v_{prog} als der programmierten Sollgeschwindigkeit ergibt sich laut Bild 12.4:

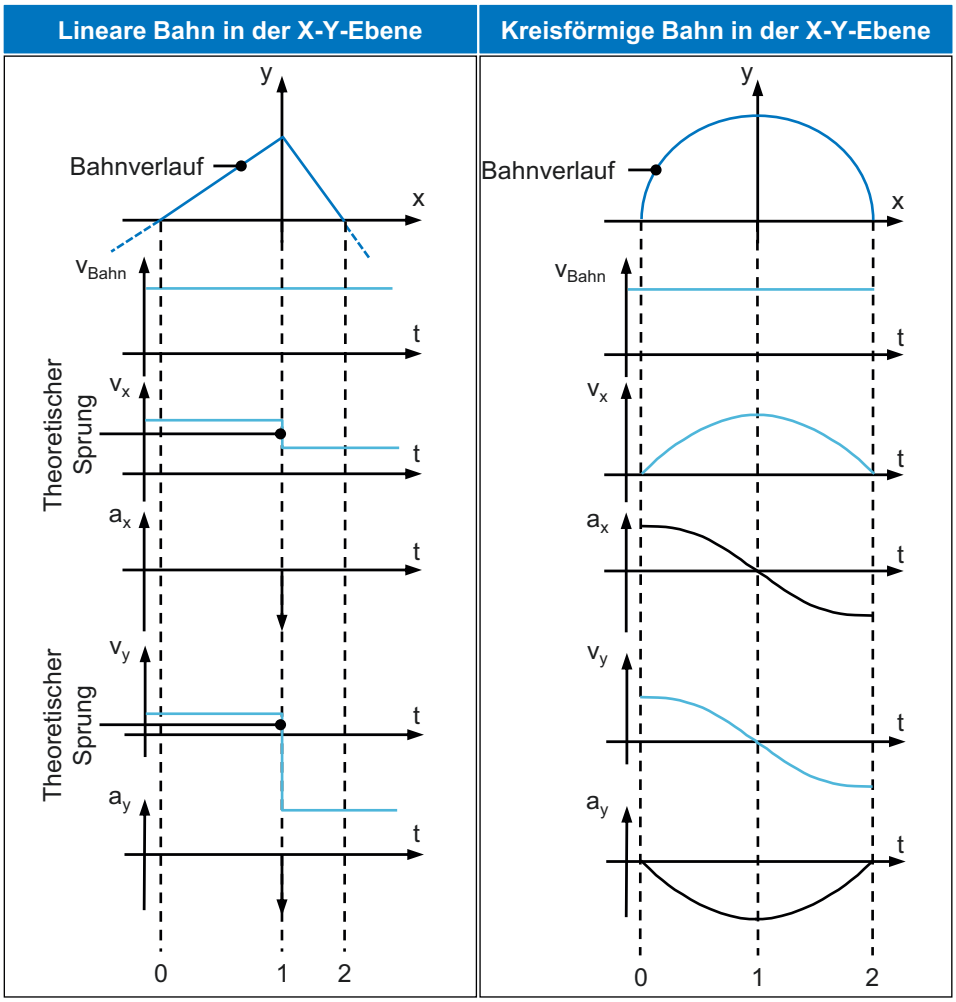


Bild 12.7 Bahn- und Achsgeschwindigkeit für eine lineare und eine kreisförmige Bewegung mit konstanter Bahngeschwindigkeit in der x-y-Ebene

$$
\begin{aligned}
s_{Rest,4\Rightarrow 5} &= \frac{a_{max}}{r_{max}}\left(v_{prog} - \frac{1}{6}\cdot\frac{a_{max}^2}{r_{max}}\right)\\
s_{Rest,5\Rightarrow 6} &= \frac{1}{2}\cdot\frac{v_{prog}\left(r_{max}\cdot v_{prog} - a_{max}^2\right)}{r_{max}\cdot a_{max}}\\
s_{Rest,6\Rightarrow 7} &= \frac{1}{6}\cdot\frac{a_{max}^3}{r_{max}^2}\\
s_{Rest} &= s_{Rest,4\Rightarrow 5} + s_{Rest,5\Rightarrow 6} + s_{Rest,6\Rightarrow 7}\\
s_{Rest} &= \frac{1}{2}\left(\frac{v_{prog}^2}{a_{max}} + \frac{a_{max}\cdot v_{prog}}{r_{max}}\right)
\end{aligned}
\qquad (12.11)
$$

Wie man erkennen kann, ist der benötigte theoretische Bremsweg vom maximalen Ruck abhängig. Er ist in jedem Fall länger als der sich bei einer Geschwindigkeitsführung mit Beschleunigungssprüngen und gleichen Grenzwerten ergebende. Für die zur Verzögerung benötigte Zeit t_{verz} ergibt sich mit Beschleunigungssprung:

$$t_{verz} = \frac{v_{prog}}{a_{max}} \qquad (12.12)$$

und mit Beschleunigungsrampe:

$$t_{verz} = \frac{a_{max}^2 + v_{prog}\cdot r_{max}}{a_{max}\cdot r_{max}} \qquad (12.13)$$

Es wird ersichtlich, dass sowohl für die Berechnung des Bremsweges, als auch der Bremszeit der Fall der Beschleunigungssprünge durch $r_{max} \to \infty$ aus dem allgemeineren Fall mit Beschleunigungsrampen hervorgeht.

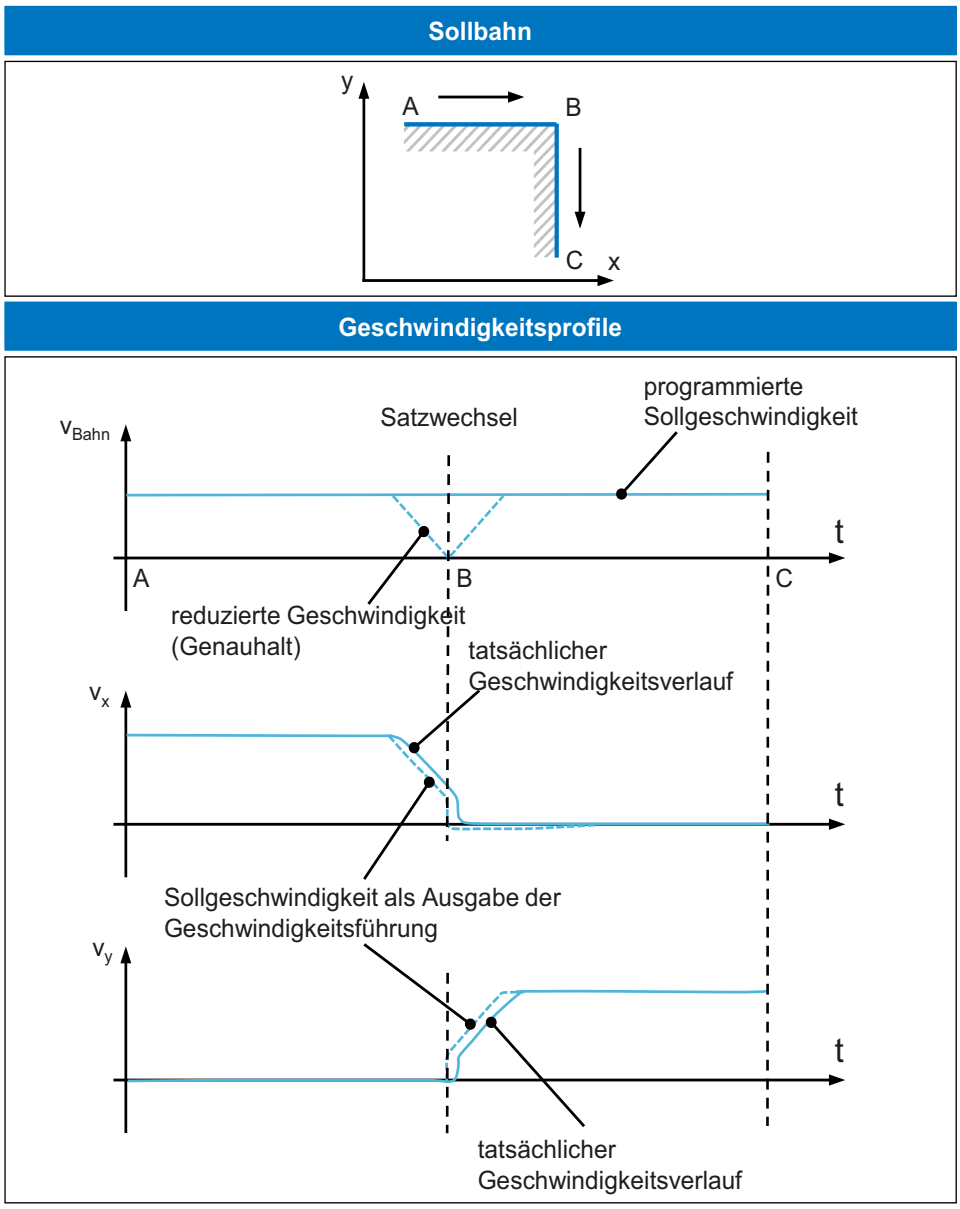
12.1.2 Funktionen zur satzübergreifenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsführung einfacher Bahnen

Während der vorhergehende Abschnitt die Geschwindigkeitsführung auf der Basis einzelner NC-Sätze zum Inhalt hatte, werden im Weiteren Funktionen behandelt, die den Informationsgehalt mehrerer NC-Sätze zur Geschwindigkeitsführung nutzen.

12.1.2.1 Satzübergänge

Bisher wurde davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit zu Beginn und am Ende eines jeden Satzes null ist. Darum konnte die Betrachtung des Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhaltens auf einzelne Sätze beschränkt werden. Steuerungen bieten jedoch die Möglichkeit, durch einen Befehl des NC-Programms zwischen sogenanntem Genauhalt und einer überschleifenden Geschwindigkeitsführung zu wählen. Dies bedeutet, dass im ersten Fall die Bahngeschwindigkeit gegen Ende des Satzes auf null reduziert wird. Im zweiten Fall erfolgt der Übergang sprungartig auf die Geschwindigkeit des nächsten Satzes. Darüber hinaus besteht bei einigen Herstellern die Möglichkeit, eine Geschwindigkeit vorzugeben, auf die bei Satzübergängen verzögert wir ◘ Bild 12.8. Dies stellt einen Kompromiss zwischen den beiden vorherigen Lösungen dar. Eine möglichst konstante Bahngeschwindigkeit auch bei Satzübergängen ist für eine optimale Fertigung von Bedeutung. An Ecken tritt jedoch die enge Verknüpfung von Geschwindigkeitsführung, Regler und dem dynamischen Maschinenverhalten besonders deutlich hervor. Eine Maschine als massebehaftetes und elastisches physikalisches System ist nicht in der Lage, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungssprünge auszuführen. Daraus resultieren Abweichungen der Istwerte gegenüber den Sollwerten im Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten.

Die Konsequenz sind Formfehler, die umso größer werden, je höher der Geschwindigkeits- und Beschleunigungssprung bzw. ihre Änderungen sind. Selbst im Fall einer im Eckpunkt während eines unendlich kurzen Zeitraums auf null reduzierten Sollgeschwindigkeit weicht die resultierende Bahn von der sich aus der Sollgeschwindigkeit ergebenden



◘ **Bild 12.8** Satzwechsel mit programmierter Reduziergeschwindigkeit. Nach SIEMENS

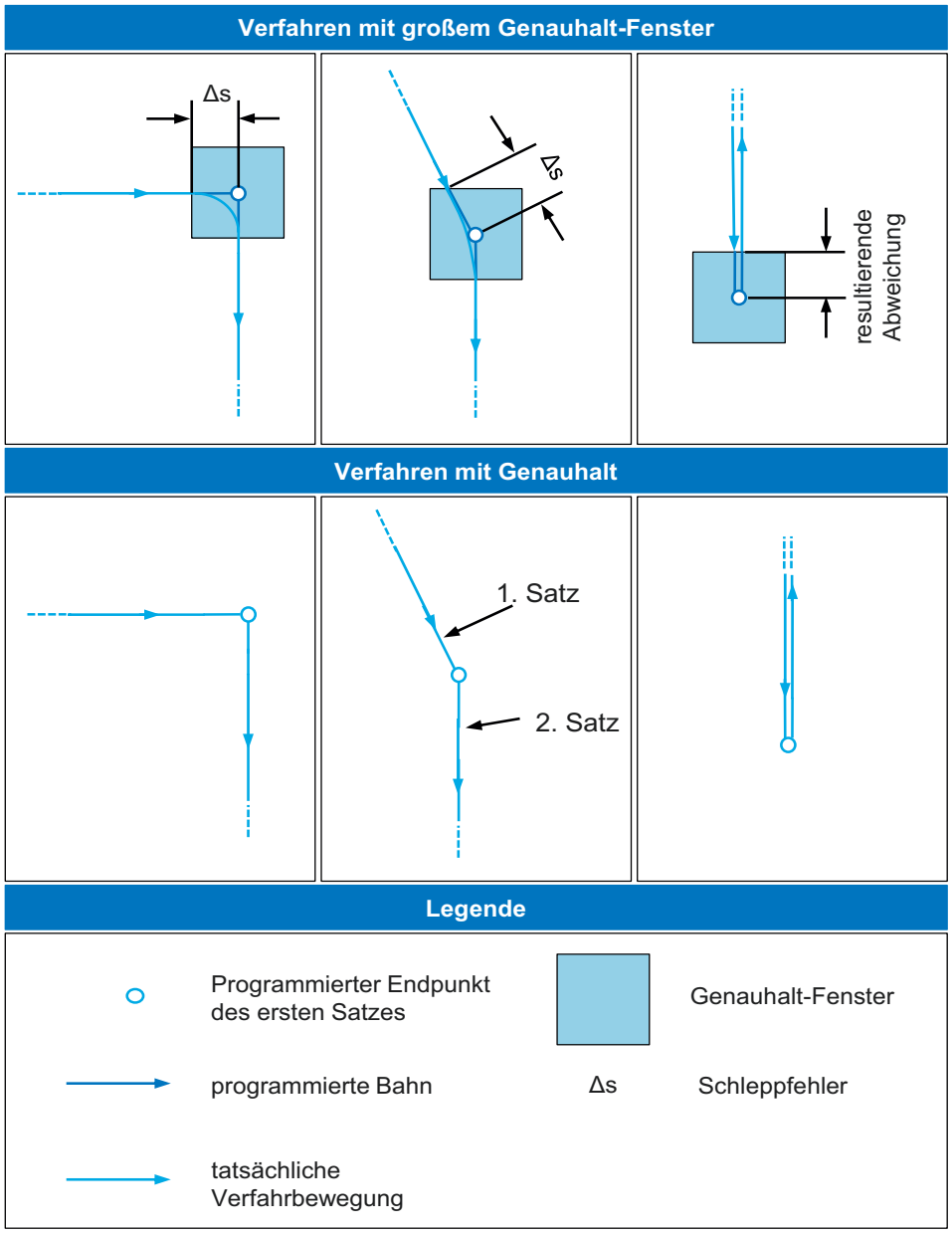


Bild 12.9 Verfahrbewegung mit großem Genauhaltfenster und mit Genauhalt

ab, da eine gewisse Zeit benötigt wird, um den Schleppfehler abzubauen.

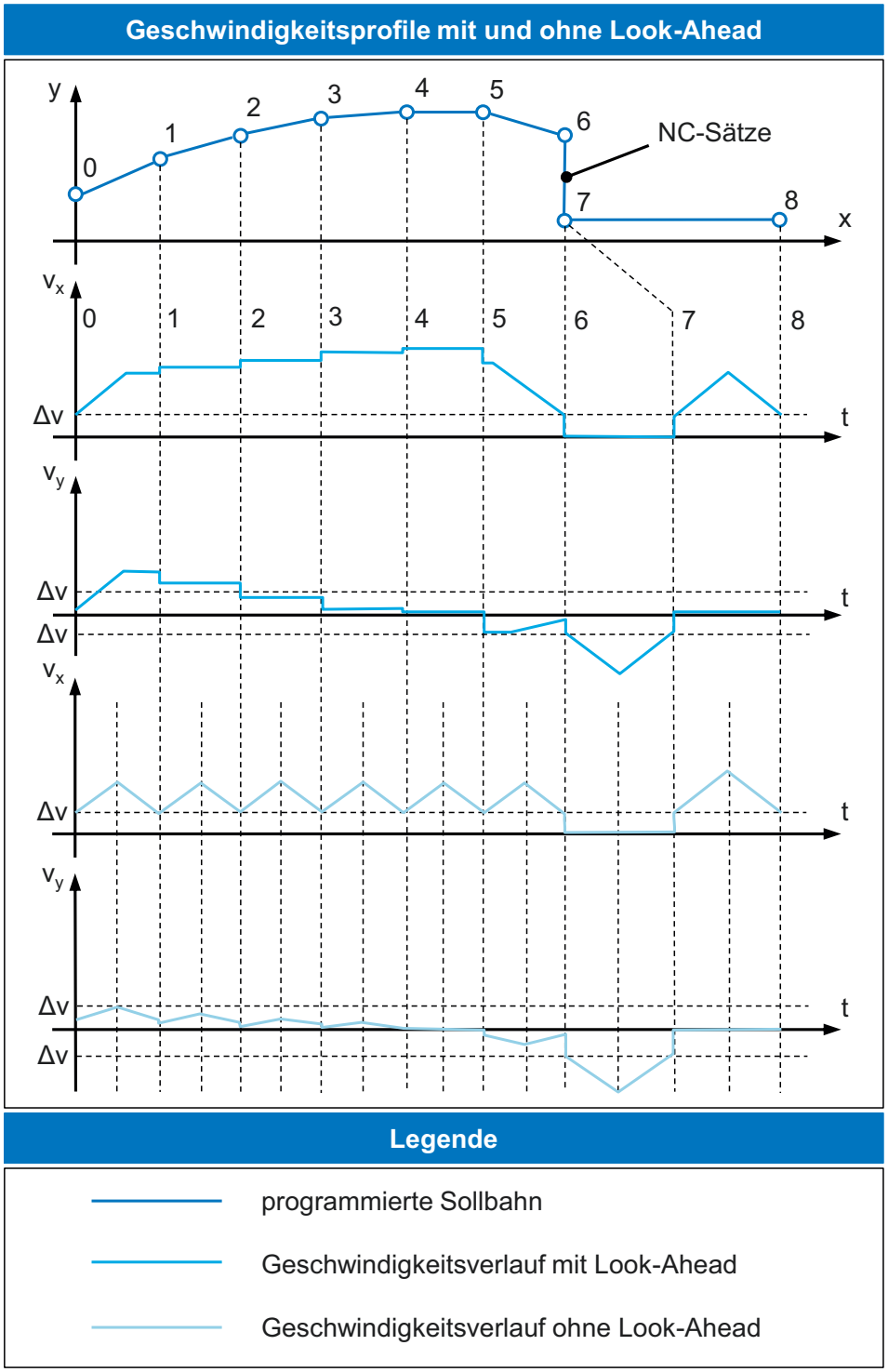
Die Höhe der Abweichung an der Ecke ist als Maschinenparameter für die Funktion Genauhalt vorgebbar. Im Extremfall einer zugelassenen Abweichung von null ist ein Verweilen des Lagesollwertes in diesem Punkt erforderlich (Genauhalt), bis der Schleppabstand abgebaut ist. Einige Beispiele für die bei einem Verfahren ohne und mit Genauhalt entstehende Bahn zeigt Bild 12.9.

12.1.2.2 Vorausschauende Geschwindigkeitsführung

Die genannten Probleme, die sich aus dem Geschwindigkeitsverlauf an Satzübergängen ergeben können, haben dazu geführt, eine vorausschauende Analyse mehrerer Sätze vorzunehmen und Geschwindigkeiten sowie Beschleunigungen an den Satzübergängen den Genauigkeitsanforderungen anzupassen. Diese Funktion wird im Allgemeinen als Look-Ahead bezeichnet.

Die Look-Ahead-Funktion analysiert mehrere, in der Regel zwischen ca. 10 und 100, Sätze im Voraus und bestimmt daraus die Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen der Vorschubbahn. Mit Hilfe einer Modellierung des dynamischen Verhaltens der Maschine bzw. ihrer Vorschubachsen werden für eine vorgegebene zulässige Bahnabweichung die erlaubten Vorschubgeschwindigkeiten bzw. -beschleunigungen ermittelt. Auf diese Weise werden die modifizierten Sollgeschwindigkeitsprofile für die betrachteten Sätze berechnet. Das mit Hilfe der Look-Ahead-Funktion er-

Bild 12.10 Geschwindigkeitsverlauf mit und ohne Look-Ahead



mittelte Geschwindigkeitsprofil wird im Bild 12.10 einem ohne diese Funktion gegenübergestellt. Für beide Profile wurde die gleiche maximale Sprunghöhe für die Geschwindigkeit am Satzübergang vorgegeben.

Wie man Bild 12.10 erkennen kann, hält die Look-Ahead-Funktion die garantierte Genauigkeit ein und ermöglicht dabei die maximal erlaubte Vorschubgeschwindigkeit. Diese maximale Geschwindigkeit wird auch bei einer Reihe von Sätzen mit jeweils sehr kleiner Satzlänge erreicht, wenn die Richtungsänderungen der Einzelsätze nicht zu groß sind. Dies ist typischerweise bei der Freiformflächenbearbeitung der Fall. Eine konventionelle Geschwindigkeitsführung würde mit Hilfe ihrer Bremseinsatzpunktkontrolle sicherstellen, dass die Maschine innerhalb des überschaubaren Bereiches anhalten kann. Da dieser Bereich sich nur bis zum . Ende des aktuellen bzw. in Sonderfällen des nächsten Satzes

erstreckt, kann der Fall eintreten, dass diese Weglänge von z. B. 0,05 bzw. 0,1 mm nicht für den Bremsvorgang von der programmierten Bahngeschwindigkeit ausreicht.

Durch die Look-Ahead-Funktion wird hingegen eine erheblich größere Strecke im Voraus analysiert. Falls erkannt wird, dass kein Anhalten einer Achse erforderlich ist und die auftretenden Geschwindigkeitssprünge bzw. -abweichungen an den Satzübergängen den vorgegebenen Grenzwert nicht überschreiten, kann mit deutlich höherer Vorschubgeschwindigkeit verfahren werden.

Als Beispiel sei angenommen, dass eine moderne Werkzeugmaschine über ein Beschleunigungsvermögen der Achsen von 2 m/s^2 verfügt. Vereinfachend sei weiterhin für die Berechnung angenommen, dass die Bahnbeschleunigung gleich der kleinsten Achsbeschleunigung sei. Dann kann eine Maschine innerhalb eines Satzes der Länge 0,1 mm bzw. zweier Sätze von zusammen 0,2 mm auf maximal 848,5 mm/min bzw. 1200 mm/min beschleunigen. Dies gilt, da zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein muss, dass die Maschine innerhalb des betrachteten Bereiches zum Stillstand kommen können muss. Für die moderne Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, die mit Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/min arbeitet, sind solche Einschränkungen nicht akzeptabel.

Insbesondere im Bereich der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Freiformflächen erlaubt die Look-Ahead-Funktion gegenüber herkömmlichen Steuerungen erheblich gesteigerte Vorschubwerte bei gleichbleibend hoher Formtreue. Sie stellt eine Möglichkeit dar, besonders bei aufeinanderfolgenden Sätzen mit kurzer Länge und geringer Richtungsänderung, bei Einhaltung einer definierten Genauigkeit mit höchstmöglicher Vorschubgeschwindigkeit zu arbeiten.

12.1.3 Interpolation einfacher Bahnen

Aufgabe der Interpolation ist es, die Positionssollwerte für die einzelnen Maschinenachsen so zu berechnen, dass durch ihre Überlagerung die gewünschte Bahn entsteht. Daraus ergibt sich die Aufgabe, eine programmierte Bahn, z. B. Kreisbahn, in Zwischenpunkte für die einzelnen Achsen zu zerlegen. Zur Bestimmung der einzelnen, achsabhängigen Lageführungsgrößen wurden eine Vielzahl von Interpolationsverfahren entwickelt. Grundsätzlich geht man bei der Herleitung von der exakten mathematischen Gleichung aus, die sich für ein kartesisches Koordinatensystem in den folgenden Grundformen darstellen lässt [BRON84]:

Implizite Darstellung:

$$F(x, y, z) = 0 \tag{12.14}$$

Explizite Darstellung:

$$\begin{aligned} x &= F(y, z) \\ y &= F(x, z) \\ z &= F(x, y) \end{aligned} \tag{12.15}$$

Parameterdarstellung:

$$\begin{aligned} x &= F(u) \\ y &= F(u) \\ z &= F(u) \end{aligned} \tag{12.16}$$

mit dem gemeinsamen Parameter u (z. B. Zeit). Zur Herleitung von Interpolationsverfahren ist eine Darstellung in Parameterform, Gleichung (12.16), besonders geeignet. Sie ermöglicht erstens die eindeutige Darstellung von Wegen, bei denen dem Wert einer Achse mehrere Werte der übrigen Achsen zugeordnet werden müssen, wie z. B. Hinterschneidungen oder Schleifen. Zweitens werden durch ihre Verwendung die Berechnungen zur Interpolation und Geschwindigkeitsführung erleichtert.

Bei der Interpolation einfacher Bahnen, also insbesondere von Gerade und Kreis, werden in der Regel einige vereinfachende Annahmen über die Maschinengrenzwerte getroffen. Für die maximale Bahngeschwindigkeit, -beschleunigung und ggf. -beschleunigungsänderung, die die Maschine erreichen kann, wählt man die Maximalwerte der dynamisch schwächsten Achse:

$$r_{max} = \min\left\lfloor r_{max,x}, r_{max,y}, r_{max,z} \right\rfloor \tag{12.17}$$

$$a_{max} = \min\left\lfloor a_{max,x}, a_{max,y}, a_{max,z} \right\rfloor \tag{12.18}$$

$$v_{\max} = \min\left\lfloor v_{\max,x}, v_{\max,y}, v_{\max,z} \right\rfloor \tag{12.19}$$

Somit bestimmt die dynamisch schwächste Achse maßgeblich die Leistungsfähigkeit einer Maschine. Diese Annahme hat den Vorteil, dass die sich ergebenden Berechnungen wesentlich vereinfacht werden können, und die Maschine keinesfalls überlastet wird.

12.1.3.1 Geradeninterpolation

Die Geradeninterpolation, also die Zerlegung der Bahn in kleine Teilabschnitte für die einzelnen Achsen, wird heute in der Regel durch direkte Berechnung der Achswerte durchgeführt. Für die Funktion $s(t)$, die in den Ausführungen über die Geschwindigkeitsführung (vgl. ► Kap. 12.1.1) verwendet wurde, ergibt sich im Fall einer Geraden im dreidimensionalen Raum der Koordinatenvektor:

$$s(t) = \left(x(t), y(t), z(t)\right)^T, T = \text{transponiert} \tag{12.20}$$

Neben der Berechnung der Achswerte fällt bei der Geradeninterpolation zusätzlich der Aufwand für die Zerlegung der

programmierten Bahngeschwindigkeit v_B auf die einzelnen Achsen an. Hierzu müssen einmal zu Satzbeginn die Verhältnisse A aus Koordinatenstrecke zur Gesamtstrecke:

$$\left|S_{Satz,gesamt}\right| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \tag{12.21}$$

für diesen Satz berechnet werden:

$$S_{Satz} = \left(\Delta x, \Delta y, \Delta z\right)^T \tag{12.22}$$

Hieraus ergeben sich die einzelnen Achsgeschwindigkeiten zu:

$$v_x = v_B A_x \quad \text{mit} \quad A_x = \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}} \tag{12.23}$$

$$v_y = v_B A_y \quad \text{mit} \quad A_y = \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}$$

$$v_z = v_B A_z \quad \text{mit} \quad A_x = \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}$$

Hierdurch werden rechenintensive trigonometrische Berechnungen vermieden. Für eine Geschwindigkeitsführung mit Beschleunigungssprüngen ergibt sich für die Beschleunigungsphase mit der Interpolationstaktzeit T die folgende Abfolge der Berechnungen. In einem ersten Schritt wird die Ermittlung der Achsenverhältnisse gemäß Gleichung (12.23) durchgeführt. Anschließend werden die sich in den einzelnen Achsen ergebenden Beschleunigungs- und Geschwindigkeitswerte berechnet:

$$\begin{aligned} a_x &= A_x \cdot a_{max} \\ a_y &= A_y \cdot a_{max} \\ a_z &= A_z \cdot a_{max} \end{aligned} \tag{12.24}$$

$$\begin{aligned} v_{x,Soll} &= A_x \cdot v_B \\ v_{y,Soll} &= A_y \cdot v_B \\ v_{z,Soll} &= A_z \cdot v_B \end{aligned}$$

Während der Beschleunigungsphase ergeben sich die Sollwerte der Achsen am Ende des n+1-ten Interpolationstaktes aus den Werten des n-ten Taktes und des Interpolationsintervalls T wie folgt:

$$\begin{aligned} v_{x,n+1} &= v_{x,n} + a_x \cdot T \\ v_{y,n+1} &= v_{y,n} + a_y \cdot T \\ v_{z,n+1} &= v_{z,n} + a_z \cdot T \end{aligned} \tag{12.25}$$

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + v_{x,n} \cdot T + \tfrac{1}{2} \cdot a_x \cdot T^2 \\ y_{n+1} &= y_n + v_{y,n} \cdot T + \tfrac{1}{2} \cdot a_y \cdot T^2 \\ z_{n+1} &= z_n + v_{z,n} \cdot T + \tfrac{1}{2} \cdot a_z \cdot T^2 \end{aligned} \tag{12.26}$$

Die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung muss nur einmal je Beschleunigungsphase durchgeführt werden und kann im weiteren Verlauf der Beschleunigung als Konstante addiert werden.

Für die Phase konstanter Geschwindigkeit ergibt sich mit der programmierten Bahngeschwindigkeit v_B:

$$\begin{aligned} v_x &= A_x \cdot v_B \\ v_y &= A_y \cdot v_B \\ v_z &= A_z \cdot v_B \end{aligned} \tag{12.27}$$

Für die Berechnung jeder neuen Stellung der Achsen ist jeweils nur die Addition einer Konstanten der Größe $v_k \cdot T$ ($k = x, y, z$) erforderlich. Für die Verzögerungsphase ergeben sich entsprechende Berechnungen mit umgekehrtem Vorzeichen.

Bei diesem, wie bei allen anderen im Weiteren beschriebenen Interpolationsverfahren, ist die Bremseinsatzpunktkontrolle während jedes Taktes durchzuführen. Ebenso muss die Geschwindigkeit stets auf ihren Maximalwert (Maschinenparameter) überprüft werden. Bei der Vorgabe der Sollgeschwindigkeit ist die Stellung des Override-Schalters (vgl. ► Kap. 12.3.2) zu berücksichtigen.

12.1.3.2 Kreisinterpolation

Ein Kreis kann gemäß DIN 66025 stets nur in einer der Koordinatenebenen x/y, y/z oder z/x programmiert werden. Als Beispiel wird hier die Kreisinterpolation in der x/y-Ebene beschrieben. Für die Kreisinterpolation werden die Programmdaten nach DIN 66025 zunächst in die für eine parametrische Darstellung erforderlichen Angaben umgerechnet, ◘ Bild 12.11. Die für die Interpolation verwendeten geometrischen Daten sind die Mittelpunktskoordinaten (x_M,y_M), der Kreisradius R, der Anfangswinkel β_A, der Endwinkel der Bewegung β_E sowie der Drehsinn. Es ergibt sich für die Funktion $s(t)$ des Kreises:

$$s(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_M + R \cdot \cos\left(\beta(t)\right) \\ y_M + R \cdot \sin\left(\beta(t)\right) \end{pmatrix} \tag{12.28}$$

Neben den rein geometrischen Daten muss die Bahngeschwindigkeit bzw. -beschleunigung in eine Drehgeschwindigkeit bzw. -beschleunigung umgerechnet werden. Es gilt für die im Bogenmaß angegebene Drehgeschwindigkeit und Drehbeschleunigung:

$$\dot{\beta} = \omega = \frac{v_B}{R} \text{ und } \ddot{\beta} = \dot{\omega} = \frac{a_{max}}{R} \tag{12.29}$$

Somit ergibt sich für die konstante Beschleunigungsphase:

$$\dot{\beta}_{n+1} = \dot{\beta}_n + \ddot{\beta}_n \cdot T \quad \text{mit } T = \text{Interpolationstaktrate} \tag{12.30}$$

$$\beta_{n+1} = \beta_n + \dot{\beta}_n \cdot T + \tfrac{1}{2} \cdot \ddot{\beta} \cdot T^2 \tag{12.31}$$

Für die konstante Beschleunigungsphase ergibt sich das Gesetz zur Ermittlung der Achswerte wie folgt:

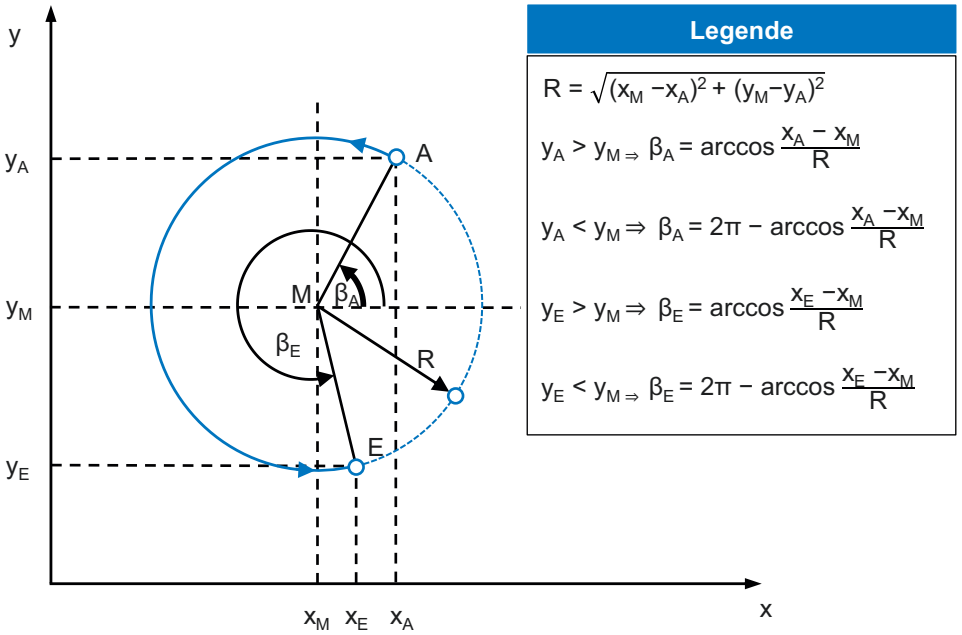


Bild 12.11 Umrechnung der programmierten Kreisdaten in die interne parametrische Darstellung

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_M + R \cdot \cos\left(\beta_n + \dot{\beta}_n \cdot T + \frac{1}{2}\ddot{\beta} \cdot T^2\right) \\ y_M + R \cdot \sin\left(\beta_n + \dot{\beta}_n \cdot T + \frac{1}{2}\ddot{\beta} \cdot T^2\right) \end{pmatrix} \tag{12.32}$$

Die Gleichungen für die Verzögerungsphase sind identisch. Allerdings weist dann die Beschleunigung einen negativen Wert auf. Für die Bremseinsatzpunktkontrolle wird die Bogenlänge entlang des idealen Kreises verwendet. Die tatsächliche Weglänge, die sich als Summe der Sekanten ergibt, ist nicht bekannt, da z. B. durch Overrideänderungen die Bahngeschwindigkeit beeinflusst würde. Aus Geschwindigkeitsänderungen ergeben sich wiederum unterschiedliche Sekantenlängen.

An die Beschleunigung schließt sich die Phase konstanter Bahngeschwindigkeit an. Im Fall eines Kreises entspricht eine konstante Bahngeschwindigkeit veränderlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der einzelnen Achsen. Jedoch ist der Winkelschritt:

$$\alpha = \omega \cdot T = \frac{v_B}{R} \cdot T \tag{12.33}$$

bei konstanter Bahngeschwindigkeit ebenfalls konstant. Zur Berechnung der Achswerte wird heute zumeist die Gleichung (12.27) mit konstantem Winkelschritt zur direkten Ermittlung der Achswerte verwendet. Somit gilt für die Phase v_B = konstant:

$$s_{n+1}(t) = \begin{pmatrix} x_{n+1} \\ y_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_M + \cos(\beta_n + \alpha) \\ y_M + \sin(\beta_n + \alpha) \end{pmatrix} \tag{12.34}$$

12.1.4 Spline-Interpolation

Die Bearbeitung von Freiformflächen machen in der Regel Bahnverläufe notwendig, die mit den in der DIN 66025 vorgesehenen Konturelementen Gerade und Kreis (vgl. ▶ Kap. 11.3) nicht mathematisch exakt beschrieben werden können. Mit Geradensegmenten können die komplexen Verläufe unter Vorgabe einer Toleranz lediglich approximiert werden. Die dabei entstehenden Polygonzüge weisen jedoch im Vergleich zur Originalkontur einige Nachteile auf. Zum einen sind die Übergänge zwischen den Geradensegmenten nicht stetig differenzierbar. Dadurch entstehen bei der Abarbeitung des Programms Sprünge im Geschwindigkeitsverlauf, welche die Antriebe unnötig belasten und sich zudem in einer schlechten Oberflächenqualität niederschlagen. Zum anderen wird die Länge der Geradensegmente umso kleiner, je geringer die Approximationstoleranz gewählt wird. Kleine Segmentlängen verursachen jedoch ein hohes Programmvolumen und können zu Begrenzungen und Einbrüchen des Bearbeitungsvorschubs aufgrund steuerungsseitig begrenzter Satzwechselzeiten führen.

Ein Ansatz zur Vermeidung dieser Nachteile besteht in der Verwendung von mathematischen Funktionen höherer Ordnung zur Konturbeschreibung. In der Konstruktion werden zu diesem Zweck schon seit längerer Zeit Splines eingesetzt. In dem Bemühen um Durchgängigkeit in der NC-Verfahrenskette verfügen daher heute viele NC-Steuerungen neben den Standard-Interpolationsarten Gerade und Kreis über die Möglichkeit der Spline-Interpolation [FANU19; HEID96; FIDI98; NUM99; SIEM15]. Die Spline-Interpolation bietet insbesondere bei der Bearbeitung von Freiformflächen gegenüber der herkömmlichen Programmierung mit linearen Bahnsegmenten einige Vorteile.

So ist die Weglänge je Satz größer und dadurch das Datenvolumen geringer. Damit steht für die Satzaufbereitung mehr Zeit zur Verfügung. Darüber hinaus sind die Übergänge zwischen den einzelnen Sätzen zumeist stetig. Der Begriff Splines entstammt dem Englischen, wo er ursprünglich eine im Schiffbau verwendete biegsame Latte bezeichnete. Sie wurde für das Zeichnen von Linienrissen, aus denen die Verdrängung und der Widerstand des Schiffskörpers ermittelt werden konnten, verwendet. Die durch Biegung dieser Latte unter Vorgabe einiger weniger Haltepunkte entstehende Form hat die Eigenschaft, die Biegeenergie der Latte zu minimieren. Dieser Form entspricht näherungsweise ein kubischer, krümmungsstetiger Polynomspline.

Sollen, wie im obigen Beispiel, Querschnitte von Profilen oder Leitkurven dargestellt werden, so sind klassische Interpolations- oder Approximationspolynome im Allgemeinen ungeeignet. Sie neigen bei höherem Polynomgrad zu starkem Oszillieren [HOSC92; SCHÄ93]. Alternativ kann das gesamte Intervall in kleinere Teilintervalle und entsprechend die Gesamtkurve in Teilkurven zerlegt werden. Verlangt man nun im Weiteren, dass die die Teilkurven repräsentierenden Funktionen stetig miteinander verbunden werden, so spricht man von Splinefunktionen bzw. Sub-Splinefunktionen [HOSC92].

Eine segmentierte Funktion S mit Polynomsegmenten vom Grade n heißt

a) *Splinefunktion, falls S (n–1)-mal stetig differenzierbar ist,*
b) *Sub-Splinefunktion, falls S mindestens einfach stetig differenzierbar ist und nicht a) gilt [HOSC92].*

Im Zusammenhang mit der Darstellung von geometrischen Kurven spricht man von Spline-Kurven, im Folgenden kurz als Splines bezeichnet. Unter Spline-Interpolation wird hier die Auswertung der Spline-Kurve in diskrete Werte verstanden. Dieses muss abgegrenzt werden zu der Funktionalität, Punkte durch Splines zu interpolieren, die im Folgenden mit dem Begriff „Spline-Generierung“ bezeichnet wird.

Die Spline-Generierung wird heute hauptsächlich in der Programmvorbereitung mit CAM-Systemen durchgeführt. Um die dort berechneten Splines an die NC-Steuerung zu übergeben, stellen NC-Steuerungen entsprechende Schnittstellen bereit. Als Schnittstellenformate kommen dabei entweder Splines in B-Form [FANU19; HEID96; FIDI98; SIEM15] oder Splines in polynomialer Form zum Einsatz [NUM99; SIEM15]. Diese beiden Formate unterscheiden sich mathematisch in ihren zu Grunde liegenden Basisfunktionen. Eine Konvertierung zwischen den beiden Formaten ist möglich [VRIE91].

Einige NC-Steuerungen bieten zusätzlich auch die Funktionalität der steuerungsinternen Spline-Generierung auf Basis polynomialer Splines [NUM99; SIEM15]. Dazu werden die zu interpolierenden Punkte sowie die für die Festlegung der Bahn erforderlichen Randbedingungen (Stetigkeit, Steigung oder Krümmung im Anfangs- und Endpunkt) programmiert.

12.1.4.1 Polynomsplines

Polynomsplines kommen sowohl als Schnittstellenformat bei der NC-Programmierung, als auch bei der internen Spline-Generierung zum Einsatz. In beiden Fällen ist der maximale Polynomgrad im Allgemeinen auf drei begrenzt (kubische Polynome). Sie werden eingesetzt, um Kurven, von denen lediglich Stützstellen bekannt sind, in eine stetige Funktion zu überführen. Im Folgenden wird daher nach der allgemeinen Definition speziell auf Verfahren zur Generierung von Polynomsplines auf Basis gegebener Stützstellen eingegangen.

Definition

Die Verwendung von Splines in der NC-Technik setzt eine parametrische Darstellung der Splines voraus, um beliebige Konturverläufe darstellen zu können (vgl. Gleichung (12.16)). Den Polynomsplines liegt ein Vektor U mit geordneten Parameterwerten zu Grunde, die den Stützstellen P des Splines eindeutig zugeordnet sind:

$$U = \{u_0, u_1, \ldots, u_m\}, \qquad u_0 < u_1 < \ldots < u_m \tag{12.35}$$

Von den Parametern u_0, …, u_m wird strenge Monotonie gefordert. Unter Einhaltung dieser Bedingung sind die Parameterwerte prinzipiell frei wählbar, allerdings ist in der NC-Technik eine Beziehung zu der geometrischen Länge der Spline-Segmente vorteilhaft (vgl. ▶ Kap. und 12.1.4.4). Die Definition für den kubischen Polynomspline $S_i(u)$ lautet:

$$S_i(u) = A_i + B_i(u-u_i) + C_i(u-u_i)^2 + D_i(u-u_i)^3$$
$$\text{mit: } u \in [u_0, u_m], \quad i = 0(1)\, m-1 \tag{12.36}$$

mit A_i, B_i, C_i und D_i als Polynomkoeffizienten. Die Koeffizienten sind Vektoren. Der Index i beschreibt die einzelnen Segmente des Splines. Die Stützstellen der Kurve sind in der Definition nicht explizit enthalten, sie ergeben sich aus der Auswertung des Polynomsplines $S_i(u)$ an den Knoten u_0, …, u_m.

Polynomermittlung

Die Ermittlung der Polynomkoeffizienten erfolgt über die Vorgabe der Stützstellen P_0, …, P_m und zweier Randbedingungen. Randbedingungen können erstens Stetigkeitsbedingungen und zweitens Vorgaben für das Verhalten des Splines an den Randpunkten sein. Aus diesen Vorgaben wird zunächst ein geeigneter Parametervektor ermittelt. Danach werden die Koeffizienten für alle Spline-Segmente berechnet.

Bei der Ermittlung der Koeffizienten gilt es, zwischen Verfahren mit globalem und mit lokalem Charakter zu unterscheiden. Dabei bedeutet global, dass alle vorgegebenen Punkte gleichzeitig in die Berechnung eingehen und die Änderung bzw. Verschiebung eines einzelnen Punktes somit den Verlauf der gesamten Kurve ändert.

Lokale Verfahren hingegen berücksichtigen für die Berechnung der Koeffizienten des aktuellen Polynoms nur eine kleine Anzahl benachbarter Punkte. Dadurch wirken sich Änderungen einzelner Punkte auch nur auf einige wenige benachbarte Polynome aus.

Bestimmung des Parametervektors

Im ersten Schritt muss jeder Stützstelle ein Parameterwert zugeordnet werden. Für eine gute Annäherung des ursprünglichen Kurvenverlaufs und zur Vereinfachung der weiteren Verarbeitung der Splines in der NC-Steuerung ist es sinnvoll, die Parameter in Abhängigkeit von der geometrischen Länge zwischen den Stützstellen zu wählen (Bild 12.12). Dazu werden zunächst die Sehnenlängen h_i zwischen den Stützstellen berechnet:

$$h_0 = 0$$
$$h_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \qquad (12.37)$$
$$i = 1(1)\, m$$

Durch das Aufaddieren erhält man die globalen Parameter u_i für die sogenannte chordale Parametrierung:

$$u_i = \sum_{j=0}^{i} h_j, \qquad i = 1(1)\, m \qquad (12.38)$$

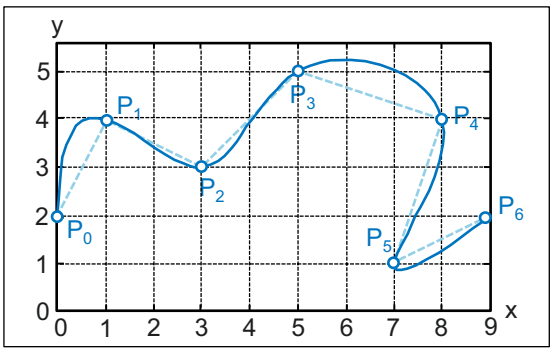
Globales Verfahren

Aus der Anforderung, dass die Kurve durch die vorgegebenen Punkte laufen soll, ergibt sich für die Spline-Segmente die Randbedingung:

$$S_i(u_i) = P_i$$
$$S_i(u_{i+1}) = P_{i+1} \qquad \text{für } i = 0(1)\, m-1 \qquad (12.39)$$

Da sowohl das Segment S_i als auch das Segment S_{i+1} durch den Punkt P_{i+1} laufen, ist durch diese Randbedingung auch die Berührstetigkeit sichergestellt. Weitere Randbedingungen entstehen aus höheren Stetigkeitsanforderungen. Übliche Vorgaben für kubische Splines sind tangentiale Stetigkeit oder Krümmungsstetigkeit. Tangentiale Stetigkeit wird durch gleiche Werte der ersten Ableitung der im aktuellen Punkt aneinandergrenzenden Polynome sichergestellt. Daraus ergeben sich im Punkt *i*:

xy-Ebene

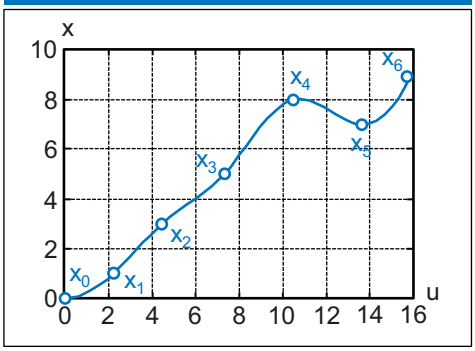


P	x	y	h	u
0	0	2	0,000	0,000
1	1	4	2,236	2,236
2	3	3	2,236	4,472
3	5	5	2,828	7,300
4	8	4	3,162	10,462
5	7	1	3,162	13,624
6	9	2	2,236	15,860

Legende

P: Stützstellen h: lokaler Parameter u: globaler Parameter

Parametrische Darstellung x(u)



Parametrische Darstellung y(u)

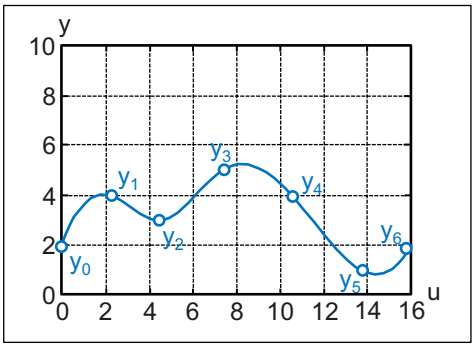


Bild 12.12 Parametrische Darstellung eines Polynomsplines

$$S_i'(u_i) = S_{i-1}'(u_{i+1}) \qquad \text{für } i = 1(1)\, m-1 \tag{12.40}$$

Diese Auflage erzeugt Bahnen, die bei konstanter Bahngeschwindigkeit einen unendlichen Ruck erzeugen können. Bei kubischen Funktionen kann man maximal vier Randbedingungen vorgeben. Daher müssen bei zusätzlicher Vorgabe von Krümmungsstetigkeit alle Punkte bzw. Intervalle gleichzeitig berücksichtigt werden, wodurch sich die höhere Stetigkeit global generierter Splines begründet:

$$S_i''(u_i) = S_{i-1}''(u_{i+1}) \qquad \text{für } i = 1(1)\, m-1 \tag{12.41}$$

Aufgrund der Gleichung (12.39), (12.40) und (12.41) ergeben sich $4(n-1)-2$ Randbedingungen für die gesuchten $4(n-1)$ Koeffizienten. Es verbleiben also zwei freie Randbedingungen in den Randpunkten. Eine häufig verwendete Festlegung ist es hier, die Krümmung zu null zu setzen. Ein so definierter Spline wird auch als natürlicher kubischer Spline bezeichnet. Solche Kurvenverläufe weisen an ihren Übergängen ein endliches Ruckverhalten auf.
Mit

$$\begin{aligned} h_i &= u_{i+1} - u_i \\ i &= 0(1)\, m-1 \end{aligned} \tag{12.42}$$

ergibt sich für die Koeffizienten des Polynoms:

$$\begin{aligned} x_i(u) &= a_{x,i} + b_{x,i}\cdot(u-u_i) + c_{x,i}\cdot(u-u_i)^2 + d_{x,i}\cdot(u-u_i)^3 \\ y_i(u) &= a_{y,i} + b_{y,i}\cdot(u-u_i) + c_{y,i}\cdot(u-u_i)^2 + d_{y,i}\cdot(u-u_i)^3 \\ z_i(u) &= a_{z,i} + b_{z,i}\cdot(u-u_i) + c_{z,i}\cdot(u-u_i)^2 + d_{z,i}\cdot(u-u_i)^3 \end{aligned} \tag{12.43}$$

und beispielhaft für die x-Achse:

$$\begin{aligned} a_{x,i} &= x(u_i) \\ i &= 0(1)\, m \end{aligned}$$

Aufgrund der Voraussetzung, dass die Krümmung an den Eckpunkten gleich null sein muss, gilt:

$$c_{x,0} = c_{x,m} = 0$$

Für $i = 0(1)m-1$:

$$h_{i-1}c_{x,i-1} + 2c_{x,i}(h_{i-1}+h_i) + h_i c_{x,i+1} = \frac{3}{h_i}(a_{x,i+1}-a_{x,i}) - \frac{3}{h_{i-1}}(a_{x,i}-a_{x,i-1})$$

Für $i = 0(1)m-1$:

$$h_{i-1}c_{x,i-1} + 2c_{x,i}(h_{i-1}+h_i) + h_i c_{x,i+1} = \frac{3}{h_i}(a_{x,i+1}-a_{x,i}) - \frac{3}{h_{i-1}}(a_{x,i}-a_{x,i-1})$$

Für $i = 0(1)\, m-1$:

$$d_{x,i} = \frac{1}{3h_i}(c_{x,i+1} - c_{x,i}) \tag{12.44}$$

wobei die Koeffizienten a_n und c_n lediglich formal gesetzt werden. Die Gleichungen (12.44) lassen sich als tridiagonales Gleichungssystem von $m-1$ Gleichungen (Gleichung (12.45)) darstellen, das mit den genannten Randbedingungen, z. B. unter Verwendung der Gauß-Elimination, eindeutig gelöst werden kann [ENGE96]. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die ermittelten Spline-Segmente tangenten- und krümmungsstetig verbunden sind. Dies ist besonders vorteilhaft für die Maschinenkinematik, da z. B. bei konstanter Bahngeschwindigkeit der Verlauf der Bahnbeschleunigung stetig ist. Nachteilig ist jedoch der relativ hohe Rechenaufwand zur Lösung des tridiagonalen Gleichungssystems und die Tatsache, dass die Änderung einzelner Punkte die gesamte Bahn in ihrem Verlauf beeinflusst. Auch steigt der Rechenaufwand mit wachsender Zahl der Segmente bzw. Punkte an. Dies ist insbesondere für die echtzeitkritischen Berechnungen im Interpolator numerischer Steuerungen problematisch.

$$Ac = g \qquad mit$$

$$A = \begin{pmatrix} 2(h_0+h_1) & h_1 & & & & \\ h_1 & 2(h_1+h_2) & h_2 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & h_{m-3} & 2(h_{m-3}+h_{m-2}) & h_{m-2} & \\ & & & h_{m-2} & 2(h_{m-2}+h_{m-1}) \end{pmatrix}$$

$$c = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{m-2} \\ c_{m-1} \end{pmatrix} \tag{12.45}$$

$$g = \begin{pmatrix} \frac{3}{h_1}(a_{x,2}-a_{x,1}) - \frac{3}{h_0}(a_{x,1}-a_{x,0}) \\ \frac{3}{h_2}(a_{x,3}-a_{x,2}) - \frac{3}{h_1}(a_{x,2}-a_{x,1}) \\ \vdots \\ \frac{3}{h_{m-2}}(a_{x,m-1}-a_{x,m-2}) - \frac{3}{h_{m-3}}(a_{x,m-2}-a_{x,m-3}) \\ \frac{3}{h_{m-1}}(a_{x,m}-a_{x,m-1}) - \frac{3}{h_{m-2}}(a_{x,m-1}-a_{x,m-2}) \end{pmatrix}$$

Lokales Verfahren nach Akima

Die genannten Nachteile weisen lokale Verfahren nicht auf. Sie ermöglichen in der Regel jedoch nur Tangentenstetigkeit. Die zur Berechnung eines kubischen Polynoms fehlenden Randbedingungen werden entweder aus wenigen benachbarten Punkten oder aus geometrieunabhängigen Kriterien ermittelt. Beispielhaft wird hier das häufig verwendete Verfahren von Akima vorgestellt [AKIM70].

Durch dieses 1970 entwickelte Verfahren wird ein tangentenstetiger Verlauf des Splines sichergestellt. Der Spline ist darüber hinaus sehr formtreu, d. h. er verläuft relativ glatt, und ein Überschwingen wird vermieden [HOSC92; SPÄT90]. Das Verfahren wird rein geometrisch begründet, ◘ Bild 12.13. Hier wird beispielhaft die Interpolation in der

x-Koordinate betrachtet. Die Nummern $i = k - 2$, $k - 1$, k, $k + 1$, $k + 2$ von inneren Punkten (u_i, x_i) werden hier mit 1, 2, 3, 4, 5 bezeichnet.

A sei nun der Schnittpunkt der Geraden durch die Punkte 1 und 2 mit der durch 3 und 4, B der Schnittpunkt der Geraden durch die Punkte 2 und 3 sowie 4 und 5. C sei der Schnittpunkt einer gesuchten Geraden durch den Punkt 3 mit der Geraden durch 1 und 2, D derjenige derselben gesuchten Geraden mit der Geraden durch die Punkte 4 und 5. Die gesuchte Steigung $p_{3,x}$ im Punkt 3 wird dann durch die Vorgabe der Streckenverhältnisse:

$$\left|\frac{\overline{2C}}{\overline{CA}}\right| = \left|\frac{\overline{4D}}{\overline{DB}}\right| \tag{12.46}$$

ermittelt. Bezeichnet man nun die Koordinaten der Punkte 1, 2, 3, 4, 5, A, B, C und D im Bild 7.13 mit den Indizes 1, 2, 3, 4, 5, a, b, c und d, so lässt sich $p_{3,x}$ durch:

$$p_{3,x} = \frac{x_d - x_c}{u_d - u_c} \tag{12.47}$$

definieren. Unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse der Punkte A bis D kann dann die Steigung $p_{i,x}$ im Punkt (u_i, x_i) allgemein unter Verwendung der Sehnensteigungen m_i:

$$m_{i,x} = \frac{x_{i+1} - x_i}{u_{i+1} - u_i} \tag{12.48}$$

durch:

$$p_{i,x} = \frac{\left|m_{i+1,x} - m_{i,x}\right| \cdot m_{i-1,x} + \left|m_{i-1,x} - m_{i-2,x}\right| \cdot m_{i,x}}{\left|m_{i+1,x} - m_{i,x}\right| + \left|m_{i-1,x} - m_{i-2,x}\right|} \tag{12.49}$$

berechnet werden. Die Berechnung der Steigungen an den Randpunkten muss gesondert erfolgen. Dabei werden zumeist spezielle Annahmen über das Verhalten des Splines an seinen Rändern gemacht.

Eigenschaften

Bild 12.14 zeigt beispielhaft den Verlauf eines kubischen Polynomsplines. Der Spline durchläuft die Stützstellen P_i. Die Stützstellen markieren dabei den Übergang zwischen zwei Spline-Segmenten. Die Stetigkeit des Splines hängt von dem Verfahren ab, mit dem der Spline generiert wurde (vgl. ▶ Kap.): Das globale Verfahren erzeugt krümmungsstetige Splines, lokale Verfahren wie das Akima-Verfahren lediglich tangentenstetige (Sub-)Splines.

Für die Programmierung eines kubischen Polynomsplines werden pro Segment das Parameterintervall und für

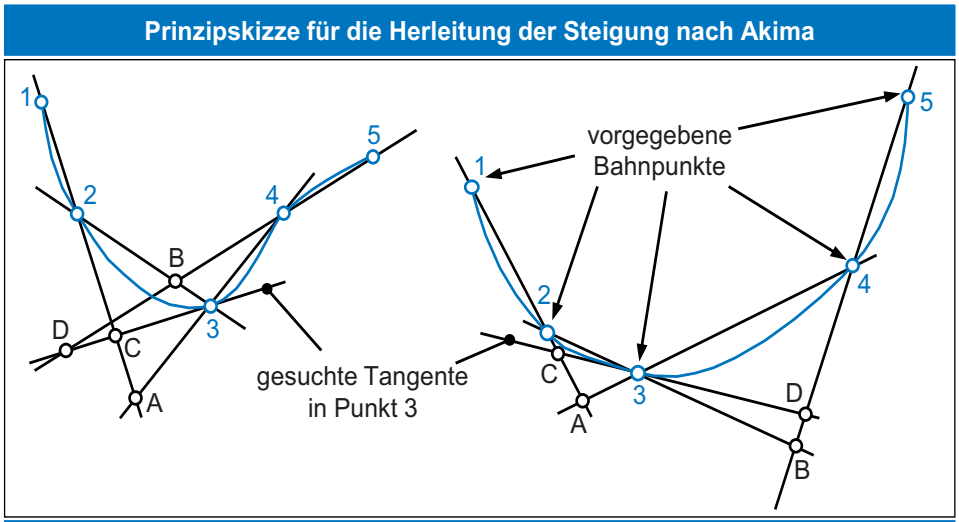
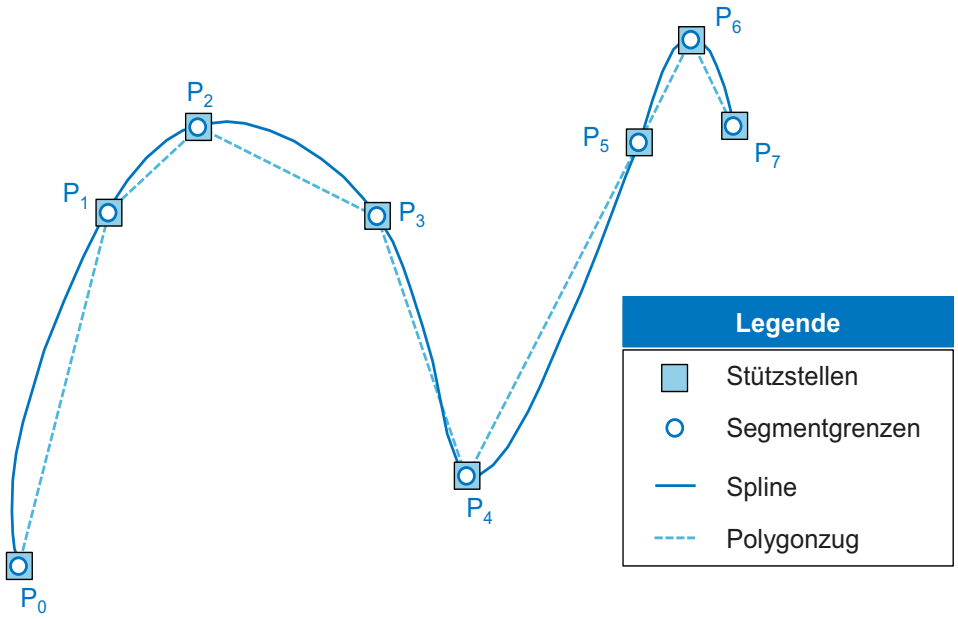


Bild 12.13 Geometrische Verhältnisse für die Herleitung der Steigung nach Akima (nach [SPÄT90])

Bild 12.14 Kubischer Polynomspline



jede geometrische Dimension die vier Polynomkoeffizienten benötigt. Eine potenzielle Fehlerquelle entsteht dabei durch die begrenzte Anzahl von signifikanten Stellen und damit verbundene Rundungsfehler, die bei der Auswertung des Splines zu Unstetigkeiten im Segmentübergang führen können.

Man kann jedoch die Berührstetigkeit sicherstellen, indem man nur drei Polynomkoeffizienten direkt angibt und den vierten mit der stetigen Anschlussbedingung aus dem vorhergehenden NC-Satz berechnet.

Die Auswertung von Polynomsplines vom Grad n kann effizient mit dem Horner-Schema durchgeführt werden, bei dem für eine Splinefunktion in einer Koordinate lediglich

$$Z = 2n \tag{12.50}$$

Operationen (Addition/Multiplikation) erforderlich sind. Ein kubischer Polynomspline im Raum lässt sich also für einen vorgegebenen Parameterwert mit 18 Operationen auswerten.

12.1.4.2 B-Splines

B(asis)-Splines sowie die B-Spline-Interpolation werden von aktuellen NC-Steuerungen zur Bahnführung unterstützt. In der industriellen Praxis dienen sie jedoch aktuell meist nur als Schnittstellenformat bei der NC-Bearbeitung, d. h. eine steuerungsinterne Interpolation von Stützstellen durch B-Splines wird nur vereinzelt eingesetzt. Im Folgenden wird zunächst auf die integralen B-Splines eingegangen. Im ▶ Kap. 12.1.4.3 wird dann die komplexere rationale Form kurz vorgestellt. Beide Varianten kommen in der NC-Technik zum Einsatz.

Definition

B-Spline-Kurven, kurz B-Splines, beruhen auf den B-Spline-Funktionen als Basis-Funktionen. Zur Definition von B-Spline-Funktionen vom Grad n sind ein Parametervektor U (Träger- oder Knotenvektor genannt) und m+1 Raumpunkte, die sogenannten de-Boor-Punkte, notwendig. Der Knotenvektor U besteht aus k+1 geordneten Knotenwerten:

$$U = \{u_0, u_1, \ldots, u_k\}, \qquad u_0 \le u_1 \le \ldots \le u_k \tag{12.51}$$

Die Knotenwerte müssen lediglich Monotonie, jedoch keine strenge Monotonie aufweisen, d. h. Knotenwerte können mehrfach vorkommen. Eine eindeutige Bindung der Parameterwerte an die Stützstellen, wie sie bei den Polynomsplines vorliegt, ist hier nicht gegeben. Die B-Spline-Funktionen sind rekursiv auf Basis des Knotenvektors U für die Funktionen nullten Grades definiert durch:

$$N_i^0(u) = \begin{cases} 1 & \text{für } u \in [u_i, u_{i+1}) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \qquad j = 0(1)\,k-1 \tag{12.52}$$

und für die Funktionen höheren Grades durch:

$$N_i^n(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+n}-u_1} N_i^{n-1}(u) + \frac{u_{i+n+1}-u}{u_{i+n+1}-u_{i+1}} N_{i+1}^{n-1}(u)$$

$$\text{mit: } i = 0(1)\,k-n-1 \tag{12.53}$$

$$\frac{0}{0} := 0$$

Eine B-Spline-Kurve definiert sich über die B-Spline-Funktionen N_i^n und die de-Boor-Punkte P_i:

$$S_i(u) = \sum_{i=0}^{m} P_i N_i^n(u) \tag{12.54}$$

Ein Beispiel soll diese Definition veranschaulichen: Gegeben sei der Knotenvektor $U = \{0, 0, 0, 1, 2, 3, 3, 3\}$. Dieser Knotenvektor definiert drei von null verschiedene Intervalle [0, 1], [1, 2] und [2, 3], da die ersten bzw. letzten drei Knoten zusammenfallen. Nach Gleichung (12.52) haben die Basisfunktionen in den von null verschiedenen Intervallen den konstanten Wert 1, die restlichen Basisfunktionen liefern den Wert 0:

$$\begin{aligned}
N_0^0(u) &= 0 \\
N_1^0(u) &= 0 \\
N_2^0(u) &= \begin{cases} 1, & u \in [0,1) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
N_3^0(u) &= \begin{cases} 1, & u \in [1,2) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
N_4^0(u) &= \begin{cases} 1, & u \in [2,3) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
N_5^0(u) &= 0 \\
N_6^0(u) &= 0
\end{aligned} \tag{12.55}$$

Aus der rekursiven Definition der Basis-Funktionen höheren Grades in Gleichung (12.53) folgt, dass sich die Anzahl der Basisfunktionen mit jedem weiteren Grad um jeweils eine Funktion reduziert. Für die Basis-Funktionen ersten Grades ergibt sich:

$$\begin{aligned}
N_0^1(u) &= 0 \\
N_1^1(u) &= \begin{cases} 1-u, & u \in [0,1) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
N_2^1(u) &= \begin{cases} u, & u \in [0,1) \\ 2-u, & u \in [1,2) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
N_3^1(u) &= \begin{cases} u-1, & u \in [1,2) \\ 3-u, & u \in [2,3) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
N_4^1(u) &= \begin{cases} u-2, & u \in [2,3) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\
N_5^1(u) &= 0
\end{aligned} \tag{12.56}$$

für die Funktionen zweiten Grades:

$$N_0^2(u) = \begin{cases} (1-u)^2, & u \in [0,1) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$N_1^2(u) = \begin{cases} u(1-u) + u(2-u)/2, & u \in [0,1) \\ (2-u)^2/2, & u \in [1,2) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$N_2^2(u) = \begin{cases} u^2/2, & u \in [0,1) \\ \big(u(2-u) + (3-u)(u-1)\big)/2, & u \in [1,2) \\ (3-u)^2/2, & u \in [2,3) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \tag{12.57}$$

$$N_3^2(u) = \begin{cases} (u-1)^2/2, & u \in [1,2) \\ \big((u-1)(3-u) + (3-u)(u-2)\big)/2, & u \in [2,3) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$N_4^2(u) = \begin{cases} (u-2)^2, & u \in [2,3) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Der Verlauf dieser Basis-Funktionen zweiten Grades ist in Bild 12.15 wiedergegeben. Es lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Basis-Funktionen vom Grad n sind $(n-1)$-mal stetig differenzierbar, sofern alle Knoten nur einfach auftreten, d. h. die Knoten streng monoton geordnet sind. Um bei der NC-Bearbeitung ein stetiges Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofil zu erreichen, müssen daher krümmungsstetige Basis-Funktionen dritten Grades vorliegen, wobei innere Knoten nur einfach auftreten.
- Zwischen dem Grad der Funktion n, der Anzahl der de-Boor-Punkte $m+1$ und der Anzahl der Parameterwerte $k+1$ besteht der Zusammenhang:

$$k + 1 = m + 1 + n + 1 \tag{12.58}$$

  Da bei der NC-Bearbeitung sowohl die Anzahl der Punkte als auch der Grad der Funktion aufgrund der Stetigkeitsanforderungen festgelegt sind, lässt sich die notwendige Anzahl der Knoten durch Gleichung (12.58) bestimmen.
- Basis-Funktionen n-ten Grades sind nur auf einem begrenzten Trägerintervall $[x_i, x_{i+1+n}]$ definiert. Aus der Definition der B-Splines Gleichung (12.54) ergibt sich damit ein lokaler Einfluss der de-Boor-Punkte auf den Kurvenverlauf.

Eigenschaften

In Bild 12.16 ist der Verlauf eines B-Splines dritten Grades beispielhaft dargestellt. Der B-Spline durchläuft (interpoliert) die de-Boor-Punkte nicht, sondern approximiert sie lediglich. Es entstehen damit Konturverletzungen, wenn die gegebenen Stützstellen auf der Kontur als de-Boor-Punkte gewählt werden. An den Rändern des Parameterbereichs verläuft der B-Spline nur dann durch den ersten, bzw. letzten de-Boor-Punkt, falls die Knoten am Rand $(n+1)$-fach auftre-

(Fortsetzung der Gleichung (12.57) in der nächsten Spalte.)

Bild 12.15 B-Spline-Funktionen

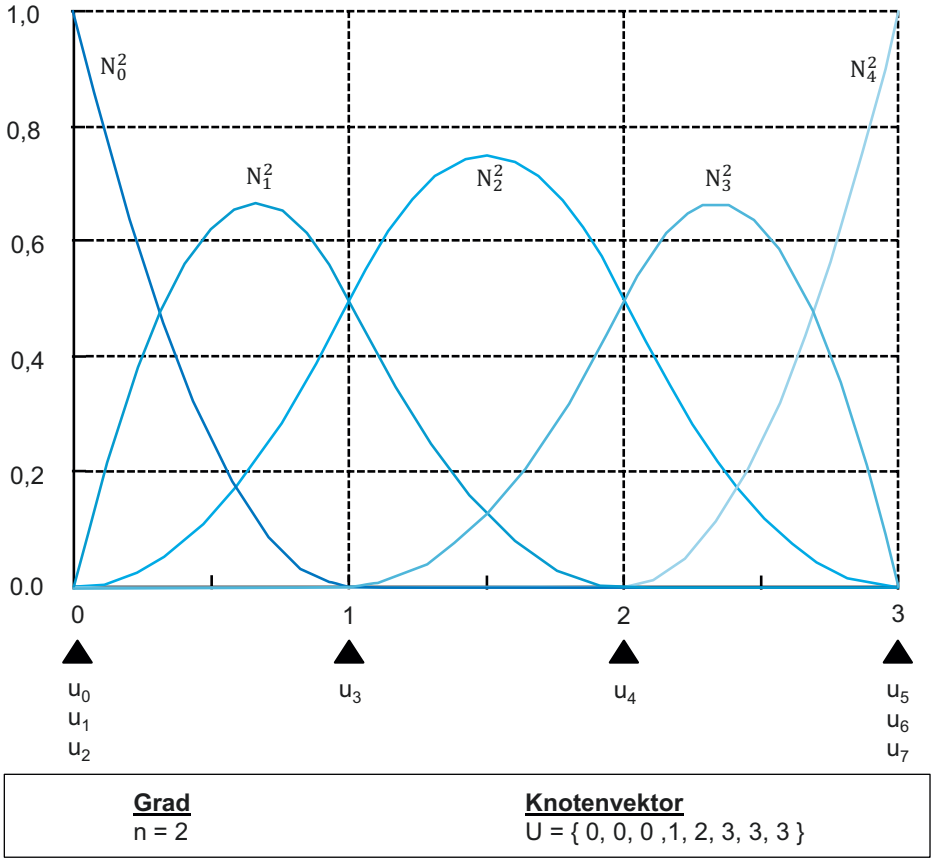
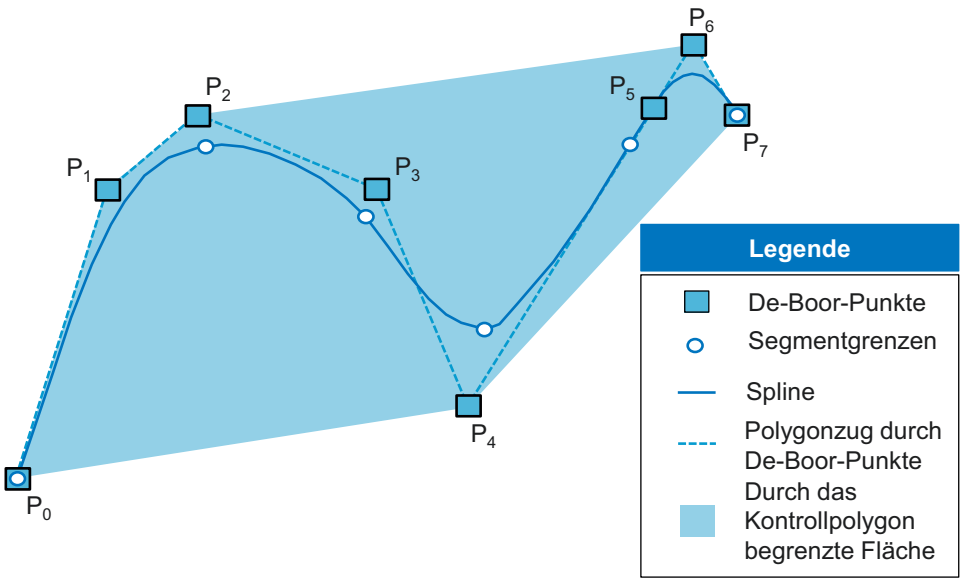


Bild 12.16 Kubischer B-Spline



ten. Die Bedingung muss bei der NC-Bearbeitung im Allgemeinen erfüllt sein, damit der geometrische Anschluss des Splines an den vorherigen und nächsten Verfahrsatz gewährleistet ist. Innerhalb des Parameterbereichs werden mehrfach auftretende Knoten vermieden, um die Stetigkeit nicht herabzusetzen.

B-Splines weisen weiterhin die für die NC-Bearbeitung positive Eigenschaft auf, dass der Spline vollständig innerhalb des Kontrollpolygons verläuft, welches durch die geradlinige Verbindung der de-Boor-Punkte gebildet wird. Die Kurve weist somit keine unerwünschten Schwingungen auf.

Die NC-Programmierung einer B-Spline-Kurve erfordert

die Angabe der m+1 de-Boor-Punkte und des Knotenvektors mit k+1 Knoten. Insgesamt müssen damit im räumlichen Fall nur $3(m + 1) + (k + 1)$ Werte angegeben werden. Dies sind deutlich weniger Werte als im Fall eines Polynomsplines, da dort pro Segment mehrere Polynomkoeffizienten angegeben werden müssen. Durch die interne Berechnung der Basis-Funktionen auf Grundlage des Knotenvektors stellt die begrenzte numerische Übergabegenauigkeit kein Problem dar.

Die Auswertung von B-Splines vom Grad n kann mit dem de-Boor-Verfahren durchgeführt werden [HOSC92], ohne dass die B-Spline-Basisfunktionen explizit berechnet werden müssen. Dies erfordert

$$Z = a\frac{7}{2}n(n+1) \tag{12.59}$$

Operationen, wobei a die geometrische Dimension bezeichnet. Im räumlichen Fall ($a=3$) sind also 126 Operationen erforderlich. Dies sind deutlich mehr Operationen, als die Auswertung von Polynomsplines erfordert (vgl. ► Kap. 6).

12.1.4.3 NURBS

Häufig werden bei der NC-Bearbeitung nicht integrale B-Splines sondern rationale B-Splines eingesetzt [FANU19; FIDI98; SIEM15]:

$$S_i(u) = \frac{\sum_{i=0}^{m} w_i P_i N_i^n(u)}{\sum_{i=0}^{m} w_i N_i^n(u)} \tag{12.60}$$

Hier treten mit w_i zusätzlich Gewichtsfaktoren auf, mit denen der Verlauf der Kurve beeinflusst werden kann. In Verbindung mit einem Knotenvektor, bei dem die Parameterintervalle nicht einheitlich sind, wird diese Form als NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline) bezeichnet.

NURBS sind im CAD-Bereich das dominierende Datenformat, weil sie zum einen über die de-Boor-Punkte und die Gewichte leicht interaktiv modellierbar sind und (im Gegensatz zu integralen B-Splines) auch beliebige Kegelschnitte mathematisch exakt beschreiben können. Im Rahmen der NC-Bearbeitung weisen sie jedoch trotz optimierter Verfahren [KLEI95] den Nachteil eines erhöhten Auswerteaufwands auf. Dass sie als Schnittstellenformat dennoch Verbreitung gefunden haben, ist auf das Bemühen zurückzuführen, ein durchgängig einheitliches Datenformat innerhalb der NC-Verfahrenskette vom CAD- über das CAM-System bis hin zur NC-Steuerung zu schaffen.

12.1.4.4 Auswertung von Splines

Nachdem die Splines abschnittsweise vorliegen, lässt sich die Spline-Interpolation in Anlehnung an ► Kap. 12.1 als Grobinterpolation mit anschließendem Interpolator ausführen. Diese Vorgehensweise weist vor allem bei der Verarbeitung sehr komplexer Splines einige Vorteile auf. Durch die Annäherung der Originalgeometrie durch die Grobinterpolation mit Hilfe einfacherer Elemente, wie z. B. Geraden, wird die Aufgabe der Geschwindigkeitsführung erheblich erleichtert und beschleunigt. Alternativ kann der Interpolator direkt, ohne vorgeschalteten Grobinterpolator, die programmierte Geometrie verarbeiten. In beiden Fällen wird dem Interpolator zumeist ein Feininterpolator in der oben beschriebenen Weise nachgeschaltet.

Die Grobinterpolation hat die Aufgabe, die Originalgeometrie derart in einfachere Geometrieelemente zu zerlegen, dass die entstehende Abweichung eine vorgegebene Toleranz bzw. Abweichung nicht überschreitet. Die Schwierigkeit besteht nun darin, mit möglichst geringem Rechenaufwand die sich ergebende Abweichung bei Vorgabe einer bestimmten Parameterschrittweite bzw. umgekehrt bei Vorgabe einer maximal erlaubten Abweichung die maximal mögliche Parameterschrittweite zu ermitteln. Man strebt eine möglichst große Schrittweite an, um die Zahl der entstehenden Elemente und damit die Datenmenge klein bzw. die für die Verarbeitung je Element zur Verfügung stehende Zeit möglichst groß zu halten.

Hier sei davon ausgegangen, dass der Spline in Geradenelemente zerlegt werden soll. Dann ergeben sich die iim ◘ Bild 12.17 dargestellten geometrischen Verhältnisse. Der die Parameterschrittlänge bestimmende Parameter ist die maximal zulässige Abweichung der Sollkurve von dem sich ergebenden Polygonzug, gemessen in Normalenrichtung zur Spline-Kurve. Ein übliches Verfahren besteht hier darin, zunächst die geometrische Schrittlänge näherungsweise aus der Annahme einer konstanten Krümmung, also eines Kreises, zu bestimmen. Der Zusammenhang zwischen Segmentbogenlängen L, Abweichung E und Krümmungsradius R ergibt sich mit dem Satz des Pythagoras zu:

$$L = 2R \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{E \cdot (2R - E)}}{R}\right) \tag{12.61}$$

Dazu muss entweder die größte Krümmung des Polynoms bestimmt werden oder die im jeweils aktuellen Punkt vorliegende Krümmung der Spline-Kurve berechnet und als in der Umgebung des Punktes konstant angenommen werden. Im ersteren Fall liegt die Schrittlänge auf der sicheren Seite, d. h. die entstehende Abweichung ist auf keinen Fall größer als die vorgegebene Toleranz. Die Schrittweite kann allerdings bei Kurven mit starker Krümmungsänderung im Mittel erheblich kürzer als erforderlich sein. Bei Berechnung auf der Basis der aktuellen Krümmung wird dieser Nachteil umgangen. Problematisch ist dann allerdings, dass erstens die ermittelte Schrittlänge zu groß berechnet werden kann. Dies ist immer dann der Fall, wenn die lokale Krümmungsänderung positiv ist. Zweitens ist die Berechnung aufwendiger, da die Ermittlung der lokalen Krümmung während der echtzeitkritischen

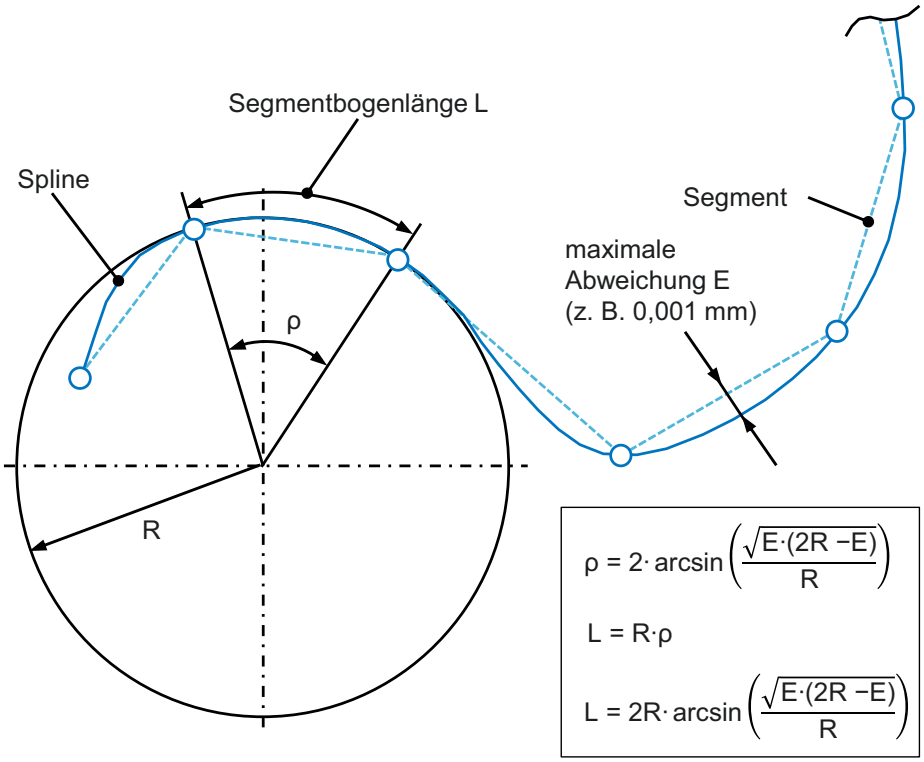


Bild 12.17 Spline-Kurve mit Grobinterpolation in Geradenelemente

Bearbeitung in jedem grobinterpolierten Punkt durchgeführt werden muss.

Die auf diese Weise ermittelte geometrische Schrittweite L muss nun in eine äquivalente parametrische Schrittweite Δu umgerechnet werden. Dies ist deshalb erforderlich, da die Spline-Funktionen in parametrischer Form vorliegen, das Ergebnis des vorhergehenden Rechenschrittes aber eine geometrische Länge ist. Auch hier bedient man sich zumeist Näherungsverfahren, da eine analytische Umrechnung nicht möglich ist. Alternativ einsetzbare numerische Verfahren zur Ermittlung der exakten Lösung scheiden aus, da sie sehr rechen- und damit zeitintensiv sind.

Es wird ein etwa linearer Zusammenhang zwischen der Bogenlänge und der parametrischen Schrittweite angenommen. Dadurch erhält man mit der geometrischen Schrittweite L, der gesuchten parametrischen Schrittweite Δu und der Bogenlängenfunktion s:

$$\frac{L}{\Delta u} = \frac{ds}{du} \tag{12.62}$$

$$s = \int \sqrt{\left(\frac{dx}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy}{du}\right)^2 + \left(\frac{dz}{du}\right)^2} \cdot du \tag{12.63}$$

$$\Delta u = f(L) = \frac{L}{\left(\frac{ds}{du}\right)} = \frac{L}{\sqrt{\left(\frac{dx}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy}{du}\right)^2 + \left(\frac{dz}{du}\right)^2}} \tag{12.64}$$

bzw. zusammenfassend mit der Ermittlung der geometrischen Schrittweite auf der Basis einer lokal konstanten Krümmung nach Gleichung (12.64):

$$\Delta u = \frac{2 \cdot R \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{E \cdot (2R - E)}}{R}\right)}{\sqrt{\left(\frac{dx}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy}{du}\right)^2 + \left(\frac{dz}{du}\right)^2}} \tag{12.65}$$

Andere Aufgaben und Funktionen folgen aus einer Interpolation und Geschwindigkeitsführung von Splines ohne vorgelagerte Grobinterpolation. Eine zeitgetaktete Geschwindigkeitsführung hat die Aufgabe, die Parameterschrittlänge je Interpolationstakt so zu berechnen, dass der gewünschte Bahngeschwindigkeitsverlauf entsteht. Dazu muss die Geschwindigkeitsführung unter Vorgabe des gewünschten Bogenschrittes eine entsprechende Parameterschrittweite ermitteln. Hierbei besteht jedoch die Schwierigkeit darin, dass die Bogenlänge als Funktion des Parameters schon für den einfachen Fall eines kubischen Polynoms nicht analytisch bestimmt werden kann. Die Bogenlänge einer parametrischen Funktion in x, y und z kann allgemein berechnet werden durch:

$$s(u) = \int_{u_0}^{u} \sqrt{\left(\dot{x}(u)\right)^2 + \left(\dot{y}(u)\right)^2 + \left(\dot{z}(u)\right)^2}\, dt \tag{12.66}$$

Aus dieser Definition der Bogenlänge und der eines parametrisch kubischen Polynoms ergibt sich zur Berechnung des

Parameters t aus der Bogenlänge ein elliptisches Integral, das im Allgemeinen nicht geschlossen lösbar ist [BRON84]. Unter der Annahme einer direkt proportionalen Abhängigkeit zwischen Parameterschrittweite und Bogenlängen ganzer Spline-Segmente ergeben sich erhebliche Geschwindigkeitsschwankungen.

Ein erster Lösungsansatz geht von einem lokal konstanten Verhältnis zwischen Parameter- und Bogenlängenschrittweite aus. In diesem Fall wird in einem ersten Schritt die der im aktuellen Takt gewünschten Bahngeschwindigkeit entsprechende Bogenlänge berechnet. In einem zweiten Schritt wird diese Bogenlänge mit Gleichung (12.64) näherungsweise in die entsprechende parametrische Schrittweite umgewandelt.

Eine weitere Methode besteht darin, die funktionale Abhängigkeit zwischen Bogenlänge und Parameterschrittweite abschnittsweise zu invertieren [LEI92]. Dazu wird die funktionale Abhängigkeit:

$$X(u) = (x, y, z)^T = f(u) \tag{12.67}$$

mit $u \approx g(s)$ erweitert zu:

$$X(u) = X(g(s)) \tag{12.68}$$

Die Aufgabe der Funktion $g(s)$ ist es, die Beziehung $u(s)$ anzunähern. Bei Vorgabe eines geeigneten $g(s)$ wird es möglich, für die Berechnung der Geschwindigkeitsführung näherungsweise die im ▶ Kap. 12.1.2 beschriebenen Algorithmen einzusetzen.

Bei heutigen Steuerungen ist häufig der erste Lösungsansatz realisiert. Dies bedeutet, dass für die Geschwindigkeitsführung einfache Algorithmen eingesetzt werden können, aber die Bahngeschwindigkeit nicht exakt konstant gehalten werden kann.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, steuerungsintern Polynomsplines zu berechnen, die näherungsweise mit der Bogenlänge parametriert sind [FAUS97]. Bei diesen Splines entspricht die parametrische Schrittweite der geometrischen Schrittweite. Damit entfällt die aufwendige Berechnung der inversen Bogenlängenfunktion nach Gleichung (12.68).

12.1.5 Sonstige Verfahren

Neben den genannten, gängigen Interpolationsverfahren gibt es einige weitere, die aus den Anforderungen bei der Herstellung bestimmter Werkstücke insbesondere im Bereich der dreiachsigen Fräsbearbeitung resultieren. So müssen für die Fertigung von Gewinden und Verzahnungen von der Steuerung Helix- und Evolventenbahnen erzeugt werden. Weitere Interpolationsverfahren sind die Parabelinterpolation sowie die Exponentialinterpolation.

Bis auf die Helixinterpolation, welche die Überlagerung einer Kreis- und einer Linearinterpolation darstellt, werden diese Interpolationsverfahren jedoch in der Praxis nur selten eingesetzt und sollen darum an dieser Stelle nicht eingehend behandelt werden.

12.2 Geometrische Transformationen

Unter diesem Begriff werden die translatorische und rotatorische Nullpunktverschiebung, die Werkzeugkorrektur sowie die für die fünfachsige Fräsbearbeitung erforderlichen Transformationen zusammengefasst. Dabei stellt die Werkzeugkorrektur einen Sonderfall dar. Ihre Aufgabe ist es nicht nur, eine Transformation z. B. für die Ermittlung des Werkzeugbezugspunktes aus dem Werkzeugberührpunkt durchzuführen. Sie führt gleichzeitig eine Überprüfung der programmierten Bahn auf mögliche Kollisionen mit der Werkstücksollkontur durch.

12.2.1 Nullpunktverschiebungen

Die Nullpunktverschiebung dient dazu, den Werkstücknullpunkt mit dem Maschinennullpunkt zur Deckung zu bringen

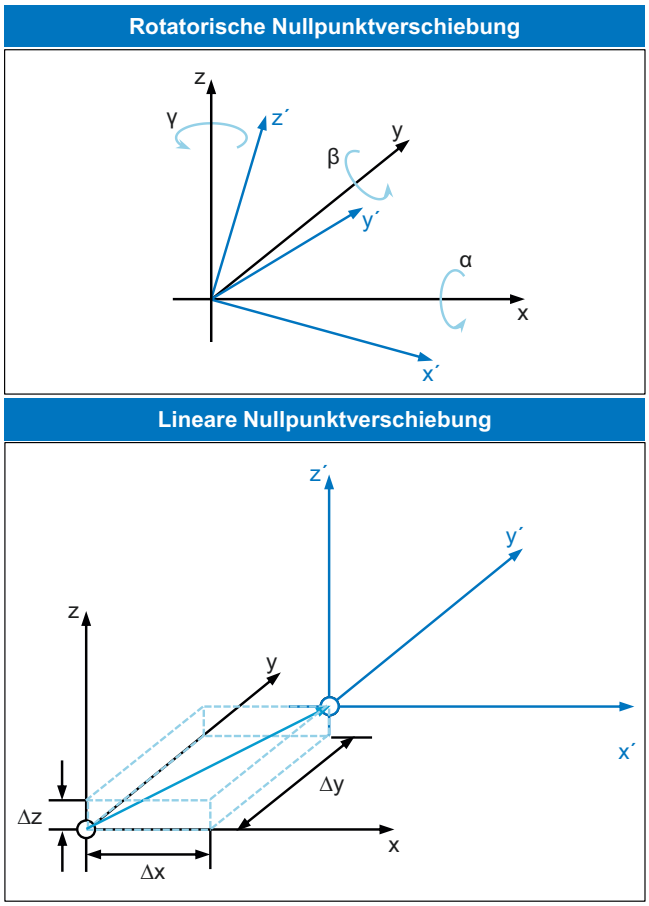


Bild 12.18 Lineare und rotatorische Nullpunktverschiebung

[DIN83]. Dazu wird die Differenz der beiden Positionen, wie bereits im ▶ Kap. 6 erläutert wurde, entweder als NC-Programmbefehl oder direkt an der Maschine eingegeben. Die Nullpunktverschiebung kann translatorisch und, falls erforderlich, rotatorisch erfolgen (■ Bild 12.18). In älteren und weniger leistungsfähigen Steuerungen ist zumeist nur die translatorische Nullpunktverschiebung möglich. Lineare Nullpunktverschiebungen werden in der Steuerung einfach durch Addition bzw. Subtraktion der axialen Verschiebungswerte verrechnet. Dabei wird der Wert der Nullpunktverschiebung zur Berechnung der neuen Position zu dem programmierten Weg vorzeichengerecht addiert.

Heute bieten die meisten NC-Steuerungen ebenfalls die Möglichkeit rotatorischer Koordinatenverschiebungen. Hierdurch können auch schief aufgespannte Werkstücke mit dem Original-NC-Programm bearbeitet werden. Da die rotatorische Koordinatenverschiebung nicht Bestandteil der standardisierten Programmierschnittstelle ist [DIN83], werden von unterschiedlichen Herstellern verschiedene Codes und Definitionen für die Eingabe dieser Werte verwendet. Die prinzipielle Vorgehensweise ist jedoch einheitlich. Zur Bestimmung einer linearen mit einer rotatorischen Verschiebung muss erstens der Drehpunkt und zweitens der Betrag der Drehungen eingegeben werden. Dazu werden in dem rechtshändigen Koordinatensystem der Maschine die Drehwinkel α, β und γ des Werkstücks um die ursprünglichen x-, y- und z-Achsen definiert. Die Maschinenkoordinaten werden hier als X, die transformierten oder Werkstückkoordinaten als X' bezeichnet. Damit ergeben sich für die Umrechnung einer Position aus dem transformierten also rotierten Koordinatensystem in das Maschinengrundsystem die Transformationsmatrizen der Einzeldrehungen:

$$R_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \qquad (12.69)$$

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Zusammenfassend ergibt sich der folgende Bezug, der den für die rotatorische Nullpunktverschiebung erforderlichen Berechnungen zu Grunde liegt:

$$X = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R \cdot X' = R \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \qquad (12.70)$$

X: Maschinenkoordinaten; X': Werkstückkoordinaten

$$R = \begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & -c_\beta s_\gamma & s_\beta \\ s_\alpha s_\beta c_\gamma + c_\alpha s_\gamma & -s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & -s_\alpha c_\beta \\ -c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta s_\gamma + s_\alpha c_\gamma & c_\alpha c_\beta \end{bmatrix} \qquad (12.71)$$

mit den Abkürzungen:

$$\begin{aligned} s_\alpha &:= \sin\alpha, & s_\beta &:= \sin\beta, & s_\gamma &:= \sin\gamma \\ c_\alpha &:= \cos\alpha, & c_\beta &:= \cos\beta, & c_\gamma &:= \cos\gamma \end{aligned} \qquad (12.72)$$

12.2.2 Werkzeugkorrekturen

Die Aufgabe der Werkzeugkorrektur ist es, die programmierte Sollbahn unter Berücksichtigung der aktuellen Werkzeuggeometrie so zu modifizieren, dass die gewünschte Geometrie ohne Kollision erzeugt wird (vgl. ▶ Kap. 11). Dazu kann man im Wesentlichen drei Arten der Werkzeugkorrektur unterscheiden:

- Werkzeuglängenkorrektur,
- Werkzeugradiuskorrektur in einer Ebene und
- vollständige 3D-Werkzeugkorrektur.

Die Aufgabe der Werkzeuglängenkorrektur ist es, bei der Bearbeitung die aktuelle Länge des Werkzeuges zu berücksichtigen. Dies geschieht durch die Addition eines im Werkzeugkorrekturspeicher abgelegten Wertes zu der programmierten Sollposition der betroffenen Maschinenachse. Die Werkzeuglängenkorrektur kann im Allgemeinen in gleicher Weise wie die translatorische Nullpunktverschiebung behandelt werden, da es sich auch bei ihr um die konstante Verschiebung einer Achse handelt. Ein Werkzeug, das länger ist als das, welches der Programmierung zu Grunde lag, führt zu einer positiven Werkzeuglängenkorrektur.

Wesentlich aufwendiger ist die Werkzeugradiuskorrektur, die zumeist in einer der drei Hauptebenen x/y, y/z oder z/x berechnet wird. Für ihre Definition sind die folgenden Parameter erforderlich:

- die Ebene, in der die Korrektur durchzuführen ist,
- der Werkzeugkorrekturspeicher, dem der Werkzeugradius für das entsprechende Werkzeug zu entnehmen ist,
- die Seite der programmierten Bahn, auf der sich, in Bewegungsrichtung des Werkzeuges gesehen, das Material befindet,
- der Beginn der Werkzeugradiuskorrektur sowie
- das Ende der Korrektur.

Aus den genannten Daten muss nun im Rahmen der Werkzeugradiuskorrektur eine Bahn berechnet werden, die die programmierte Bahn mit Hilfe des verfügbaren Werkzeuges so gut wie möglich annähert, ohne die programmierte Kontur zu verletzen. Wesentliche Teilaufgaben dazu sind:

- die Berechnung von äquidistant verschobenen Bahnen (Gerade parallelverschoben, Kreis mit größerem oder kleinerem Radius),

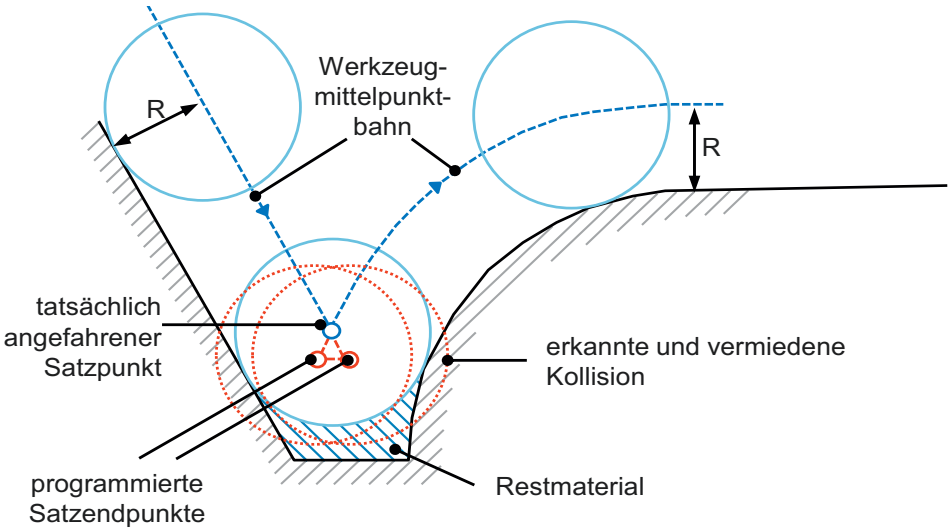


Bild 12.19 Kollisionsvermeidung als Teilaufgabe der Werkzeugradiuskorrektur

- das Einfügen von zusätzlichen Sätzen z. B. für Außenecken, Tab. 12.1, sowie die Kollisionserkennung und -vermeidung, Bild 12.19.

Das Einfügen von Sätzen zur Vermeidung von Konturverletzungen insbesondere bei Außenecken erfolgt üblicherweise entweder durch Ergänzung von Geradenelementen oder von Kreiselementen. Dabei hat das Einfügen von Geradenelementen gem. Tab. 12.1 den Vorteil, dass das Werkzeug während des Umfahrens der Ecke nicht in Kontakt mit der Endkontur ist. Der Vorteil des Einfügens von Kreisen liegt im minimalen Platzbedarf dieser Bewegung. Es kann jedoch zu örtlichen Überhitzungen des Materials an der Ecke führen, da das Werkzeug hier länger mit derselben Stelle des Materials in Kontakt bleibt.

Eine sehr wichtige Aufgabe, die im Allgemeinen ebenfalls innerhalb der ebenen Werkzeugradiuskorrektur gelöst wird, ist die Kollisionsvermeidung, Bild 12.19. Dazu wird in heutigen Steuerungen eine begrenzte Anzahl von Sätzen, z. B. drei, vorausschauend analysiert. Eine Kollision zwischen zwei Sätzen, die weiter als drei Bahnelemente auseinanderliegen, kann auf diese Weise allerdings nicht erkannt werden, Bild 12.10.

Scharfe Innenecken können selbstverständlich mit einem Umfangsfräsprozess, bedingt durch den endlichen Radius des Werkzeugs, nicht erzeugt werden. Es verbleibt eine Restmaterialmenge, die durch die Verwendung eines Werkzeugs mit kleinerem Radius zwar verringert, aber nicht vollständig entfernt werden kann.

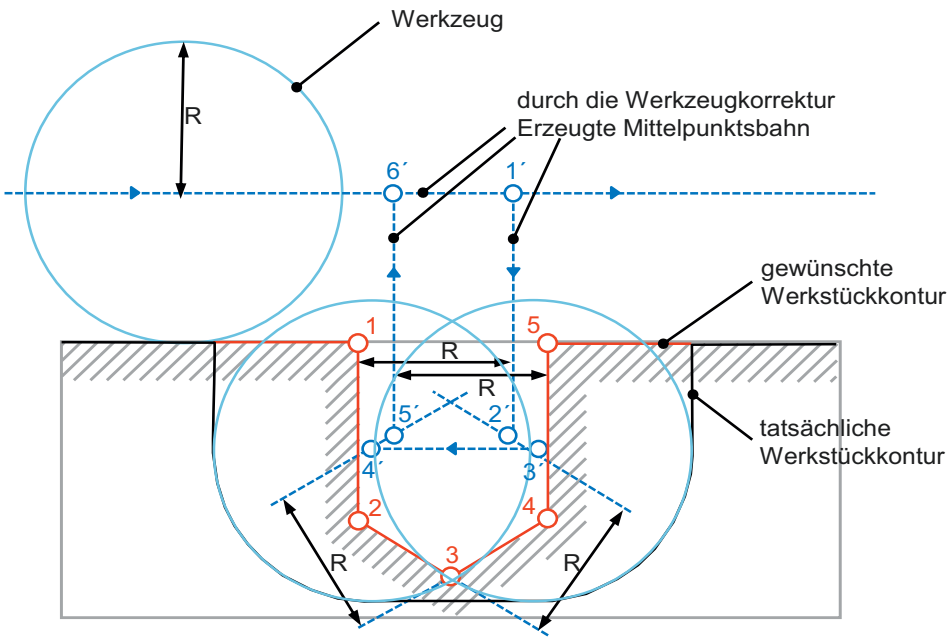


Bild 12.20 Nicht erkannte Kollision bei der Werkzeugradiuskorrektur

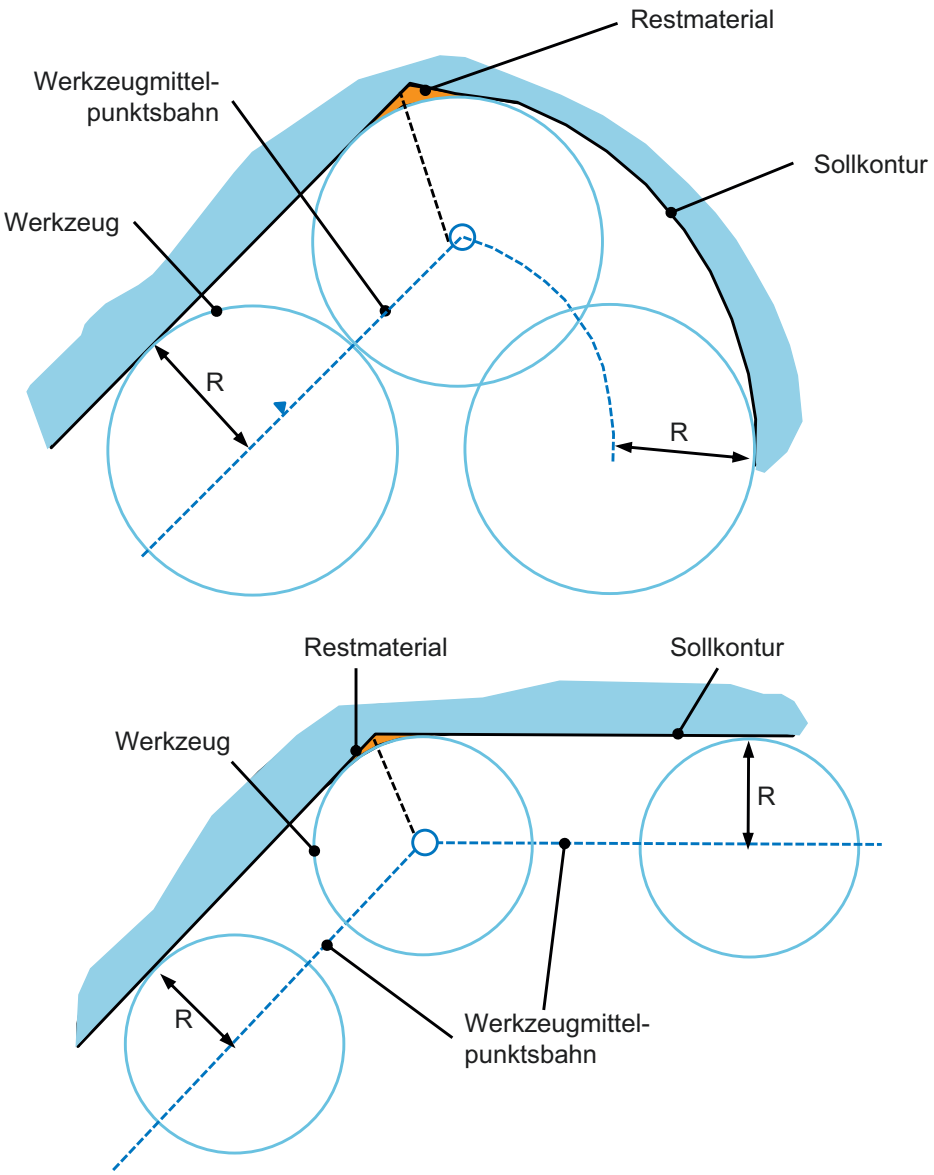


Bild 12.21 Innenecke einer ebenen Werkzeugradiuskorrektur mit Restmaterial

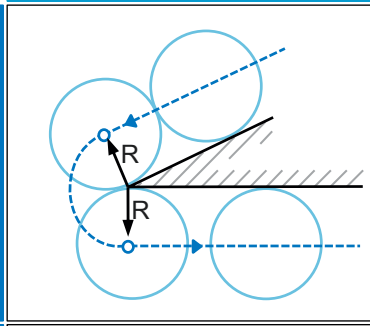
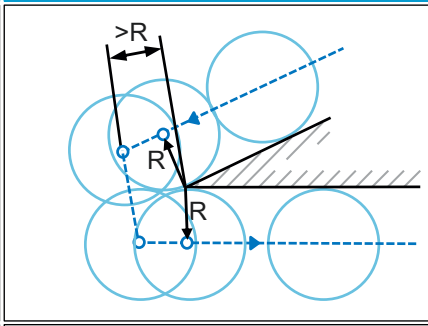
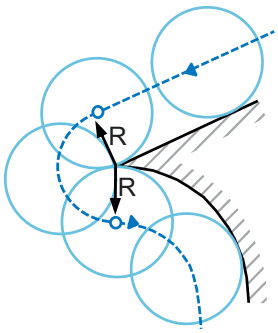
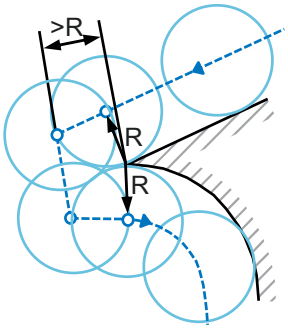
12.2.3 Kinematische Transformation für die Fünf-Achs-Fräsbearbeitung

Die NC-Programmierung wird in der Regel im vorgegebenen Werkstückkoordinatensystem durchgeführt (vgl. ▶ Kap. 11), um aufwendige manuelle Umrechnungen zu vermeiden. Damit das Werkzeug bei der Bearbeitung auf der programmierten Bahn geführt wird, muss die NC-Steuerung neben den schon angesprochenen Korrekturberechnungen eine Transformation der Verfahrbahn vom Werkstückkoordinatensystem (WKS) in das Maschinenkoordinatensystem (MKS) durchführen. Da das MKS durch die Maschinenkinematik festgelegt ist, spricht man dabei von der kinematischen Transformation. Unter Maschinenkinematik versteht man die Anordnung der Bewegungsachsen einer Maschine.

Bei der Fünf-Achs-Fräsbearbeitung soll das Werkzeug auch bei gekrümmten Formen oder Freiformflächen stets in einer technologisch vorteilhaften Orientierung zur Werkstückoberfläche geführt werden. Die Transformation muss deshalb neben der Position des Werkzeugs auch dessen Orientierung berücksichtigen.

Die Transformation vom WKS in das MKS wird als inverse Transformation oder Rückwärtstransformation bezeichnet. Sie muss für jeden Punkt durchgeführt werden, der vom Interpolator ausgewertet wird. Die inverse Transformation läuft daher zwingend im Interpolationstakt ab und muss deshalb entsprechend effizient implementiert sein. Im Gegensatz dazu werden bei der umgekehrten Transformation vom MKS in das WKS, der Vorwärtstransformation, in der Regel keine Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit gestellt. Sie wird benötigt, um aktuelle Lagewerte von den Antrieben im WKS zu erhalten und wird hauptsächlich zur Anzeige von Positionswerten und nachträglichen Prozessauswertung und -optimierung eingesetzt.

Tabelle 12.1 Werkzeugradiuskorrektur an einer Außenecke

Werkzeugradiuskorrektur an einer Außenecke		
	Einfügen eines Kreissegmentes	Einfügen von Geradenelementen
Übergang: Gerade-Gerade		
Übergang: Gerade-Kreis		

Die kinematische Transformation hängt direkt von der speziellen Maschinenkinematik ab, der verwendete Algorithmus muss also jeweils an die Werkzeugmaschine angepasst werden. Für häufig vorkommende Kinematiken ist diese Anpassung schon in der Steuerung implementiert und kann über Parameter selektiert werden. Bei einer seltenen oder neuartigen Kinematik kann aber auch eine komplette Neuimplementierung des Algorithmus erforderlich sein.

Die Kinematiken von Fräsmaschinen werden in drei Gruppen eingeteilt:

1. Die klassische Fräsmaschine basiert auf einer *seriellen Kinematik*, bei der die Maschinenachsen aufeinander aufbauen. Die serielle Kinematik wird dadurch charakterisiert, dass eine geradlinige Bewegung in einer Koordinate des MKS durch die Bewegung in nur einer Maschinenachse ausgeführt werden kann.
2. Neuere Konzepte für Fräsmaschinen führen die *parallele Kinematik* in den Werkzeugmaschinenbau ein. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Maschinenachsen durch eine gleichzeitige, parallele Bewegung eine Spindelplattform führen. Das kartesische MKS kann bei parallelen Kinematiken nicht durch die Anordnung der Maschinenachsen festgelegt werden, sondern wird relativ zum Maschinenbett definiert. Eine Bewegung in einer Koordinate des MKS kann nur durch die koordinierte Bewegung aller Achsen ausgeführt werden.
3. Bei *hybriden* Kinematiken werden beide Ansätze kombiniert, d. h. einige Achsen sind parallel, andere seriell angeordnet.

Im Vergleich zu seriellen Kinematiken erfordert die Berechnung der kinematischen Transformation für parallele Kinematiken im Allgemeinen einen erheblich höheren Rechenaufwand. Erst die Verfügbarkeit leistungsfähigerer Steuerungshardware in den letzten Jahren hat die Berechnung unter Echtzeitbedingungen ermöglicht, wodurch die Grundlage für den Einsatz paralleler Kinematiken im Bereich der Werkzeugmaschinen geschaffen wurde.

12.2.3.1 Serielle Kinematiken

Unter einer seriellen fünfachsigen Fräsmaschine versteht man eine Maschine, die über drei translatorische und zwei rotatorische Achsen verfügt. Die kinematische Transformation muss in diesem Fall Werkzeuglage und Orientierung in die Achskoordinaten der fünf Maschinenachsen umrechnen.

Diese Aufgabe wird bei heutigen Lösungen zumeist offline von einer Softwarekomponente des NC-Programmiersystems, dem sogenannten Postprozessor, durchgeführt (vgl. ► Kap. 11). Die Implementierung dieser Funktion in moderne Steuerungen ermöglicht eine Online-Berechnung der transformierten Bahn [FAUS97]. Für den Anwender bringt dies den Vorteil der Werkzeugkorrektur und Bahnaufteilung an der Maschine mit sich.

Bei der Berechnung und Herleitung der Transformationsgleichungen bedient man sich üblicherweise der aus dem Bereich der Robotertechnik bekannten Vorgehensweisen und Algorithmen. Besonders zu nennen sind hier die Denavit-Hartenberg-Notation und -Vorgehensweise für die Transformation der Position und Orientierung [ASAD86]. Da deren Darstellung Bestandteil des ▶ Kap. 13 ist, soll sie hier nicht vertiefend behandelt werden.

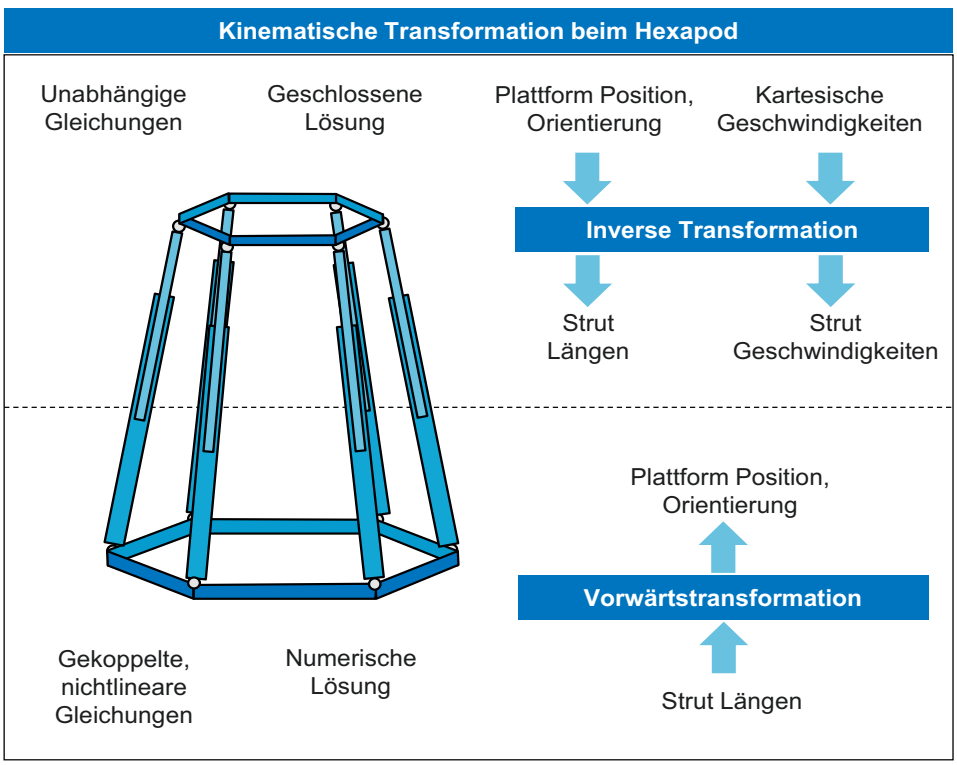
12.2.3.2 Parallele Kinematiken

Im Gegensatz zu Maschinen mit serieller Kinematik sind solche mit paralleler Kinematik nicht mehr intuitiv manuell vom Benutzer zu verfahren. Da im herkömmlichen Handbetrieb nur einzelne Aktoren bewegt werden können, kann der Benutzer auf diese Weise keine geradlinige Bewegung in einem kartesischen Koordinatensystem ausführen. Aus diesem Grund ist es notwendig, für Maschinen mit paralleler Kinematik ein virtuelles kartesisches Maschinenkoordinatensystem zu definieren und in diesem ein manuelles Verfahren zu ermöglichen. Diese Anforderung macht zwingend eine kartesische Transformation erforderlich, die online in der Steuerung gerechnet werden muss. Im Folgenden werden am Beispiel eines Hexapoden (vgl. ▶ Kap. 4.3.3, Band 1), einer der ersten Werkzeugmaschinen mit paralleler Kinematik, die mathematischen Ansätze beschrieben.

Grundvoraussetzung für den Betrieb von parallelen Maschinenkinematiken als Werkzeugmaschine ist die steuerungsseitige Umrechnung der gewünschten Position und Orientierung der Werkzeugplattform in die Stellgrößen der Aktoren, ◘ Bild 12.22. Beim Hexapod sind dies die sechs Längen der teleskopischen Beine (Struts). Diese inverse Transformation lässt sich für jeden Strut separat und geschlossen berechnen. Bei der Vorwärtstransformation, bei der umgekehrt aus den Beinlängen die Plattformposition errechnet wird, ist die Berechnung erheblich aufwendiger. Das sich hier ergebende nichtlineare Gleichungssystem lässt sich nur durch aufwendige numerische Verfahren lösen.

◘ Bild 12.23 zeigt die bei der Hexapodtransformation auftretenden Bezeichnungen. Die durch die konstruktive Ausführung des Hexapoden vorgegebenen Größen sind hierbei die Koordinaten der Drehpunkte der Kugel- bzw. Kardangelenke B_i und P_i. Die Gelenkpunkte B_i der Beine in der ortsfesten Basis werden im unbewegten Basiskoordinatensystem (x_B, y_B, z_B) angegeben, die entsprechenden Gelenkpunkte P_i der bewegten Werkzeugplattform im bewegten Koordinatensystem (x_P, y_P, z_P). Das verwendete Koordinatensystem wird durch den vorangestellten Index verdeutlicht, z. B. bedeutet ${}^{B}T$ die Angabe der translatorischen Verschiebung im Basiskoordinatensystem. Die translatorische Verschiebung der Plattform gegenüber der Basis wird durch den Vektor T angegeben, ihre Neigung durch die Rotationsmatrix R.

Die als Maschinenstellgröße bei der Bahninterpolation benötigte Länge der Beine l_i ergibt sich als Betrag des Beinvektors L_i, der sich in Basiskoordinaten durch die Vektorkette P_i, T und B_i darstellen lässt:



◘ **Bild 12.22** Kinematische Transformation beim Hexapod

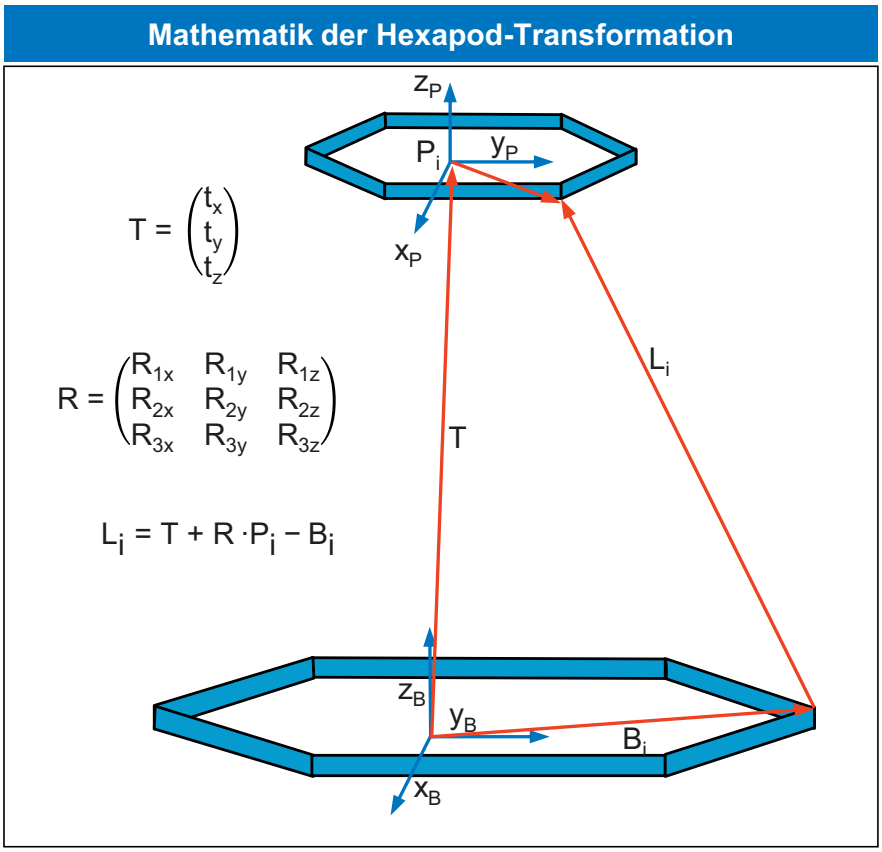


Bild 12.23 Mathematik der Hexapod-Transformation

12

$$l_i(t) = \left\| L_i(t) \right\| = \left\| R(t) \cdot {}^{P}P_i + {}^{B}T(t) - {}^{B}B_i \right\| \qquad (12.73)$$
$$= \sqrt{\left(R(t) \cdot {}^{P}P_i + {}^{B}T(t) - {}^{B}B_i \right) \cdot \left(R(t) \cdot {}^{P}P_i + {}^{B}T(t) - {}^{B}B_i \right)}$$

Eine geschlossen lösbare Gleichung für die Geschwindigkeitstransformation ergibt aus Gleichung (12.73) unter Verwendung des folgenden Zusammenhangs:

$$\frac{\delta}{\delta t}\left\| \vec{\lambda} \right\| = \frac{\delta}{\delta t}\sqrt{\vec{\lambda} \cdot \vec{\lambda}} = \frac{\vec{\lambda}}{\left\| \lambda \right\|} \cdot \frac{\delta \vec{\lambda}}{\delta t} \qquad (12.74)$$

zu

$$\frac{d}{dt} l_i(t) = \frac{\delta}{\delta t}\left\| L_i(t) \right\| = \frac{L_i(t)}{l_i(t)} \left(\frac{d}{dt}\left(R(t)^{P} \right) \cdot P_i + \frac{d}{dt} {}^{B}T(t) \right) \qquad (12.75)$$

Sie wird vor allem für die vorausschauende Geschwindigkeitsführung (vgl. ▶ Kap 2.2) benötigt. Dadurch können die Grenzwerte für die maximal zulässigen Achsgeschwindigkeiten bei der Festlegung des tatsächlichen Bahnvorschubs berücksichtigt werden. Hierbei ist die Rechenzeit weniger entscheidend. Wird dagegen bei der Regelung der Struts eine Geschwindigkeitsvorsteuerung eingesetzt, so werden die axialen Beingeschwindigkeiten ebenfalls im Interpolationszyklustakt benötigt.

Bei der Vorwärtstransformation werden bei gegebenen Beinlängen l_i die Lage und die Orientierung der Plattform gesucht. Die unbekannte Lage wird durch die drei Komponenten von T beschrieben. Die gesuchte Orientierung durch drei Winkel, die über die Winkelfunktionen verknüpft die Komponenten der Rotationsmatrix R (vgl. ▶ Kap. 11) ergeben:

$$\begin{aligned} l_1(t) &= \left\| R(t) \cdot {}^{P}P_1 + {}^{B}T(t) - {}^{B}B_1 \right\| \\ l_2(t) &= \left\| R(t) \cdot {}^{P}P_2 + {}^{B}T(t) - {}^{B}B_2 \right\| \\ &\cdots \\ l_6(t) &= \left\| R(t) \cdot {}^{P}P_6 + {}^{B}T(t) - {}^{B}B_6 \right\| \end{aligned} \qquad (12.76)$$

Aus diesen sechs Gleichungen lassen sich prinzipiell die sechs Unbekannten bestimmen. Da es sich um ein vollständig in den variablen Größen gekoppeltes, nichtlineares Gleichungssystem handelt, erfordert die Lösung aufwendige numerische Verfahren. Eine weitere Schwierigkeit stellt die Mehrdeutigkeit der Lösung dar. Aus einem Satz von sechs Beinlängen können sich bei einem Hexapoden durchaus verschiedene Stellungen der Plattform ergeben. Daher muss bei der Auswahl der richtigen Lösung zusätzliches Wissen über den speziellen Hexapoden eingebracht werden, wie z. B. die Erreichbarkeit der Position aus der Grundstellung oder die letzte Position, für die eine Transformationsberechnung erfolgte. In der Regel ist die Berechnung der Vorwärtstransformation nicht zeitkritisch, da sie meist nur einmalig für die Synchronisation von Soll- und Istwerten und für Anzeigezwecke benötigt wird. Für spezielle Anwendungen, wie z. B. das Nachführen oder eine achsübergreifende Mehrgrößenre-

gelung, ist jedoch eine Berechnung unter Echtzeitanforderungen notwendig.

In obigen Transformationsgleichungen lässt sich ohne großen Zusatzaufwand auch eine Werkzeuglängenkorrektur berücksichtigen. Werkzeugradiuskorrekturen und beliebige Verschiebungen und Drehungen der Werkstückkoordinaten sowie Kompensationen lassen sich unabhängig von der Hexapodtransformation behandeln, sodass diese Funktionalitäten unabhängig von der Kinematik sind und sich von Steuerungen für konventionelle Kinematiken übernehmen lassen. Durch die beschriebene Art der Online-Berechnung der Transformation in der Steuerung lässt sich prinzipiell jede Werkzeugmaschine mit Parallelkinematik für den Benutzer transparent sowohl im Handbetrieb wie auch NC-gesteuert in gleicher Weise wie eine kartesische Maschine verfahren.

12.3 Externe Lage- und Geschwindigkeitsbeeinflussung

12.3.1 Kompensation geometrischer Fehler

Während die Prozessregelung durch Verstellung technologischer Daten eine bessere Nutzung der Maschinenleistung durch prozessabhängige Anpassung von Schnittwerten verfolgt (vgl. ▶ Kap. 11), geht es bei der Regelung geometrischer Größen in erster Linie darum, die Fertigungsgenauigkeit zu verbessern bzw. zu garantieren. Es werden neben hoher Oberflächengüte der Werkstücke die Kompensation von Werkzeugverschleiß sowie von mechanisch und thermisch bedingten Verlagerungen als Ziele verfolgt.

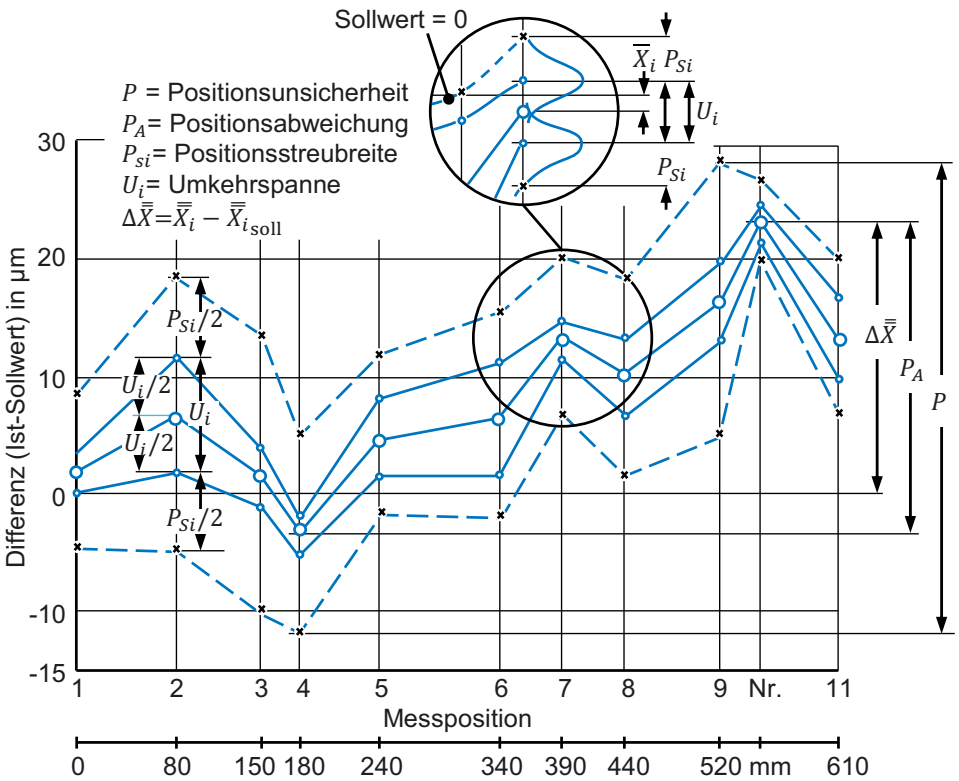
12.3.1.1 Kompensation geometrischer Fehler von Vorschubantrieben

Ungenauigkeiten der Glieder der hier beschriebenen kinematischen Kette zur Erzeugung der Vorschubbewegung führen letztendlich zu Abweichungen zwischen der programmierten Sollposition und der tatsächlich angefahrenen Ist-Position des Schlittens. Spindelsteigungsfehler der Kugelrollspindel, Lose der Lager, Führungen und Spindelmuttern, Stick-Slip-Effekte, elastische Verformungen der Antriebselemente sowie unzureichende Achsdynamik (z. B. Schleppfehler) und Fehler der Messsysteme können Ursachen dieser Abweichungen sein.

Messung der Positionierunsicherheit nach VDI/DGQ 3441

Bei der Messung der Positionierunsicherheit wird der tatsächliche Verfahrweg des Maschinenschlittens meist mit einem Laserinterferometer oder Stufenendmaß bestimmt und mit dem programmierten Sollweg verglichen. Dieses Vorgehen ist nach VDI/DGQ genormt und inzwischen auch in das internationale Normenwerk als DIN/ISO 230 aufgenommen worden (vgl. ▶ Band 2) [VDI77].

Als Ergebnis einer solchen Messung erhält man einen Messschrieb nach ◘ Bild 12.24. Für jeden Punkt einer Ver-



◘ **Bild 12.24** Grafische Darstellung der statistischen Kenngrößen mehrerer Messpositionen entlang einer gewählten Prüfachse

fahrachse können die systematische Abweichung Δx_i vom Sollwert, die Positionsstreubreite P_{si} sowie die Umkehrspanne U_i abgelesen werden.

Die systematischen Fehler, hervorgerufen durch den Spindelsteigungsfehler der Kugelrollspindel, Lose im Antriebsstrang sowie Fehler der Wegmesssysteme, führen zu den systematischen Fehlern Δx_i und U_i. Diese können steuerungstechnisch kompensiert werden. Die Positionsstreubreite P_{si} erfasst den zufälligen, statistischen Fehler, der beispielsweise durch den Stick-Slip-Effekt der Führung oder andere Reibungseffekte verursacht wird. Dieser zufällige Fehler lässt sich naturgemäß nicht kompensieren.

Umkehrspanne

Zur Losekompensation muss bei einem Vorzeichenwechsel der Verfahrrichtung in einer Achse lediglich ein konstanter Betrag, die Umkehrspanne, auf den zu verfahrenden Weg addiert bzw. subtrahiert werden, ◘ Bild 12.25. Dies geschieht einmalig bei jeder Achsrichtungsumkehr.

Am einfachsten bestimmt man die Umkehrspanne, indem ein Messtaster in die Werkzeugaufnahme eingewechselt wird und eine Achsposition mehrmalig von verschiedenen Richtungen angefahren wird. Die Differenz aus Hin- und Rückweg ergibt die Umkehrspanne und wird als Maschinenparameter abgelegt. Wie ◘ Bild 12.24 zeigt, ändert sich die Umkehrspanne jedoch in den meisten Fällen von Achsposition zu Achsposition. Eine bessere Kompensation wird gleichzeitig mit der Spindelsteigungsfehlerkorrektur erreicht.

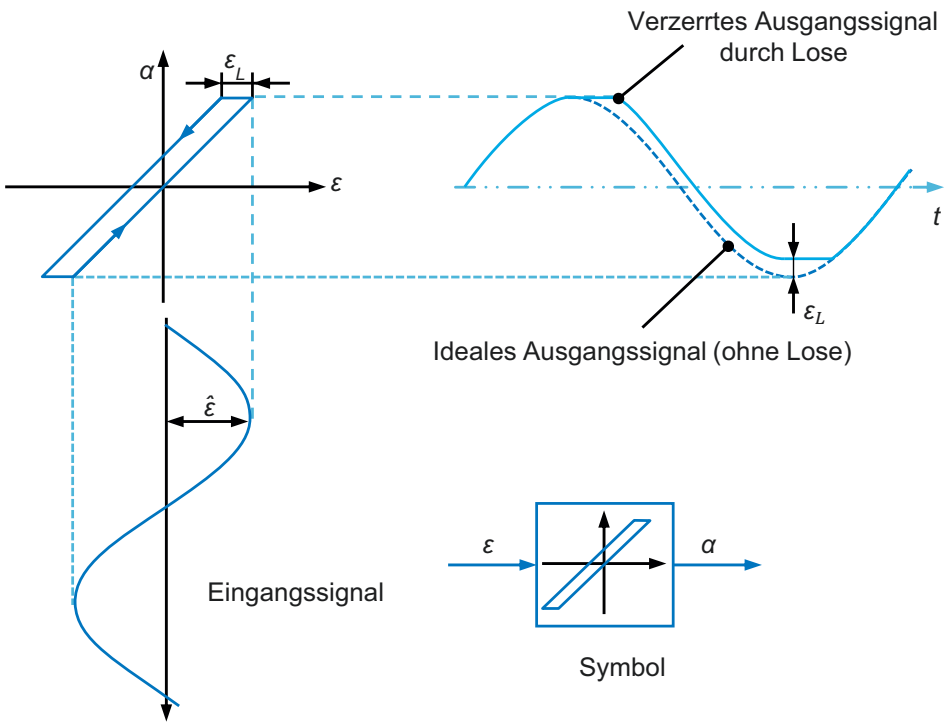
Spindelsteigungsfehler

Bei indirekten Wegmesssystemen (vgl. ▶ Kap. 2.2.2) können Steigungsfehler der Vorschubspindel steuerungstechnisch kompensiert werden. Dazu bieten die meisten Steuerungshersteller sogenannte Spindelsteigungsfehler-Korrekturtabellen an. Die Positionierunsicherheit der Maschinenachse wird zunächst nach VDI/DGQ 3441 vermessen. Anschließend werden die systematischen Abweichungen in einem meist festen Raster für Hin- und Rücklauf bestimmt und in die Korrekturtabelle eingetragen.

◘ Bild 12.26 zeigt die Messung der Positionierunsicherheit der x-Achse einer Drehmaschine. Durch die Kompensation können die systematischen Fehler, Positionsabweichung und Umkehrspanne, um 75 % reduziert werden. Da es sich bei der Positionsstreubreite um den zufälligen Fehleranteil handelt, kann dieser durch die Kompensation nicht verringert werden.

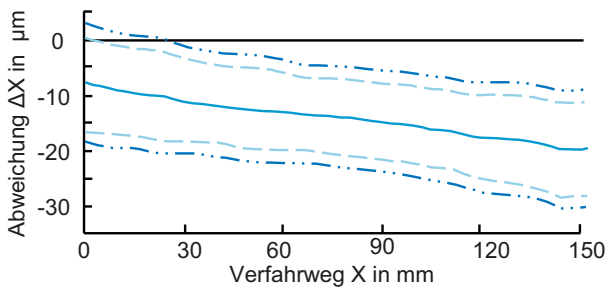
12.3.1.2 Kompensation thermischer Verlagerungen

Die zunehmenden Anforderungen an die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen machen es auch erforderlich, Maschinenverlagerungen aufgrund thermischer Einflüsse möglichst gering zu halten. Im Band 2 wird ausführlich auf die Einflüsse und die eingesetzte Messtechnik eingegangen. Wann immer möglich, sollte eine geeignete konstruktive Auslegung der Maschine zu geringen thermoelastischen Verformungen der Maschine führen. Um sie in engen Grenzen zu halten, muss ein wirtschaftlich oft nicht mehr vertretbarer



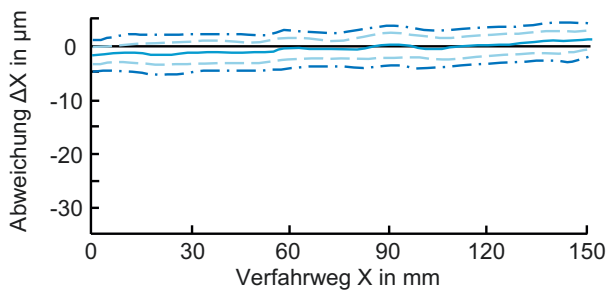
◘ **Bild 12.25** Kennlinie eines losebehafteten Schlittens

Ohne Kompensation



$P_A = 13{,}2\ \mu m$ $U_i = 15{,}2\ \mu m$ $P_S = 4{,}5\ \mu m$ $P = 34{,}8\ \mu m$

Mit Kompensation



$P_A = 2{,}9\ \mu m$ $U_i = 3{,}9\ \mu m$ $P_S = 3{,}0\ \mu m$ $P = 9{,}5\ \mu m$

Kompensationstabelle

X in mm	hin in µm	zurück in µm
0	16	-1
15	17	-1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
150	30	12

Legende

Positionsabweichung	P_A
Umkehrspanne	U
Positionsstreubreite	P_S
Positionsunsicherheit	P

Bild 12.26 Steuerungstechnische Kompensation systematischer Spindelsteigungsfehler über Korrekturtabellen

Aufwand getrieben werden (Hallenklimatisierung, Temperierung der Spindel, des Getriebes und des Kühlschmiermittels usw.). Hier kann die steuerungstechnische Verlagerungskompensation eine wirksame Maßnahme darstellen.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der direkten und der indirekten Kompensation. Bei der direkten Kompensation wird, entweder prozessintermittierend oder kontinuierlich, direkt die interessierende Verlagerung zwischen Werkstück und Werkzeug gemessen und als Regelgröße benutzt [SCHÄ93]. Bei der indirekten Kompensation wird über eine messbare Größe, meist die Temperatur, auf die Verlagerung geschlossen. Die gemessene Größe wird über ein mathematisches Verformungsmodell in Verlagerungen an der Zerspanstelle umgerechnet. Die errechneten Verlagerungen werden dann als Korrekturwerte von der Steuerung verarbeitet.

Direkte Kompensation

Bild 12.27 zeigt die direkte Kompensation der thermoelastischen Spindelstockverformung einer Konsolfräsmaschine. Die Maschine verfügt über ein lineares Wegmesssystem. Um den empfindlichen Glasmaßstab des Messsystems vor Verschmutzung und Beschädigung zu schützen, ist dieser hinter der Arbeitsraumverkleidung am Ende des Spindelstocks angebracht. Beim Betrieb der Hauptspindel erwärmt sich das Spindelstockgehäuse aufgrund der Verlustleistung der Lager und des Zahnradgetriebes.

Diese Erwärmung führt zu einer Spindelstockdehnung. Wäre der Maßstab fest mit dem hinteren Ende des Spindelstocks verbunden, würde diese Dehnung zu einer relativen Lageänderung des Werkzeugs im Maschinenkoordinatensystem in z-Richtung führen. Daher wird der Glasmaßstab in der z-Richtung beweglich an federnden Aufhängestreifen geführt und über einen Invar-Stab am vorderen Ende des Spindelstocks fixiert. Invar ist eine Stahllegierung mit 36 % Nickelanteil und hat einen um den Faktor acht geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als Stahl. Durch diese Art der Befestigung bleibt die relative Lage der Vorderkante des Spindelstocks zum Maßstab konstant, auch wenn sich das Spindelstockgehäuse durch eine Temperaturerhöhung verformt. Das Wachsen der Spindel wird somit kompensiert.

Bei dem Bild 12.27 gezeigten Bearbeitungszentrum wird auf dem Maschinentisch ein Laser befestigt. Dieser sendet einen Laserstrahl parallel zur x-Achse der Maschine auf einen ebenfalls auf dem Tisch befestigten Empfänger. Die Maschine verfährt mit ihrem Werkzeug so lange in y- und z-Richtung, bis der Laserstrahl durch die Werkzeugspitze unterbrochen wird. Bei der Temperaturkompensation wird dadurch das thermisch bedingte Wachstum der y- und z-Achse ermittelt. Die CNC-Steuerung korrigiert die Achspositionen durch Nullpunktverschiebungen. In der x-Achse ist die Maschine weitestgehend thermosymmetrisch konstruiert, sodass eine Temperaturkompensation in dieser Richtung nicht nötig ist.

Am Beispiel eines Stahlhebels sind die Ergebnisse dieser Kompensation dargestellt. Während es ohne Kompensation zu Verlagerungen von insgesamt 45 µm kommt und insbesondere die Abkühlung in Bearbeitungspausen zu großen Maßabweichungen führt, liegen die resultierenden Verlagerungen mit Kompensation bei weniger als 5 µm um das Nennmaß. Außerdem können mit diesem System Werkzeuge vollautomatisch vermessen werden, sodass auf eine Werkzeugvoreinstellung verzichtet werden kann. Nach jedem Bearbeitungsschritt kann schließlich auch eine Werkzeugbruchkontrolle durchgeführt werden.

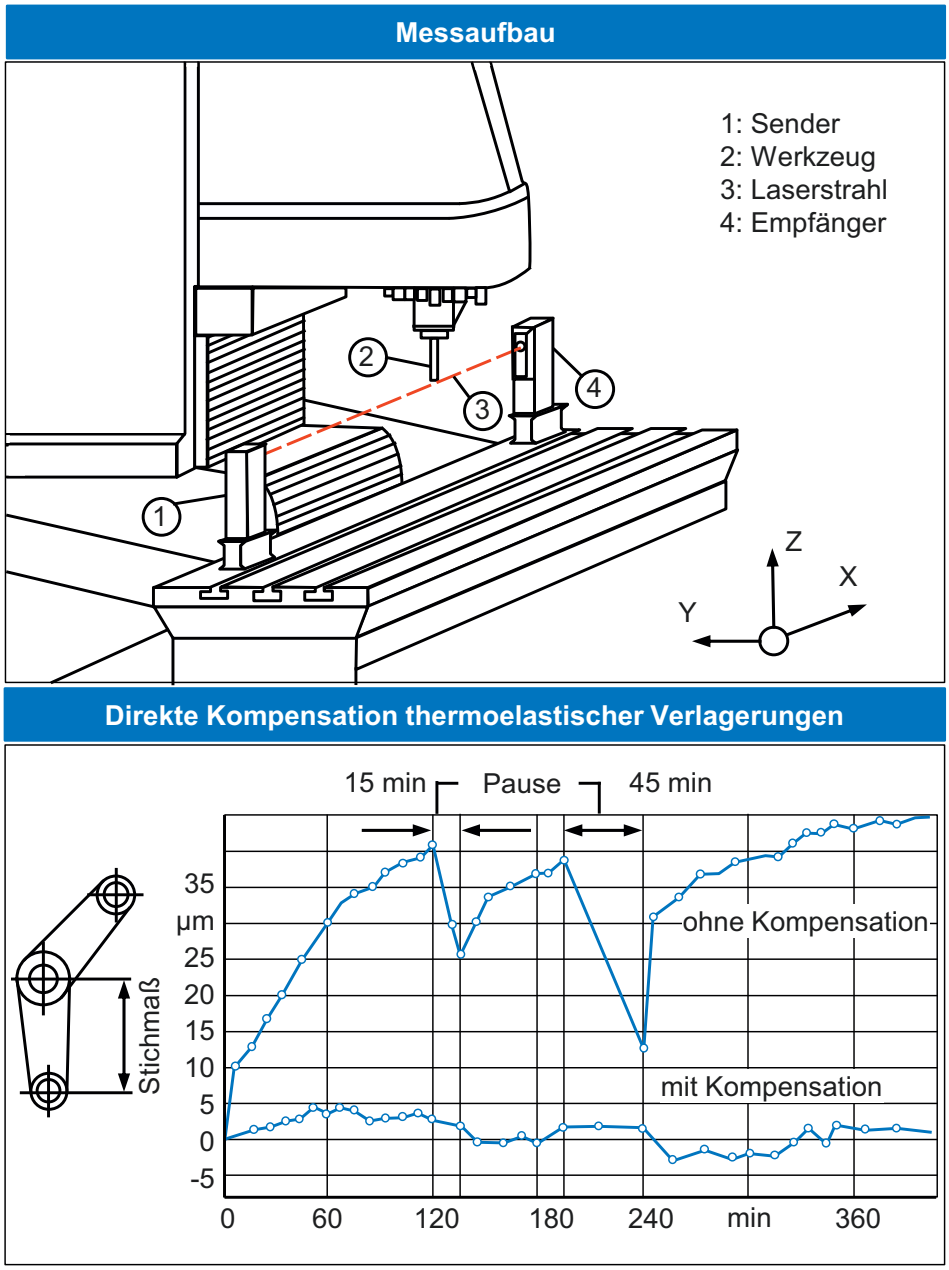


Bild 12.27 Direkte Kompensation thermoelastischer Verlagerungen am Beispiel eines Bearbeitungszentrums. Quelle: CHIRON Werke, WZL

Indirekte Kompensation

Prinzipiell sind als Eingangsgrößen für eine indirekte Kompensation Maschinentemperaturen, Maschinenlaufzeiten oder Materialdehnungen geeignet. Bei der Kompensation über Dehnungsmessung werden die Enden eines Stabes mit geringem Temperaturausdehnungskoeffizient an dem zu kompensierenden Bauteil befestigt [WULF91]. Bei einer Erwärmung wird der Stab aufgrund des Bimetalleffekts unter Zugspannung gesetzt, die von einer DMS-Vollbrücke erfasst und zu Korrekturwerten verrechnet wird.

Bei der Kompensation über Maschinenlaufzeiten wird der Verlagerungsgang bei der Maschinenerwärmung für einen bestimmten Bearbeitungsfall ermittelt. Bei späteren Bearbeitungen werden dann zeitabhängig Korrekturen durchgeführt. Dieses Verfahren eignet sich nur in den Fällen, in denen stets das gleiche Teil unter gleichbleibenden Randbedingungen gefertigt wird.

Die indirekte Kompensation über die Messung von Maschinentemperaturen ist hingegen auch für Universalmaschinen geeignet. Hierbei werden die Maschinentemperaturen an signifikanten Stellen erfasst, die daraus resultierenden Verlagerungen berechnet und als Korrekturwerte zur Kompensation an die Steuerung weitergegeben. Der Berechnungsalgorithmus wird durch eine Maschinenmessung ermittelt. Hierzu wird die Maschine durch wechselnde Belastungen auf unterschiedliche Temperatur-

Bild 12.28 Indirekte Kompensation thermisch bedingter Verlagerungen an Werkzeugmaschinen

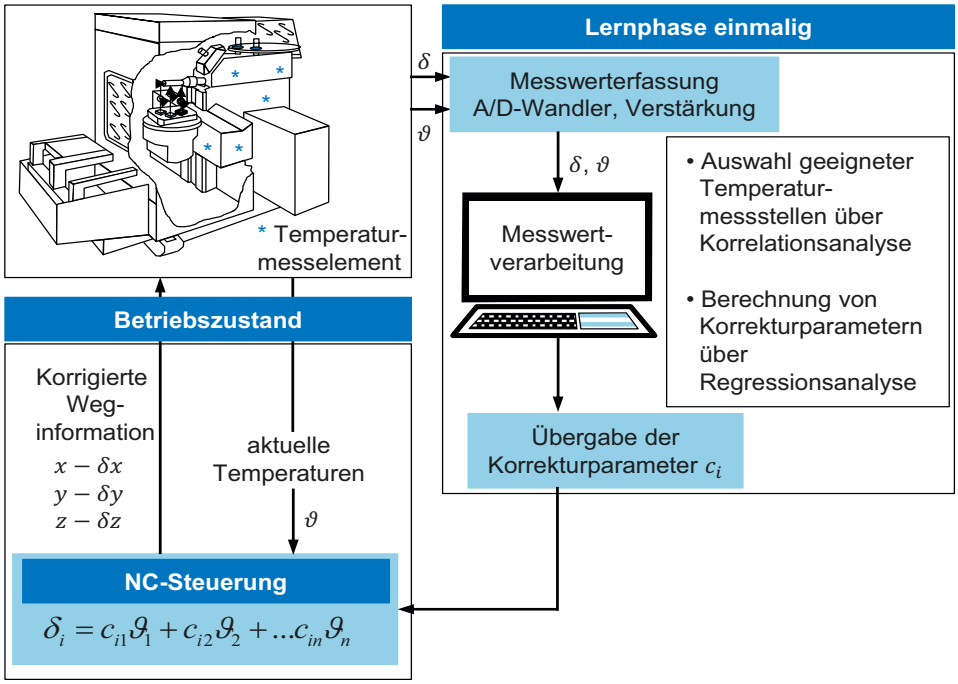
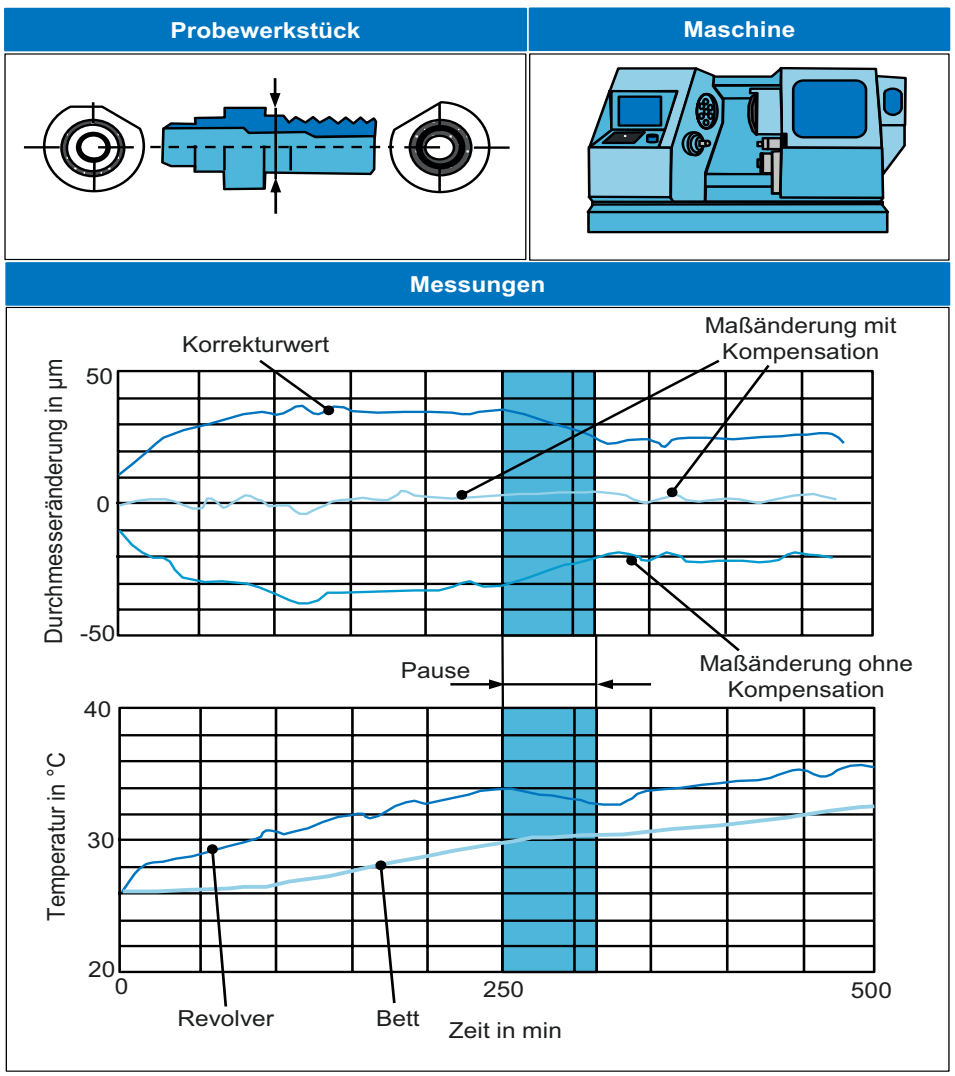


Bild 12.29 Kompensation der Verformungen einer Drehmaschine in *x*-Richtung



niveaus gebracht, ◘ Bild 12.28 (vgl. ► Band 2). Die Temperaturen an den markanten Messstellen (Spindellager, Spindelkasten usw.) sowie die relativen Lageänderungen von Werkzeug zu Werkstück werden gleichzeitig messtechnisch erfasst. Aus der Vielzahl der Messdaten werden die Koeffizienten der Temperatur-Verlagerungsmatrix für ein Gleichungssystem nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet.

Während des normalen Betriebes errechnet sich die thermoelastische Verformung dann aus der Beziehung

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{x1} & c_{x2} & \cdots & c_{xn} \\ c_{y1} & c_{y2} & \cdots & c_{yn} \\ c_{z1} & c_{z2} & \cdots & c_{zn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} \tag{12.77}$$

oder anders geschrieben:

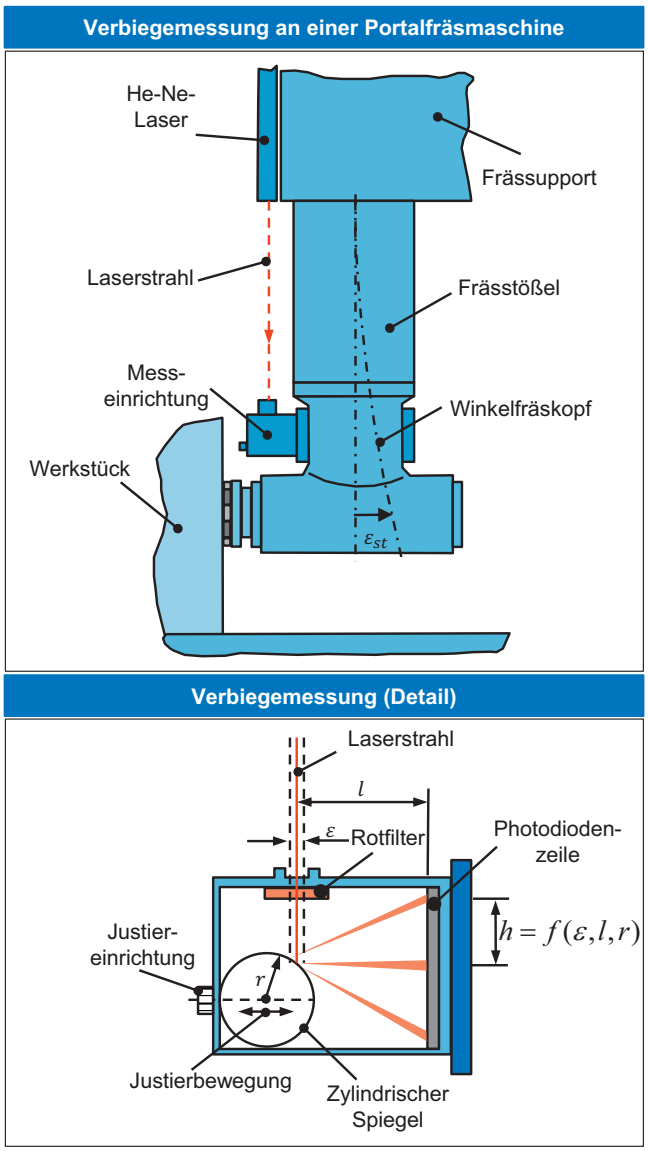
$$F_{\min} = \sum_{j=1}^{n} \left(x_{ber,j} - x_{gem,j} \right)^2 = \sum_{j=1}^{n} \left(\sum_{i=1}^{k} \left(c_i \cdot \vartheta_{gem,i,j} \right) - x_{gem,j} \right)^2 = \min \tag{12.78}$$

Die berechneten Korrekturwerte werden von der Steuerung vorzeichengerecht zu den vorgegebenen Koordinatenwerten addiert. ◘ Bild 12.29 zeigt als Beispiel die Kompensation der Verformungen einer Drehmaschine in x-Richtung. Da sich der Durchmesser des gefertigten Werkstücks direkt aus der radialen x-Position der Werkzeugschneide ergibt, gehen radiale Verlagerungen der Schneide mit dem Faktor 2 als Durchmesserfehler ein. Zudem sind die Toleranzen für Wellendurchmesser meist besonders eng, sodass der Genauigkeit der x-Achse entscheidende Bedeutung beizumessen ist. Bei der dargestellten Drehmaschine führen die Prozesslasten zu einer relativ schnellen Erwärmung des Werkzeugrevolvers und zu einer allmählichen, aber stetigen Erwärmung des Maschinenbetts. Die schnelle Erwärmung des Revolvers bewirkt in den ersten beiden Stunden der Bearbeitung stetig kleiner werdende Durchmesser, während die Betterwärmung schließlich wieder zu größeren Durchmessern führt. Die Temperaturkompensation wird daher mit zwei Temperaturmessstellen, einer am Bett und einer am Revolver, durchgeführt. Bei der Fertigung des im Bild gezeigten Probewerkstücks kann die Maßabweichung von bis zu 40 µm ohne Kompensation auf unter 5 µm reduziert werden. Obwohl bei einer fünfachsigen Maschine prinzipiell auch eine Neigungskompensation durch die Schwenkachsen denkbar und mit modernen, offenen Steuerungen auch realisierbar ist, werden wegen des nicht unerheblichen versuchstechnischen Aufwands zur mathematischen Modellgenerierung nur die translatorischen Verlagerungen auf diese Weise kompensiert.

12.3.1.3 Kompensation statischer Prozesslasten

In ◘ Bild 12.30 ist der Frässtößel einer Portalfräsmaschine bei der Bearbeitung vertikaler Flächen dargestellt. Aufgrund seiner großen Auskraglänge ist der Frässtößel mit dem schweren Winkelfräskopf an dieser Maschine das schwächste Bauteil im Kraftfluss. Fertigungsfehler werden deshalb im Wesentlichen durch die Schnittkraftkomponenten verursacht, die eine relative Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück und damit eine Abweichung von der Sollkontur bewirken. Zur Korrektur dieser Fehler wurde eine Regeleinrichtung entwickelt, mit der die Verlagerung des Fräskopfes während des Fräsprozesses ermittelt und kompensiert werden kann. ◘ Bild 12.30 zeigt ebenfalls die Messeinrichtung zum Ermitteln der Verlagerung.

Von einem He-Ne-Laser, der im Frässupport integriert ist, wird ein stark gebündelter Laserstrahl parallel zur unver-



◘ **Bild 12.30** Verbiegungsmessung an einer Portalfräsmaschine bei Bearbeitung vertikaler Flächen mit einem Winkelfräskopf

lagerten Frässtößelachse in eine Messeinrichtung geworfen, die am Hals des Winkelfräskopfes befestigt ist. Die Messeinrichtung besteht aus einem zylindrischen Spiegel mit dem Radius r, an dem der eintreffende Laserstrahl reflektiert wird, und aus einer Photodiodenzeile, die die Verlagerung des reflektierten Laserstrahls erfasst. Mit der Justiereinrichtung wird der zylindrische Spiegel so eingestellt, dass der reflektierte Strahl in der Mitte der Photozeile auftrifft ($\varphi = 45°$).

Bei einer Verlagerung des Fräskopfes um den Betrag ε_{st} bewegt sich durch die Strahlabweichung ε der am zylindrischen Spiegel reflektierte Laserstrahl auf der Photodiodenzeile um den Betrag h. Aufgrund der Reflexion am zylindrischen Spiegel ist die Abweichung h größer und damit besser messbar als die Auslenkung ε. Sie ergibt sich zu:

$$h = \frac{r}{\sqrt{2}} - \sqrt{r^2 - \left(\frac{r}{\sqrt{2}} + \varepsilon\right)^2} + (l - \varepsilon) \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - 2 \cdot \varphi\right) \quad (12.79)$$

mit:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{\varepsilon}{r}\right) \quad (12.80)$$

In einer elektronischen Auswerteeinheit wird diese Auslenkung h in eine analoge Spannung umgewandelt. Prinzipiell kann die Messeinrichtung auch so aufgebaut werden, dass der Laserstrahl auf eine Vier-Quadranten-Diode fällt, mit der sich dann ebenfalls die Verlagerung ε erfassen lässt.

Zur Kompensation der Fräserabdrängung dient als Stellgröße direkt die hydrostatische Führung des Frässtößels. Der Aufbau der hydrostatischen Stößelführung ist in Bild 12.31 gezeigt. Sie besteht aus einem oberen und einem unteren Führungsteil. Im oberen Stößellager befinden sich acht Taschen, zwei auf jeder Seite, im unteren Stößellager sechzehn Taschen, jeweils vier auf jeder Seite. Im unteren Lager sind deshalb mehr Taschen angebracht, weil für dieses Lager eine höhere Steifigkeit erforderlich ist.

Als Ölversorgungssystem wird eine Mehrkreispumpe mit dem System „eine Pumpe je Tasche“ eingesetzt. Für jeweils acht Taschen ist also ein Satz von acht Pumpen bzw. eine Mehrkreispumpe erforderlich. Außer diesen für den Normalbetrieb nötigen Pumpen hat das Ölversorgungssystem

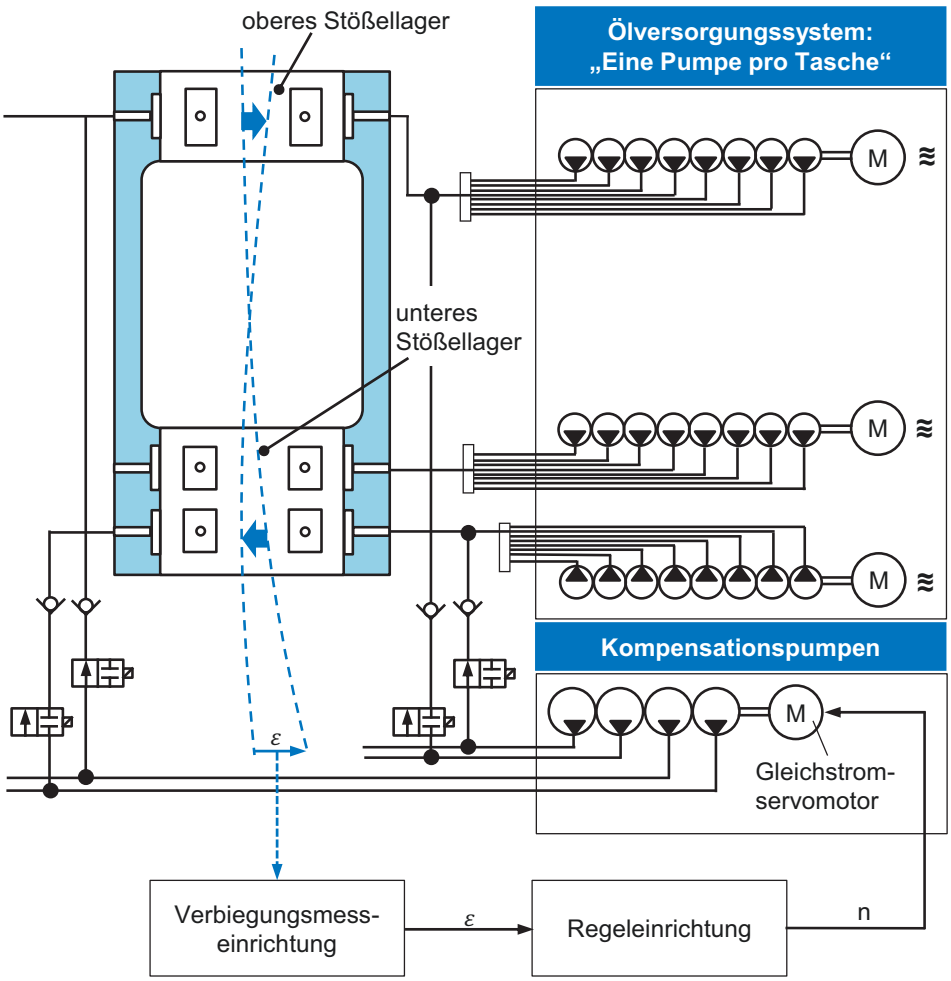


Bild 12.31 Hydrostatische Kompensationseinrichtung zur Verminderung der Frässtößelabdrängung. Nach WALDRICH COBURG

vier weitere Pumpen, die von einem drehzahlgeregelten Motor angetrieben werden. Diese Pumpen fördern zusätzlich Ölmengen durch zwei diagonal gegenüberliegende Taschenpaare. Der höhere Öldruck in diesen Taschen bewirkt ein Drehmoment auf den Frässtößel, das der Verlagerung ε entgegenwirkt.

In Abhängigkeit von dieser Verlagerung, die durch die Messeinrichtung erfasst wird, verstellt die Regeleinrichtung die Drehzahl des Motors. Die gewünschte Kompensationsrichtung ist durch Öffnen der entsprechenden Sperrventile vorwählbar. Alternativ zu der hier vorgestellten Kompensation kann die Verlagerung der Fräserabdrängung in Kombination mit einem Fünf-Achs-Fräskopf direkt mittels NC-Steuerung kompensiert werden.

Ein anderes System zur Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine zeigt die in Bild 12.32 schematisch dargestellte Lageregelung eines Werkzeugmaschinenschlittens [MARP91]. Die Bewegungsgenauigkeit eines Maschinenschlittens kann durch Fertigungsfehler und Verformungen seiner Führungsbahnen erheblich beeinträchtigt werden. Bei Verwendung hydrostatischer Führungen ist es jedoch möglich, durch Regelung der zugeführten Ölmenge die Bewegungsgenauigkeit trotz ungenauer und nachgiebiger Führungsbahnen zu erhöhen.

Der Schlitten trägt die Belastung F und gleitet auf der Führungsbahn. Die Lage x des Lageroberteils wird ständig relativ zu einer Bezugsebene gemessen und als Istwert dem Regler zugeführt. Der Regler vergleicht Ist- und Sollwert und verändert mit Hilfe eines Stellgliedes den Ölstrom bzw. den Lagerspalt im Sinne einer Regelabweichungsverkleinerung.

Durch das Prinzip der Lageregelung werden die beiden von einer Führungsbahn zu übernehmenden Funktionen, Kraftaufnahme und Führung, voneinander getrennt:

- Die Belastung wird wie üblich von der Führungsbahn (d. h. vom Maschinenbett) aufgenommen.
- Die genaue Führung des Schlittens wird durch eine von Belastungen und Temperaturänderungen möglichst isolierte Referenzebene gewährleistet.

Neben der vorgestellten Möglichkeit, die Lagerung aktiv durch Variation der Ölzufuhr zu beeinflussen, besteht auch die Möglichkeit durch eine Modifikation der Positions-Sollwertvorgabe der NC-Steuerung die Werkzeugabdrängung zu kompensieren. Bild 12.33 zeigt dazu ein Beispiel. Zur Kompensation der statischen Fräserabdrängung wird die relative Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück während der Bearbeitung auf Grundlage der gemessenen Bearbeitungskräfte berechnet. Die Kräfte können dabei sowohl über eine in die Spindel integrierte Kraftsensorik oder über eine Kraftmessplattform ermittelt werden. Ein digitaler Signalprozessor wertet die gemessenen Kraftsignale aus. Die Glättung des durch den Zahneingriff sehr stark schwankenden Kraftsignals erfolgt durch die Berechnung des gleitenden Mittelwerts. In Kombination mit der vorab bestimmten Steifigkeit des Systems Maschine-Werkzeug kann somit die erwartete Werkstückabdrängung berechnet werden. Der berechnete Verlagerungswert wird den Antrieben als Offset-Signal aufgeschaltet, sodass die vorgegebene Soll-Achsposition genau um den Wert der Werkzeugabdrängung korrigiert wird. Bild 12.33 zeigt die gemessenen Werkstückabweichungen für einen Fräser mit 25 mm Durchmesser und einem l/d-Verhältnis von fünf. Für diese Versuche wurde ein in Fräsrichtung gestuftes Werkstück gewählt, wie es in Bild 12.33 oben links dargestellt ist. Jede dieser Stufen vergrößert die Eingriffsbreite um 2,5 mm. Das Werkstück wurde in einem Durchgang gefräst. Anschließend wurde die entstandene Kontur an der oberen und unteren Werkstückkante vermessen. Ohne Kompensation der Fräserabdrängung zeigt sich auf dem Werkstück eine mit steigender Eingriffsbreite zunehmende Abweichung zwischen Ist- und Soll-Kontur. In der dritten Stufe beträgt dieser Konturfehler bei einer Eingriffsbreite von 7,5 mm ca. 280 μm. Durch den Einsatz der Kompensation lässt sich dieser Konturfehler deutlich auf unter 100 μm reduzieren. Eine vollständige Kompensation der Fräserabdrängung ist mit diesem einfachen mathematischen Modell jedoch nicht möglich, da aufgrund der Durchbiegung des Fräsers eine exakte Kompensation nur für einen Punkt der Kontur erreicht werden kann. Für eine

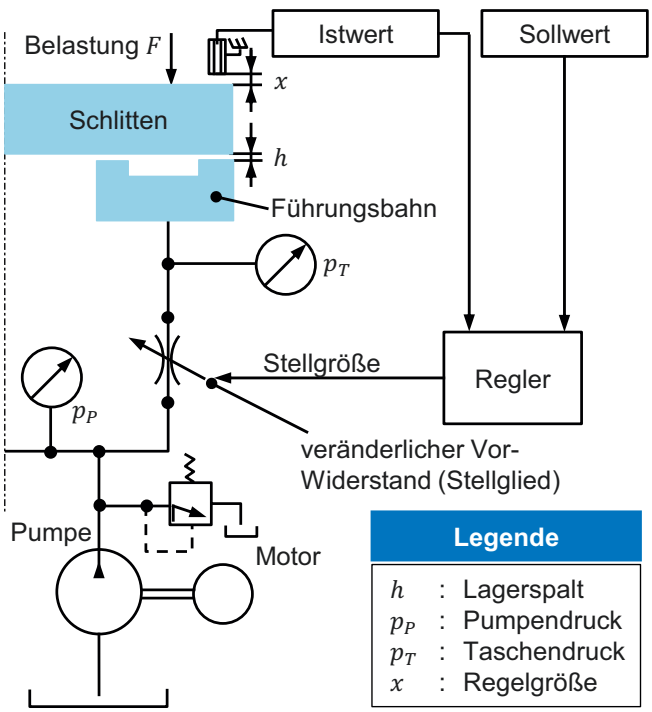


Bild 12.32 Schematische Darstellung einer hydrostatischen Lagerung mit geregelter Ölzufuhr

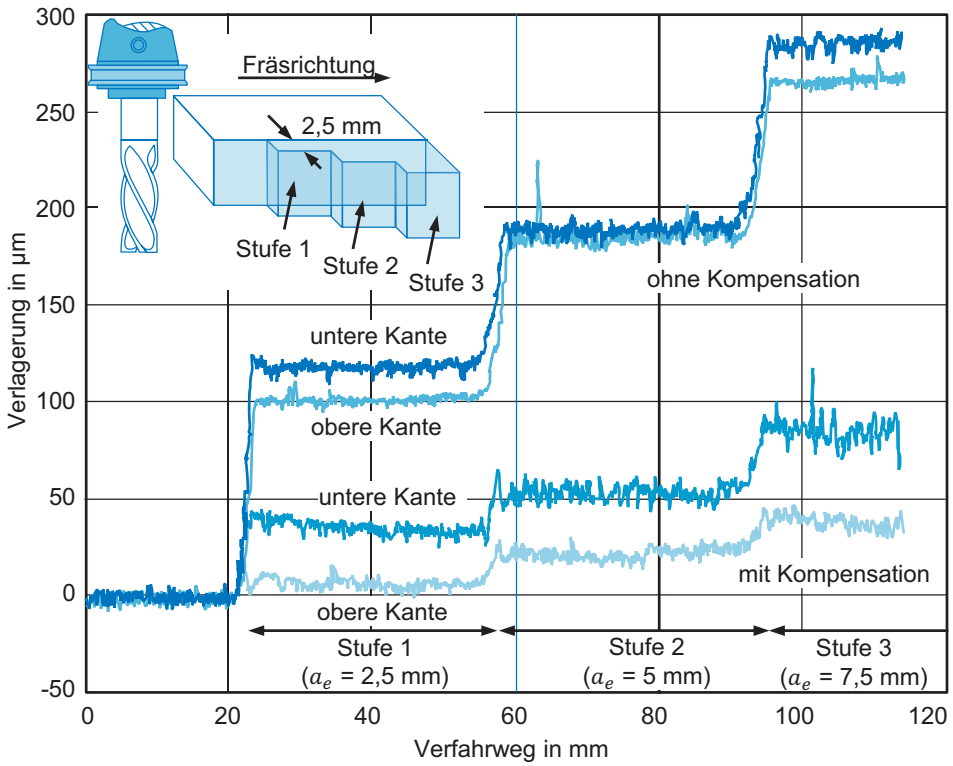


Bild 12.33 Kompensation der Fräserabdrängung während der Bearbeitung

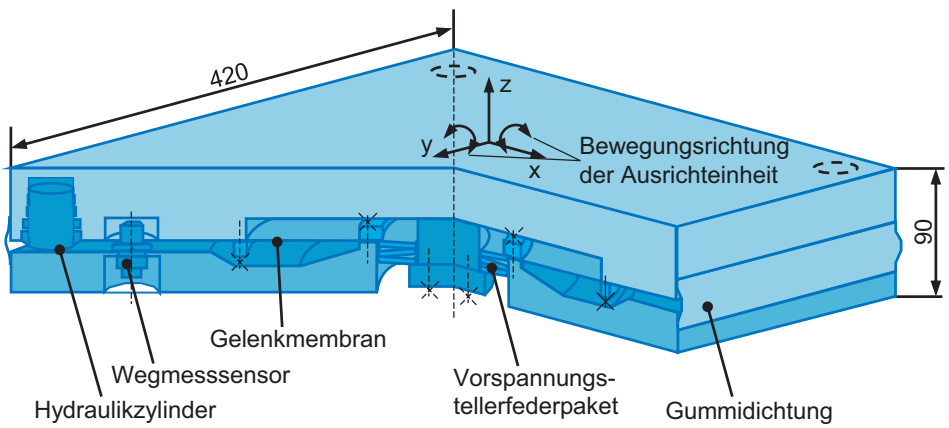


Bild 12.34 Konzept einer Ausrichteeinheit zur Neigungskompensation

ganzheitliche Kompensation muss darüber hinaus noch der Winkelfehler durch die Schrägstellung des Fräsers kompensiert werden. Dies ist jedoch nur an einer Fünf-Achs-Maschine möglich. Andernfalls ist ein zusätzliches Stellelement erforderlich.

Neben der oben beschriebenen Werkzeugabdrängung können auch Spannfehler für Maß- oder Konturabweichungen maßgeblich verantwortlich sein. Von besonderem Interesse sind hierbei die Fehler, die zu einer Winkelabweichung zwischen Werkstückachsen und Maschinenachsen führen und diese nicht von einer dreiachsigen Werkzeugmaschine ausgeglichen werden können. Für solche Fehler bietet sich die Kompensation mittels eines NC-gesteuerten Ausrichtetisches an. Ein solcher Tisch kann auf den Werkstücktisch aufgeschraubt werden, sodass das Werkstück um die der Drei-Achs-Maschine fehlenden Freiheitsgrade geschwenkt werden kann. Bild 12.34 zeigt das Konzept für einen solchen Tisch. Über vier in den Ecken des Tisches angebrachte Hydraulikzylinder lässt sich der Tisch um seine x- und y-Achse mit einem Winkel von ±1° kippen. Hierdurch lassen sich Neigungsfehler, die aus der Werkstückaufspannung resultieren, kompensieren. Radiale Kräfte werden über eine Gelenkmembran, die als Lagerung des Tisches dient, aufgenommen. Die translatorische Verschiebung des TCP relativ zum Werkstück, die durch die Neigungsverstellung auftritt, wird durch die Hauptachsen der Maschine ausgeglichen. Zusätzlich zu

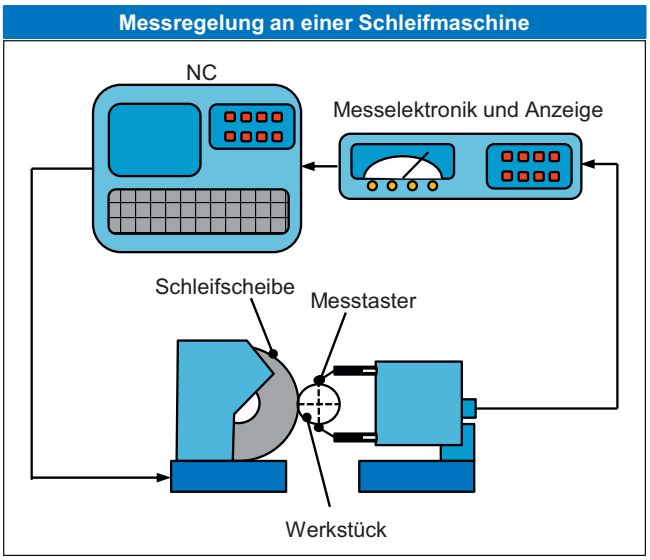


Bild 12.35 Messregelung an einer Schleifmaschine

Spannfehlern kann mit einer solchen Ausrichteeinheit auch der Winkelfehler, wie er z. B. durch thermoelastische Verformungen oder durch die oben beschriebene Werkzeugabdrängung bzw. statische Verformungen der Maschine auftreten, kompensiert werden.

12.3.1.4 Messregelung für Schleifprozesse

Zusätzlich zu den beschriebenen geometrischen Regelsystemen soll am Beispiel des Außenrundschleifens des Lagersitzes einer Getriebewelle die Funktionsweise einer Messregelung erläutert werden. Die Messregelung erfasst das Werkstückmaß während der Bearbeitung bei laufender Maschine, d. h. bei sich drehendem Werkstück, und steuert den Produktionsablauf selbsttätig entsprechend den von ihr ermittelten Messwerten. Mit dem im Bild 12.35 gezeigten System können die Außendurchmesser von Werkstücken mit glatter oder auch unterbrochener Oberfläche maßgeregelt bearbeitet werden. Prinzipiell unterscheidet man zwischen absolut und relativ messenden Messtastern. Bei relativ messenden Tastern wird in die Maschine ein Meisterwerkstück eingelegt, und die Tastfinger werden so justiert, dass bei laufender Maschine unter Einsatz von Kühlschmiermittel die Anzeige genullt ist. Absolut messende Taster, wie der im Bild 12.35 gezeigte, verfügen über einen Maßstab innerhalb des Tastkopfes. Daher benötigen sie keinen Einstellmeister.

Die Tastfinger drücken mit Federkraft gegen die Messfläche. Wenn die zu messende Oberfläche beispielsweise durch eine Nut unterbrochen wird, muss die Dämpfung der Tastfinger so eingestellt werden, dass die Tastelemente während der Werkstückdrehung nicht zu tief in die Nut eintauchen. Bei entsprechender Abrundung der Tastspitzen ist dann auch eine Messung gegen unterbrochene Oberflächen möglich. Die zwei bis vier im Messregelgerät enthaltenen elektronischen Grenzschalter bzw. numerischen Grenzwerte teilen der Maschine mit, wann mit dem Ausfunken begonnen werden muss und wann schließlich das Endmaß erreicht ist. Eine solche Messregelung verhindert, dass thermisch bedingte Verformungen der Maschine sowie Verformungen des Werkstücks und der Maschine aufgrund statischer Kräfte zu Maßfehlern am Werkstück führen. Die Regelung der technologischen Größen mit Hilfe einer Messsteuerung wird in ▶ Kap. 6.4 erläutert.

12.3.2 Vorschub-Override und externe Geschwindigkeitsbeeinflussung

Der Vorschub muss während der Bearbeitung zum einen durch den Benutzer und zum anderen durch externe Faktoren an geänderte Randbedingungen angepasst werden können.

12.3.2.1 Override

Der programmierte Vorschub kann während der Programmausführung durch den Maschinenbenutzer mit Hilfe des sogenannten Vorschub-Overrides beeinflusst werden. Der Vorschub-Override stellt einen Faktor dar, der den programmierten Vorschub entsprechend modifiziert. Der Maschinenbenutzer kann somit in Abhängigkeit vom Prozessverlauf eine Veränderung der Schnittbedingungen herbeiführen. Darüber hinaus nutzt man den Override beim Programmtest. Bei kritischen Situationen wird die Geschwindigkeit re-

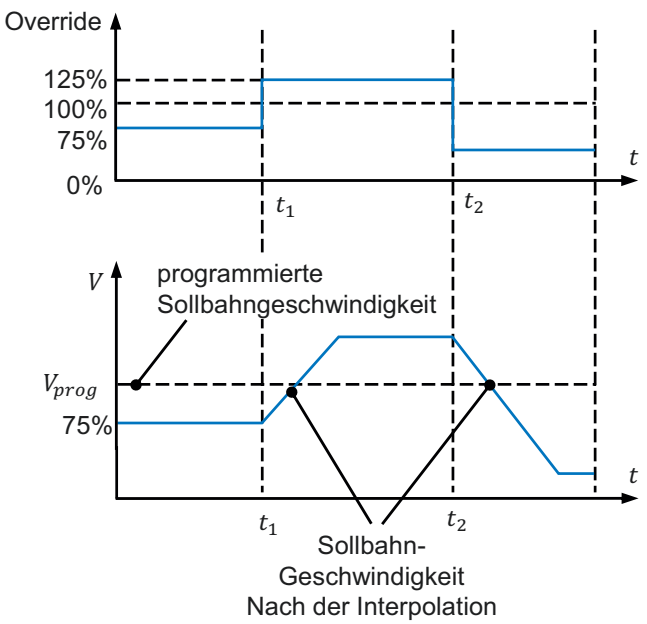


Bild 12.36 Verlauf der Bahngeschwindigkeit bei sprunghafter Änderung des Overrides

duziert, um so die ordnungsgemäße Bearbeitung besser überwachen zu können.

Der Overrideschalter wird in der Form eines mehrstufigen Drehschalters oder eines Drehpotentiometers verwendet (vgl. ▶ Kap. 11.3). Übliche Bereiche, innerhalb derer der Vorschub geändert werden kann, liegen zwischen 0 und 120 %. Mit der Stellung 0 % wird der Maschinenvorschub angehalten.

Die Verstellung des Vorschub-Overrides ist durch den Benutzer während der Bearbeitung möglich, sodass eine unmittelbare Anpassung der Geschwindigkeit durch die Steuerung durchgeführt werden muss. Den Verlauf der Achsgeschwindigkeit bei einer sprunghaften Änderung des Overridewertes stellt ◘ Bild 12.36 dar. Hier wurde aus Gründen der Anschaulichkeit eine Geschwindigkeitsführung mit konstanter Beschleunigungsphase zu Grunde gelegt.

12.3.2.2 Externe Geschwindigkeitsbeeinflussung

Die externe Geschwindigkeitsbeeinflussung stellt an die Steuerungssoftware die gleichen Anforderungen wie der Vorschub-Override. Eine typische Anwendung liegt z. B. bei der sogenannten v-konstant-Funktion bei Drehmaschinen vor. Sie dient beim Plandrehen dazu, die Schnittgeschwindigkeit konstant zu halten. Hierzu wird die Drehzahl je Minute umgekehrt proportional mit dem Bearbeitungsradius am Werkstück stetig geändert. Bei gleichbleibendem Vorschub je Umdrehung muss die Vorschubgeschwindigkeit in gleicher Weise mit verstellt werden. Die Anpassung der Achsgeschwindigkeit wird durch ein Funktionsmodul der Steuerung vorgenommen, das direkt die Geschwindigkeitsführung beeinflusst.

12.3.2.3 Look-Ahead-Funktion

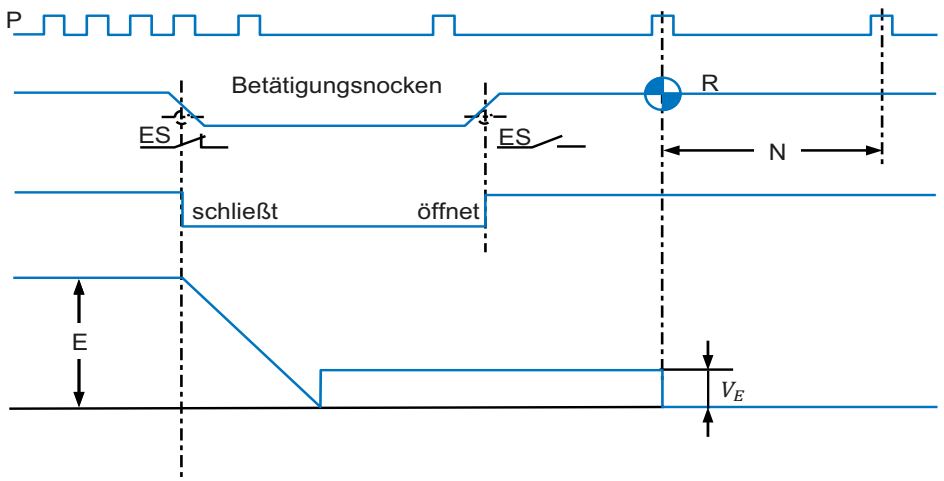
Besondere Maßnahmen sind bei der Verstellung des Overrides im Betrieb der Look-Ahead-Funktion erforderlich. Mit dieser Funktion wird eine Anzahl von Sätzen im Voraus analysiert und daraus das optimale Geschwindigkeitsprofil festgelegt. Für die Ermittlung der veränderten Sollgeschwindigkeit muss also für eine Vielzahl von Sätzen die Geschwindigkeitsführung angepasst werden. Durch die modifizierte Sollgeschwindigkeit sind die bereits erzeugten Geschwindigkeitsprofile nicht mehr optimal. Bei einer Erhöhung können unzulässige Abweichungen auftreten, bei einer Erniedrigung verlängert sich die Bearbeitungszeit.

Auf eine Änderung des Overrides im Look-Ahead kann während der Achsbewegung mit unterschiedlichen Strategien reagiert werden:

- eine völlige Neuberechnung der Geschwindigkeitsvorgaben der bereits vorausberechneten Bahn,
- eine verzögerte Reaktion auf die Änderung des Overrides oder
- eine Reduzierung des Beschleunigungsvermögens der Maschine.

Die erste Strategie erfordert einen unzulässig hohen Rechenaufwand, da die Berechnungen innerhalb eines Taktes durchgeführt werden müssen. Im zweiten Fall wird vor Berücksichtigung der Overrideänderung der bereits berechnete Bahnabschnitt vollständig abgearbeitet. Eine dritte Variante besteht darin, die Beschleunigung mit dem gleichen Faktor zu modifizieren wie die Geschwindigkeit. In diesem Fall wird die Dynamik eingeschränkt. Dies fällt allerdings nicht zu sehr ins Gewicht, da man in der Regel in kritischen Bearbeitungsphasen nur eine kleine Geschwindigkeitsveränderung durch den Override wählt.

◘ **Bild 12.37** Referenzpunktfahrt



Legende

E	Eilgang	P	Nullmarke des Weggebers
ES	Endschalter	R	Maschinenreferenzpunkt
N	Weg pro Umdrehung des Weggebers	V_E	Einfahrgeschwindigkeit

12.3.3 Referenzpunktfahrt

Moderne Werkzeugmaschinen verfügen im Allgemeinen über inkrementale Wegmesssysteme (vgl. ▶ Kap. 2.4). Diese Wegmesssysteme weisen neben einer Reihe von Vorteilen jedoch den Nachteil gegenüber absolut messenden Systemen auf, dass nach dem Einschalten der Maschine die aktuelle Position nicht bekannt ist. Zu diesem Zweck wird eine Referenzpunktfahrt durchgeführt. Sie ermittelt mit Hilfe mechanischer und in den Messsystemen abgelegter Referenzpunkte die Referenzposition und versetzt die Steuerung anschließend in die Lage, Positionen relativ zum Maschinennullpunkt anzufahren. Dieser Maschinennullpunkt wiederum ist gegenüber dem Referenzpunkt, der in der Regel in der Nähe des Randes des Verfahrbereiches der Achsen liegt, definiert.

Bei den meisten Steuerungen kann die Referenzpunktfahrt entweder von Hand oder durch einen Befehl des NC-Programms ausgelöst werden. Die Erfassung des Referenzpunktes erfordert dabei eine Genauigkeit von ±1 Inkrement. Bei Resolvern und Inductosyn-Maßstäben wird dazu einer der elektrischen Nulldurchgänge der Messsysteme, bei Schrittmotorsteuerungen eine definierte Wicklungskombination der Schrittmotoren und bei optisch arbeitenden inkrementalen Wegmesssystemen eine Referenzmarkierung genutzt.

Da viele Wegmesssysteme inkremental oder zyklisch absolut arbeiten, muss die Geschwindigkeit der Referenzpunktfahrt vermindert und der Ansprechbereich des Referenzpunktsignals über mechanische Vorabschalter reduziert werden. ◘ Bild 12.37 zeigt den Verlauf der Referenzpunktfahrt für eine Vorschubachse mit Winkelschrittgebern. Nachdem bei Erreichen des Endschalters (ES) der Vorschub von Eilgang auf Einfahrgeschwindigkeit reduziert wurde, wählt man den ersten Nullimpuls der zyklisch wiederkehrenden Nullmarken des Winkelschrittgebers nach dem erneuten Öffnen des Endschalters als Referenzpunkt aus.

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
CAD	engl. Computer Aided Design
CAM	engl. Computer Aided Modelling
CNC	engl. Computerised Numerical Control
DMS	Dehnungsmessstreifen
ES	Endschalter
NC	engl. Numerical Control
MKS	Maschinenkoordinatensystem
NURBS	engl. Non Uniform Rational Basis Spline
WKS	Werkstückkoordinatensystem

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	–	Achsverhältnis
A_i	–	Polynomkoeffizient A
A_x	–	Achsverhältnis X
A_y	–	Achsverhältnis Y
A_z	–	Achsverhältnis Z
B_i	–	i-ter Polynomkoeffizient B, i-ter Gelnkpunkt
C_i	–	Polynomkoeffizient C
D_i	–	Polynomkoeffizient D
E	–	Abweichung
L	–	Segmentbogenlänge
L_i	–	i-ter Beinvektor
N_i^n	–	B-Spline-Funktionen
P	–	Positionsunsicherheit
$P_0, \ldots, P_m$	–	Stützstellen
P_A	–	Positionsabweichung
P_i	–	de-Boor-Punkte, i-ter Gelenkpunkt der bewegten Werkzeugplattform
P_{Si}	–	Positionsstreubreite
R	m	Kreisradius, Krümmungsradius
R_x	–	Transformationsmatrix der Einzeldrehung X
R_y	–	Transformationsmatrix der Einzeldrehung Y
R_z	–	Transformationsmatrix der Einzeldrehung Z
S_i	–	kubischer Polynomspline
S_{gesamt}	m	Gesamtsatzstreckenvektor
$\lvert S_{Satz,gesamt}\rvert$	m	Gesamtsatzstrecke
T	s	Interpolationszeit, Interpolationsintervall, Intrepolationstaktrate
U	–	Knotenvektor
U_i	–	Umkehrspanne
X	–	Maschinenkoordinaten
X'	–	Werkstückkoordinaten
Z	–	Anzahl der Rechenoperationen
a	–	Geometrische Dimension
$a(t)$	m/s²	Beschleunigung
a_e	m	Eingriffsbreite
a_{max}	m/s²	maximale Bahnbeschleunigung
$a_{max,x}$	m/s²	maximale Beschleunigung der X-Achse
$a_{max,y}$	m/s²	maximale Beschleunigung der Y-Achse
$a_{max,z}$	m/s²	maximale Beschleunigung der Z-Achse
a_x	m/s²	Achsbeschleunigung in X-Richtung

$a_{x,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient a in X
a_y	m/s²	Achsbeschleunigung in Y-Richtung
$a_{y,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient a in Y
a_z	m/s²	Achsbeschleunigung in Z-Richtung
$a_{z,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient a in Z
$b_{x,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient b in X
$b_{y,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient b in Y
$b_{z,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient b in Z
c_i	–	Korrekturparameter
$c_{x,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient c in X
$c_{y,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient c in Y
$c_{z,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient c in Z
$d_{x,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient d in X
$d_{y,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient d in Y
$d_{z,i}$	–	i-ter Polynomkoeffizient d in Z
h	–	Abweichung des Laserstrahls, Lagerspalt
h_i	–	i-te Sehnenlänge zwischen den Stützstellen
l_i	–	Länge des i-ten Beins
$m_{i,x}$	–	i-te Sehnensteigung in X
n	–	Grad
$p_{3,x}$	–	gesuchte Steigung im Punkt 3
p_p	Pa	Pumpendruck
p_T	Pa	Taschendruck
r	m/s³	Ruck
r_{max}	m/s³	maximaler Ruck
$r_{max,x}$	m/s³	maximaler Ruck der X-Achse
$r_{max,y}$	m/s³	maximaler Ruck der Y-Achse
$r_{max,z}$	m/s³	maximaler Ruck der Z-Achse
s	–	Bogenlänge
$s(t)$	m	Weg
s_{Rest}	m	minimale Restweg
t	s	Zeit
t_0	s	Startzeit
t_1	s	Zeitpunkt 1
t_2	s	Zeitpunkt 2
t_{verz}	s	zur Verzögerung
u	–	gemeinsamer, globaler Parameter
$u_o, \ldots, u_m$	–	geordnete Parameterwerte, Knoten
v	m/s	Geschwindigkeit
v_1	m/s	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt 1
v_2	m/s	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt 2
v_b	m/s	programmierte Bahngeschwindigkeit
v_{bahn}	m/s	Bahngeschwindigkeit
v_E	m/s	Einfahrgeschwindigkeit
v_{prog}	m/s	programmierte Sollbahngeschwindigkeit
v_{Soll}	m/s	Sollgeschwindigkeit
v_{max}	m/s	maximale Bahngeschwindigkeit
$v_{max,x}$	m/s	maximale Geschwindigkeit der X-Achse
$v_{max,y}$	m/s	maximale Geschwindigkeit der Y-Achse
$v_{max,z}$	m/s	maximale Geschwindigkeit der Z-Achse
v_x	m/s	Achsgeschwindigkeit in X-Richtung
$v_{x,Soll}$	m/s	Sollachsgeschwindigkeit in X-Richtung
v_y	m/s	Achsgeschwindigkeit in Y-Richtung
$v_{y,Soll}$	m/s	Sollachsgeschwindigkeit in Y-Richtung
v_z	m/s	Achsgeschwindigkeit in Z-Richtung
$v_{z,Soll}$	m/s	Sollachsgeschwindigkeit in Z-Richtung
x	m	X-Position
x_b	–	X-Koordinate im unbewegten Basiskoordinatensystem
x_c	–	X-Position des Punkt C
x_d	–	X-Position des Punkt D
x_p	–	X-Koordinate im bewegten Koordinatensystem
x_A	m	Anfangs-X-Position
x_E	m	End-X-Position
x_M	m	Mittelpunkts-X-Koordinate
y	m	Y-Position
y_b	–	Y-Koordinate im unbewegten Basiskoordinatensystem
y_p	–	Y-Koordinate im bewegten Koordinatensystem
y_A	m	Anfangs-Y-Position
y_E	m	End-Y-Position
y_M	m	Mittelpunkts-Y-Koordinate
z	m	Z-Position
z_b	–	Z-Koordinate im unbewegten Basiskoordinatensystem
z_p	–	Z-Koordinate im bewegten Koordinatensystem
α	Rad	Winkelschritt, Rotationswinkel
β	Rad	Drehung, Rotationswinkel
β_A	Rad	Anfangswinkel
β_E	Rad	Endwinkel
$\dot{\beta}$	1/s	Drehgeschwindigkeit
$\ddot{\beta}$	1/s²	Drehbeschleunigung
γ	Rad	Rotationswinkel

Δs	m	Schleppfehler
Δu	–	parametrische Schrittweite
Δv	m/s	Geschwindigkeitssprung-grenzwert
Δx	m	Koordinatenstrecke in X
Δi	–	systematische Abweichung vom Sollwert
Δy	m	Koordinatenstrecke in Y
Δz	m	Koordinatenstrecke in Z
ε	–	Eingangssignal, Verlagerung
ε_L	–	Los des Eingangssignals
ε_{st}	–	Verlagerung Fräskopf
$\hat{\varepsilon}$	–	Amplitude des Eingangsignals
ρ	Rad	Segmentwinkel
φ	Rad	Winkel
ω	m	Drehgeschwindigkeit
$\dot{\omega}$	m	Drehbeschleunigung
$\vartheta_1 \ldots \vartheta_n$	–	Temperatur

Literaturverzeichnis

[AKIM70] Akima, H.: A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. In: J. ACM. 17. Jg., 1970

[ASAD86] Asada, H.; Slotine, J.-E.: Robot Analysis and Control: John Wiley and Sons, 1986

[BRON84] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 1984

[DIN83] Norm DIN 66025 Teil 1 (1983). Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen

[ENGE96] Engeln-Müllges, G.; Reutter, F.: Numerik-Algorithmen - Entscheidungshilfe zur Auswahl und Nutzung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996

[FANU19] Fanuc K.K.: FANUC Series 30i/31i/32i CNC. Oshino, 2019. Firmenschrift

[FAUS97] Fauser, M.: Steuerungstechnische Maßnahmen für die Hochgeschwindigkeits-Bearbeitung - Geometriedatenverarbeitung auf der Basis von Splines und bandbegrenzende Führungsgrößen-Erzeugung. Dissertation, RWTH Aachen, 1997

[FIDI98] Fidia S.p.A.: FIDIA M and C Controls - Programmieranleitung. San Mauro Torinese, 1998. Firmenschrift

[HEID96] Heidenhain GmbH: HEIDENHAIN ATEK HS PLUS. Traunreut, 1996. Firmenschrift

[HOSC92] Hoschek, J.; Lasser, D.: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Stuttgart: Teubner, 1992

[KLEI95] Klein, F.: NC-Steuerung für die 5-achsige Fräsbearbeitung auf der Basis von NURBS. Diss. RWTH Aachen, 1995

[LEI92] Lei, W. T.: Flächenorientierte Steuerdatenaufbereitung für das fünfachsige Fräsen. Bericht aus dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen Universität Stuttgart, 1992

[MARP91] Marposs GmbH: Numerische Steuerungen und Messsteuerungen für Schleifmaschinen. Fellbach, 1991. Firmenschrift

[MESC66] Meschkowski, H.: Mathematisches Begriffswörterbuch. Berlin: Bibliographisches Institut, 1966

[NUM99] NUM GmbH: NUM 1050 CNC - Programmieranleitung. Teufen, 1999. Firmenschrift

[SCHÄ93] Schäfer, W.: Steuerungstechnische Korrektur thermoelastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen. Dissertation, RWTH Aachen, 1993

[SIEM15] Siemens AG: SIEMENS 840D - Programmieranleitung Arbeitsvorbereitung. Erlangen, 2015. Firmenschrift

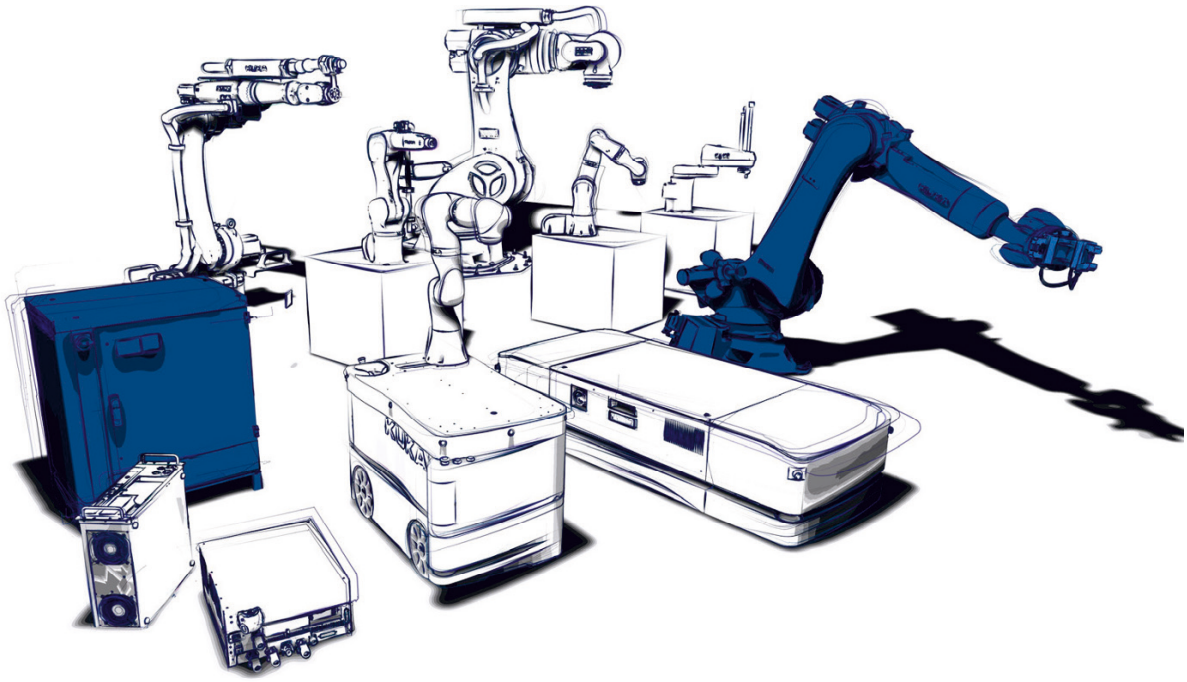
[SPÄT90] Spät, H.: Eindimensionale Spline-Interpolationsalgorithmen. München: Oldenbourg, 1990

[VDI77] Richtlinie VDI/DGQ 3441-3445 (1977). Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen

[VRIE91] Vries-Baayens, A. E.: CAD product data exchange: conversions for curves and surfaces. Diss. Technische Universität Delft, 1991

[WULF91] Wulfsberg, J.: Diagnose und Kompensation thermoelastischer Verlagerungen in Schleifmaschinen. Dissertation, TU Hannover, 1991

Kapitel 13



Roboter und Robotersteuerungen

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M. Sc., Lars Lienenlüke M. Sc. Und Simon Storms M. Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

www.wzl.rwth-aachen.de www.smartautomationlab.de



Automatisierung und Steuerungstechnik

Robotikanwendungen

IKT für das Industrial IoT

Flexible Produktionsprozesse

Modellbasierte Entwicklung

Cloud & Edge Computing

Mensch-Maschine-Interaktion

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Steinbachstraße 19
52074 Aachen
+49 241 80 27408
automation@wzl.rwth-aachen.de

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen
Abteilung Automatisierung und Steuerungstechnik

Roboter und Robotersteuerung

13.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung – 563

13.2 Roboterkinematiken und Einlegegeräte – 564

13.2.1 Vertikaler Knickarmroboter – 567

13.2.2 Horizontaler Knickarmroboter – 570

13.2.3 Kartesische Linienportal-Roboter – 571

13.2.4 Kartesisches Flächenportal und Linienportal mit Querausleger – 572

13.2.5 Parallelkinematiken – 573

13.2.6 Sonderbauformen – 574

13.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte – 577

13.4 Koordinatentransformation und Bahngenerierung – 579

13.5 Bedienung und Programmierung von Robotern – 589

13.5.1 Online-Programmierverfahren – 590

13.5.2 Offline-Programmiersysteme – 596

13.5.3 Industrial Robot Language (IRL) als Beispiel einer Roboter-Programmiersprache – 601

13.6 Kommunikationsschnittstellen für Robotersteuerungen – 610

13.7 Sensordatengewinnung und -verarbeitung – 610

13.8 Greiftechnik in der Robotik – 613

13.8.1 Prozessdefinitionen – 614

13.8.2 Greifprinzipien – 614

13.8.3 Greifertypen – 615

13.8.4 Greifsysteme – 623

13.9 Entwicklungstendenzen – 626

Abkürzungsverzeichnis – 630

Formelzeichenverzeichnis – 630

Literaturverzeichnis – 631

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_13

Einlegegeräte und Industrieroboter gehören zur Klasse der Handhabungsgeräte. Handhaben ist definiert als das Schaffen, definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer räumlichen Anordnung von geometrisch bestimmten Körpern in einem Bezugsystem [VDI90]. Handhabungsgeräte sind entsprechend dieser Definition Geräte, die diese Körper zu bestimmten Positionen bewegen und deren Orientierung einstellen. Position und Orientierung zusammen ergeben die sechsachsige Lage (auch Pose genannt) eines Körpers im Raum. Handhabungsgeräte werden nach dem Funktionsumfang ihrer Steuerung eingeteilt in Manipulatoren, Einlegegeräte und Industrieroboter, Bild 13.1.

Manipulatoren sind handgesteuerte Geräte, die prinzipiell als Kraftverstärker dienen. Dabei wird lediglich die Hubarbeit durch Fremdenergie unterstützt, während alle anderen Bewegungen vom Bediener auszuführen sind. Teleoperatoren sind ferngesteuerte Geräte, bei denen im Vergleich zu Manipulatoren über die Hubarbeit hinaus weitere Achsen motorisch bewegt werden. Die gebräuchlichste Anwendung ist in jedem Produktionsbereich in Form von Lastkränen zu finden. In der Gießerei-, der Reaktor- sowie der Offshore-Technik ermöglichen Teleoperatoren die ferngesteuerte Handhabung von Körpern unter erschwerten Umgebungsbedingungen.

Einlegegeräte sind einfache Bewegungsautomaten, die vorgegebene Bewegungsabläufe nach einem festen Programm abfahren. Sie werden mechanisch durch Nocken oder Kulissen gesteuert. Aktuelle Geräte werden durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) nach elektrischen Eingangssignalen von anderen Steuerungen, von Schaltern oder von Ausgangssignalen der umgebenden Peripherie gesteuert.

Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten, mit mindestens drei Bewegungsachsen (ISO 8373), deren Bewegungen hinsichtlich ihrer Bewegungsfolge und Wege bzw. Winkel frei programmierbar (d. h. ohne mechanischen Eingriff veränderbar) und ggfs. sensorgeführt sind. Industrieroboter sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar. Sie werden zunehmend für flexibel automatisierte Fertigungsaufgaben einge-



Bild 13.1 Einteilung der Handhabungsgeräte. Nach Scaglia Indeva GmbH, Schunk GmbH & Co. KG, KUKA

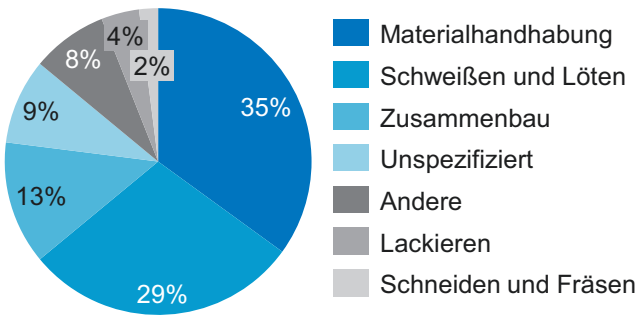


Bild 13.2 Anwendungsgebiete von Industrierobotern. Quelle: [GUIZ08]

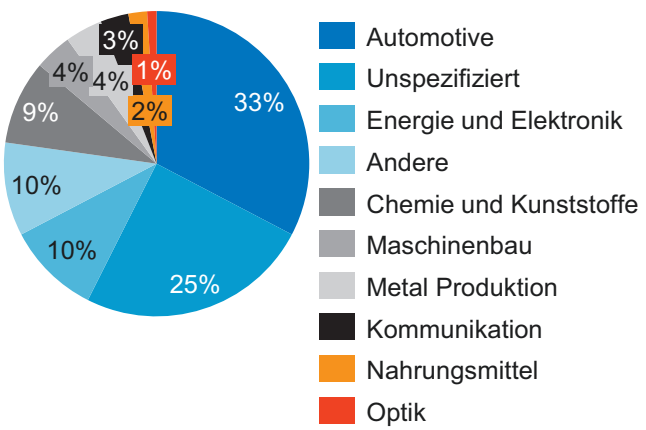


Bild 13.3 Einsatz von Industrierobotern nach Branche. Quelle: [GUIZ08]

setzt [ZAID13]. Ihr Aufgabenspektrum reicht von der einfachen Werkstückhandhabungsfunktion bis hin zur komplexen sensorgeführten Werkzeughandhabung, wie z. B. beim Lichtbogenschweißen, Entgraten oder Polieren, Bild 13.2. Die Mehrzahl der installierten Roboter wird in den Bereichen Handhabung, Montage, Bahn- und Punktschweißen verwendet. Daneben werden weitere Applikationen wie z. B. zum Messen und Prüfen, Lackieren, Kommissionieren und Palettieren sowie Klebe- und Dichtaufgaben durch Industrieroboter realisiert.

Industrieroboter werden heute gemäß der beschriebenen Prozesse hauptsächlich bei der Automobilherstellung sowie im Elektronik und Maschinenbau eingesetzt, Bild 13.3. Entsprechend der weit gefächerten Aufgabenfelder und Branchen werden applikationsspezifische Steuerungsverfahren benötigt, die den hohen Anforderungen zur genauen und schnellen Koordinierung von komplexen Bewegungsabläufen im Raum genügen sowie die Verarbeitung umfangreicher Sensor- und Peripheriedaten einschließen.

13.1 Allgemeine Funktionsbeschreibung

Die Kinematik eines Roboters bestimmt im hohen Maße die Beweglichkeit des Roboterarms und legt durch ihre Struktur den Arbeitsbereich eines Industrieroboters fest. Für die unterschiedlichen Automatisierungsaufgaben wurden deshalb Roboter mit unterschiedlichen kinematischen Strukturen entwickelt, vgl. Bild 13.4 [WARN89; WARN97].

Größte Bedeutung haben Geräte mit fünf bis sechs rotatorischen Bewegungsachsen, wie in Bild 13.4 a gezeigt, da diese Geräte durch ihre kinematische Struktur universell eingesetzt werden können. Die Bewegungsmöglichkeiten der Grundachsen ergeben sich aus:

- Achse 1: Drehung um Vertikale,
- Achse 2: Drehung senkrecht zur ersten Achse,
- Achse 3: Drehung parallel zur zweiten Achse.

Anschließend folgt die Anordnung der drei Handachsen. Für die Handhabung höherer Traglasten bis zu 1350 kg haben sich Industrieroboter mit Parallelogramm-Achsstruktur bewährt. Sie ermöglichen wegen ihres stabilen mechanischen Aufbaus einen präziseren Bewegungsablauf, vgl. Bild 13.4 b.

Im Kleinmontagebereich werden vielfach vierachsige Schwenkarmgeräte nach dem SCARA-Prinzip (Selective Compliance Assembly Robot Arm) eingesetzt, Bild 13.4 c. Vorteile dieser Gerätekonstruktion sind die hohe Steifigkeit in z-Richtung, hohe mögliche Verfahrgeschwindigkeiten und Beschleunigungen, hohe Positioniergenauigkeiten sowie die kompakte Bauweise.

Demgegenüber sind Geräte mit kartesischem Aufbau üblicherweise in Portalbauweise konstruiert und eignen sich vor allem für Palettier- und Montageaufgaben. Bild 13.4 d zeigt dazu beispielhaft einen Portalroboter.

Speziell für die Handhabung leichter Objekte mit hohen Geschwindigkeiten und Genauigkeitsanforderungen werden heute zunehmend Roboter mit Parallelkinematik eingesetzt. In Bild 13.14 e ist dazu beispielhaft der *Flexpicker* der Fa. ABB dargestellt, welcher eine Umlenkkinematik nutzt, um die Rotationsbewegungen der drei symmetrisch angeordneten Antriebe in eine translatorische Verschiebung der Roboterhand umzusetzen. Durch den Einsatz kohlefaserbasierter Werkstoffe und der Anbringung der Antriebe am

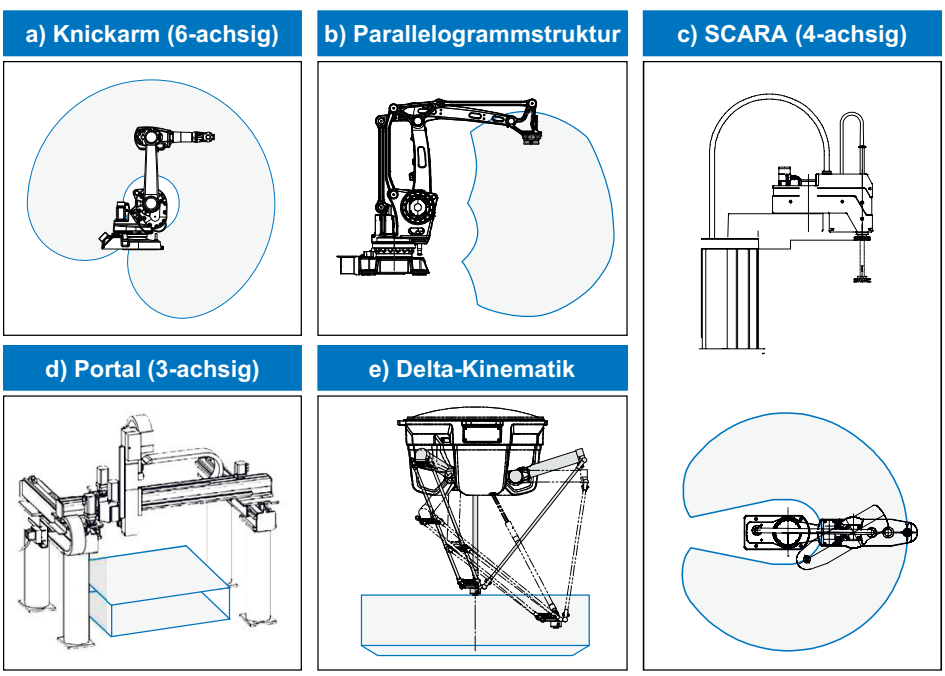


Bild 13.4 Robotertypen und ihre Arbeitsbereiche. Nach ABB, KUKA, Robert Bosch Manufacturing Solutions



Bild 13.5 Komponenten einer Robotersteuerung. Nach KUKA

Rumpf des Roboters ergibt sich eine relativ geringe bewegte Masse und hieraus die guten Dynamikeigenschaften des Robotertyps. Durch eine zentral angebrachte Kardanwelle kann neben den translatorischen Freiheitsgraden (x, y, z) auch ein rotatorischer Freiheitsgrad abgebildet werden.

Ein industrielles Robotersystem umfasst heute meist drei Komponenten, vgl. Bild 13.5:

- die Roboterkinematik,
- die Robotersteuerung (RC),
- das Handbediengerät bzw. HMI (Human Machine Interface).

Die Robotersteuerung enthält alle Komponenten und Funktionen, die zum Betrieb des Roboters erforderlich sind. Hauptbestandteile sind die Interpolationseinheit, die Logikeinheit (SPS-Funktionalitäten) und ein PC-basiertes Rechnersystem zur Programmverwaltung.

Über zusätzliche Kommunikationsschnittstellen besteht die Möglichkeit, weitere Peripheriegeräte z. B. zur Sensordatenverarbeitung anzuschließen, die bei der Positionsregelung des Roboters berücksichtigt werden können. Darüber hinaus ermöglichen Rechnerschnittstellen die Verwendung von Offline-Programmiersystemen auf externer Hardware.

13.2 Roboterkinematiken und Einlegegeräte

Industrieroboter und andere Handhabungsgeräte können nach ihren wichtigsten Kenndaten spezifiziert und miteinander verglichen werden, Bild 13.6.

Ein wesentliches Merkmal ist die Anzahl der gesteuerten Achsen, die Ausführung der Kinematik, die prinzipiell beliebig aus translatorischen und rotatorischen Achsen konfigu-

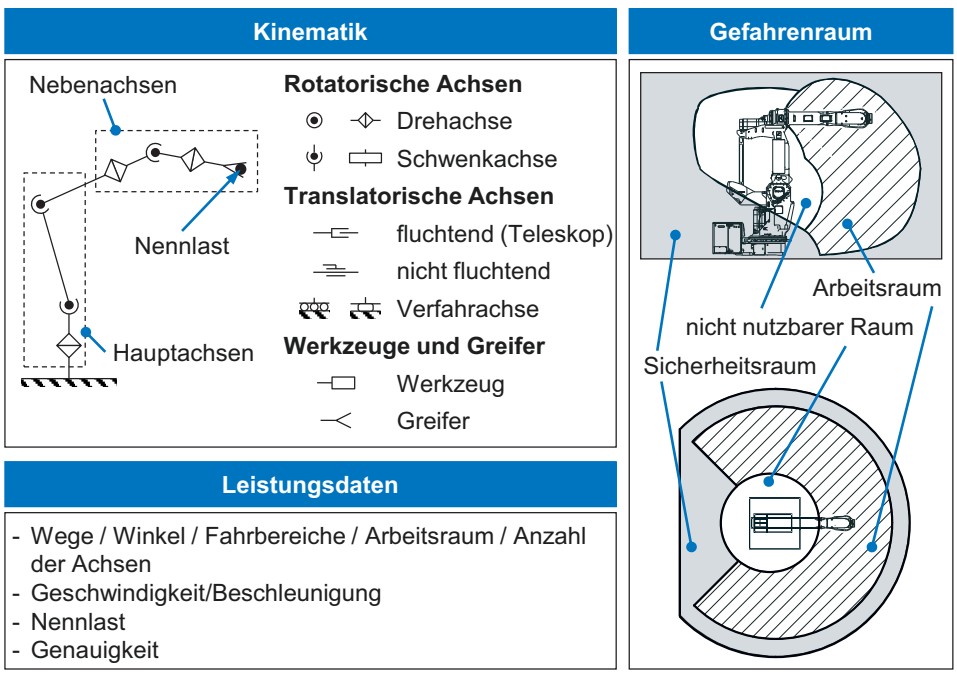


Bild 13.6 Spezifikation von Handhabungsgeräten

rierbar ist. Grundsätzlich ist zwischen den Maschinenachsen von Handhabungsgeräten und den Freiheitsgraden im kartesischen Arbeitsraum zu unterscheiden. Es sind bis zu sechs Freiheitsgrade, drei translatorische zur Positionierung sowie drei rotatorische zur Orientierung eines Körpers im Raum, realisierbar. Dabei ist für jeden erforderlichen Freiheitsgrad von Handhabungsgeräten mindestens eine mechanische Achse vorzusehen. Bei Robotern mit mehr als sechs mechanischen Achsen wird durch redundante Zusatzachsen in der Regel der Arbeitsraum erweitert. Häufig werden Bewegungen in einzelnen Freiheitsgraden durch die mechanische und steuerungstechnische Kopplung mehrerer mechanischer Achsen ermöglicht.

Die Hauptachsen von Robotern dienen im Wesentlichen dazu, den Greifer oder ein Werkzeug zu beliebigen Punkten des Arbeitsraumes zu verschieben. Als Hauptachsen können sowohl translatorische als auch rotatorische Achsen verwendet werden. Die Nebenachsen haben in der Regel die Funktion, die gewünschte Orientierung des Greifers bzw. des Werkzeugs herzustellen. Dazu sind stets rotatorische Achsen erforderlich.

Die nutzbaren Bewegungsmöglichkeiten eines Handhabungsgerätes werden durch den Arbeitsraum beschrieben, ◘ Bild 13.6. Dies ist derjenige Raum, der durch die Gesamtheit aller Achsbewegungen mit dem roboterseitigen Anbauflansch für Greifer und Werkzeuge erreicht werden kann. Für Kollisionsbetrachtungen muss jedoch der gesamte Bewegungsraum berücksichtigt werden. Dieser ist definiert als derjenige Raum, der von der Gesamtheit aller bewegten Elemente des Gerätes mit der Gesamtheit aller Achsbewegungen erreichbar ist. Die Differenz zwischen dem Bewegungsraum und dem Arbeitsraum ist der nicht nutzbare Raum, der durch eine geeignete Gerätekonstruktion möglichst klein gehalten werden sollte. Um den Bewegungsraum herum legt man einen angemessenen Sicherheitsraum fest und erhält so den Gefahrenraum, der bei arbeitendem Gerät nicht betreten werden darf.

Die wichtigste Lastkenngröße eines Handhabungsgerätes ist die Nennlast, als Summe aus Werkzeuglast (z. B. Gewicht eines Greifers) und Nutzlast (z. B. Gewicht des zu handhabenden Werkstücks). Die Nennlast ist die größtmögliche Last, die das Gerät ohne Einschränkungen im gesamten Arbeitsraum handhaben kann. Vielfach wird bei Robotern eine Zusatzlast angegeben, die auf dem Arm zusätzlich mitgeführt werden kann. Über die Nennlast hinaus können viele Geräte mit einer Maximallast betrieben werden, wenn nur mit reduzierter Geschwindigkeit verfahren oder nur ein begrenzter Teil des Arbeitsraumes genutzt wird.

Als Arbeitsgenauigkeit von Robotern wird zumeist die Wiederholgenauigkeit angegeben. Darunter ist die Streubreite zu verstehen, mit der eine beliebige Position im Arbeitsraum wiederholt unter konstanten Randbedingungen (Anfahrrichtung, -geschwindigkeit, -beschleunigung, Zuladung, Temperatur) angefahren werden kann. Die Absolutgenauigkeit hingegen gibt die Streubreite an, mit der ein Punkt im Arbeitsraum bezogen auf ein ortsfestes Koordinatensystem erreicht wird. Die Absolutgenauigkeit wird einerseits von den Randbedingungen z. B. Gewicht der Nutzlast, und andererseits von gerätespezifischen Faktoren (Steifigkeit, thermischer Drift) bestimmt. Als wesentliche Einflussfaktoren sind hier die statische Nachgiebigkeit, kinematische Fehler durch Fertigungstoleranzen (Parallelitäts- oder Getriebe- und Winkelfehler der Achsen zueinander), die Qualität der Weg-/Winkelerfassung sowie das Regelverhalten zu nennen. Die Absolutgenauigkeit liegt in der Regel weit unter der Wiederholgenauigkeit, kann aber durch Kalibrierungs- und Kompensationsverfahren verbessert werden. Handhabungsgeräte werden häufig in unmittelbarer Nähe der Prozessstelle an einem Messpunkt neu referenziert. Bezogen auf diesen Messpunkt sind die umgebende Peripherie und die Werkstücke exakt positioniert. Bei ausreichender Relativgenauigkeit des Handhabungsgerätes lassen sich Bewegungsabläufe dann offline programmieren (vgl. ► Kap. 13.5.2). Die Relativgenauigkeit entspricht prinzipiell der Absolutgenauigkeit, jedoch ist sie auf einen Teil des Arbeitsraumes begrenzt. Darüber hinaus wird bei Industrierobotern mit der Bahngenauigkeit die Streubreite angegeben, mit der eine vorgegebene Bahn, beispielsweise eine Gerade oder ein Kreis, abgefahren werden kann. Bahnkrümmung und Bahngeschwindigkeit haben hierbei einen direkten Einfluss auf die Bahngenauigkeit des Roboters.

Bauarten

Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal der Roboterbauarten ist deren Kinematik, die prinzipiell aus rotatorischen und linearen Achsen konfigurierbar ist. Aus der Vielzahl der möglichen Bauarten haben sich die in ◘ Bild 13.7 aufgeführten, gebräuchlichen Varianten durchgesetzt.

Zur Positionierung im Raum werden bis zu drei Hauptachsen benötigt, an die bis zu drei Nebenachsen zur Werkzeugorientierung adaptiert werden. Sonderbauformen mit Zusatzachsen oder redundanten Achsen sind an spezielle Einsatzfälle angepasst. Die wichtigsten Regeln zur Bezeichnung der Roboterachsen sind mit einigen realisierten Beispielen in ◘ Bild 13.8 dargestellt.

Kartesische Linearachsen werden wie bei Werkzeugmaschinen mit *X*, *Y*, *Z* bezeichnet, wobei die *Z*-Achse bei Handhabungsgeräten immer senkrecht steht. Abweichend davon wird bei Werkzeugmaschinen immer die Vorschubachse parallel zur Hauptspindelachse (Drehachse, Fräsachse) mit *Z* bezeichnet. In Analogie zu den Werkzeugmaschinenachsbezeichnungen wird die Rotationsachse um die *Z*-Achse mit *C* beschrieben, sodass häufig die erste Basisachse die *C*-Achse bildet (vertikaler Knickarmroboter, Roboter mit Zylinderkoordinaten). Die übrigen rotatorischen Hauptachsen tragen die Bezeichnungen *B* und *A*. Hier setzen dann die rotatori-

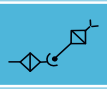
	Benennung	Prinzip	Achsen	Nutzlast	Arbeitsraum
Hauptachsen	Vertikaler Knickarm		3	≤ 2300 kg	Halbkugel r ≤ 4,6 m
	Horizontaler Knickarm (SCARA)		3	≤ 20 kg	Sichel r ≤ 1,5 m h ≤ 0,5 m
	Zylinderkoordinaten		3	≤ 80 kg	Zylinder r ≤ 2 m h ≤ 1 m
	Kugelkoordinaten		3	≤ 200 kg	Kugel r ≤ 2 m
	Linienportal		2	≤ 2400 kg	Fläche l ≤ 50 m h ≤ 2m
	Flächenportal		3	≤ 1300 kg	Quader l ≤ 60 m b ≤ 12 m h ≤ 2,4 m
Nebenachsen	Doppelwinkelhand		3	≤ 150 kg	Halbkugelfläche
	Zentralhand		3	≤ 200 kg	Halbkugelfläche
	Dreh-Schwenkgelenk		2	≤ 200 kg	Halbkugelfläche
	Drehgelenk		1	≤ 500 kg	Kreis (Punkt)

Bild 13.7 Bauarten und Kennwerte von Industrierobotern, spezifiziert nach ihren Hauptachsen und Nebenachsen. Nach ABB, EPSON Deutschland GmbH, Fanuc Deutschland GmbH, KUKA AG, Liebherr-Verzahntechnik

13

Translatorische Achsen

X: 1. horizontale Hauptachse
Y: 2. horizontale Hauptachse
Z: vertikale Hauptachse

R: Radialachse
U: Achse parallel zur X-Achse
V: Achse parallel zur Y-Achse
W: Achse parallel zur Z-Achse



Rotatorische Achsen

A: Hauptachse
B: Hauptachse
C: Hauptachse parallel zur Z-Richtung

D: 1. Nebenachse
E: 2. Nebenachse
P: 3. Nebenachse oder Nebenachse parallel zur Z-Achse

Translatorische Achsen

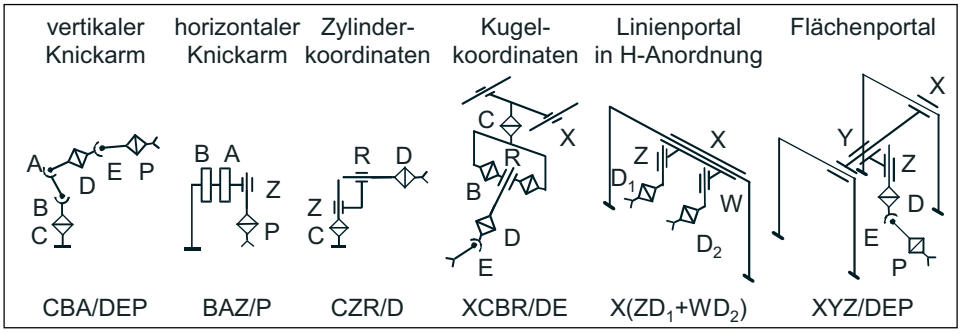


Bild 13.8 Achsbezeichnungen bei Handhabungsgeräten (VDI 2861). Nach ABB

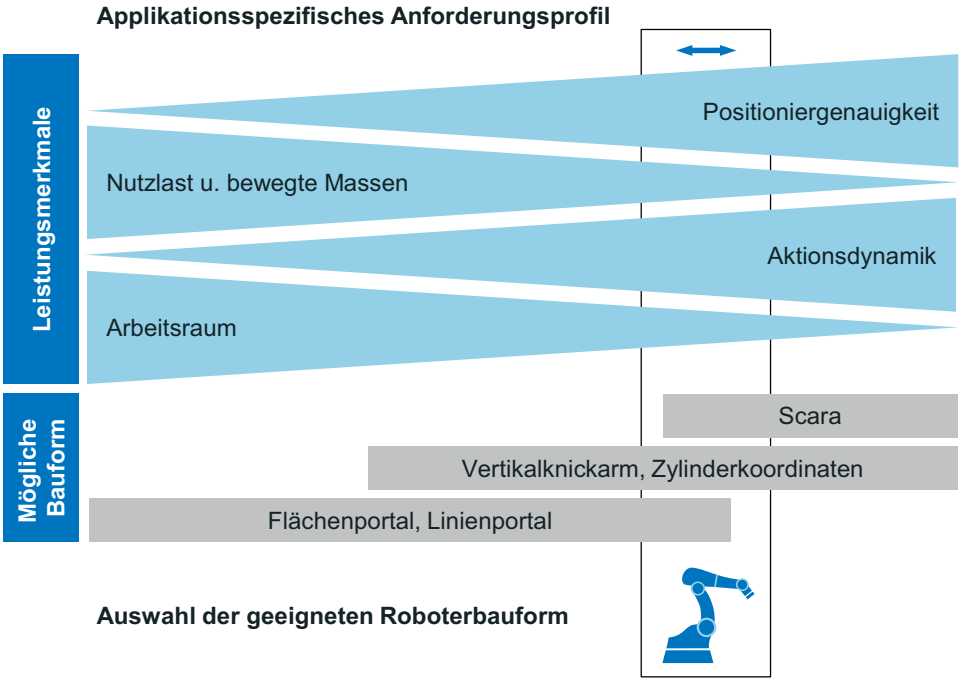


Bild 13.9 Leistungsgrenzen von Roboterbauarten

schen Nebenachsen mit den Buchstaben *D*, *E*, *P* auf. Die lineare Rotationsachse bei Kugel und Zylinderkinematiken wird mit R bezeichnet.

Diese genormte Bezeichnungsweise ist jedoch vielen Anwendern und Herstellern nicht bekannt, sodass fälschlicherweise oft die Achsen vom Ständer aufwärts, der kinematischen Kette folgend, durchnummeriert werden.

Der Einsatzbereich von Industrierobotern ist durch bauartspezifische Leistungsgrenzen eingeschränkt, die sich aus den statischen, dynamischen sowie den thermischen Eigenschaften der mechanischen Struktur ergeben, Bild 13.9. Im Bild werden die Merkmale Positioniergenauigkeit, Nutzlast, Aktionsdynamik und Arbeitsraum gegenübergestellt. Wie zu erkennen ist, verhalten sich die Merkmale aufgrund physikalischer Gesetze zum Teil widersprüchlich. So schließen hohe Anforderungen an die absolute Positioniergenauigkeit bei großer Aktionsdynamik eine große Nutzmasse, die bei ausreichender Steifigkeit mit einem hohen Eigengewicht einhergeht, aus. Ebenso entstehen bei großen Arbeitsräumen zwangsläufig größere statische, dynamische und thermische Verformungen, sodass nur geringe Positioniergenauigkeiten zu erwarten sind. Wie im unteren Teil von Bild 13.9 zu erkennen ist, wird der Robotertyp (Kinematik) allein vom erforderlichen Arbeitsraum bestimmt.

13.2.1 Vertikaler Knickarmroboter

Der vertikale Knickarmroboter gehört zu den Kinematiken mit der größten Verbreitung und wird aufgrund seines weiten Anwendungsbereiches in einer Vielzahl von Varianten und Leistungsklassen angeboten. Bild 13.10 zeigt an zwei Beispielen die mögliche Spannweite ihrer Baugrößen und Kennwerte. Gut nachvollziehbar sind hier die oftmals konträren Anforderungen hinsichtlich Nutzlast und Reichweite auf der einen und erzielbarer Genauigkeit und Geschwindigkeit auf der anderen Seite.

Der in Bild 13.11 gezeigte Vertikal-Knickarmroboter entspricht in seiner Achsanordnung der Standardkinematik vertikaler Knickarmroboter. Er besteht aus sechs rotatorischen Achsen, die von Drehstrom-Servomotoren mit integrierter Haltebremse angetrieben werden.

Das Motordrehmoment wird durch Planetengetriebe verstärkt. Die Winkelerfassung erfolgt mittels digitaler, inkrementell messender Drehgeber auf der Motorwelle, wodurch die Achsen bei der ersten Inbetriebnahme referenziert werden müssen. Die gezeigte Bauform ist für eine Nennlast von 150 kg ausgelegt. Das Eigengewicht und die Nennlast zusammen rufen bei entsprechender Auslenkung des Armes und der Schwinge ein hohes Drehmoment in der *B*- und der *A*-Achse hervor. Um eine hohe Dauerbelastung in den Antrieben zu vermeiden, ist für beide Achsen jeweils ein Massenausgleich vorgesehen. Infolge der veränderlichen Belastung am Endeffektor und unterschiedlicher Winkelstellungen kann kein vollständiges Drehmomentgleichgewicht erzielt werden. Das Belastungskollektiv der Achsen kann jedoch entscheidend herabgesetzt werden, sodass kleinere Antriebe zur Gewichts- und Kostenoptimierung beitragen.

In der *A*-Achse ist der Gewichtsausgleich auf einfache Weise durch die Verlagerung der Handachsenantriebe hinter das Armgelenk realisiert. Weitere Vorteile dieser Anordnung sind ein reduziertes Massenträgheitsmoment sowie die kompakte Bauform der Nebenachsenbaugruppe. Bei höheren Nennlasten kann optional eine Zusatzmasse am Armende

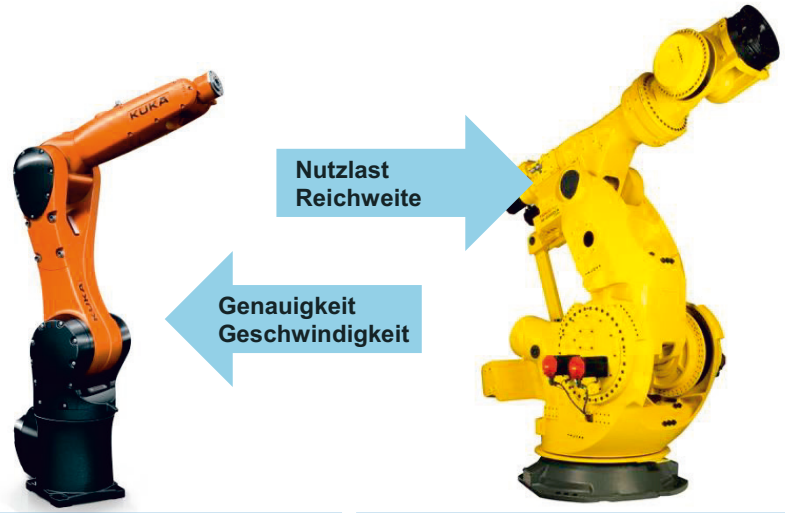


Bild 13.10 Leistungsspannweite bei Knickarmrobotern. Nach KUKA, Fanuc

Leistungsdaten	
- Nutzmasse:	6,0 kg
- Gewicht:	52 kg
- Reichweite:	0,9 m
- Wiederholgenauigkeit:	± 0,03 mm
- v_{max} Hauptachsen:	360 °/s
- v_{max} Nebenachsen:	615 °/s

Leistungsdaten	
- Nutzmasse:	2300,0 kg
- Gewicht:	11000 kg
- Reichweite:	3,7 m
- Wiederholgenauigkeit:	± 0,3 mm
- v_{max} Hauptachsen:	20 °/s
- v_{max} Nebenachsen:	40 °/s

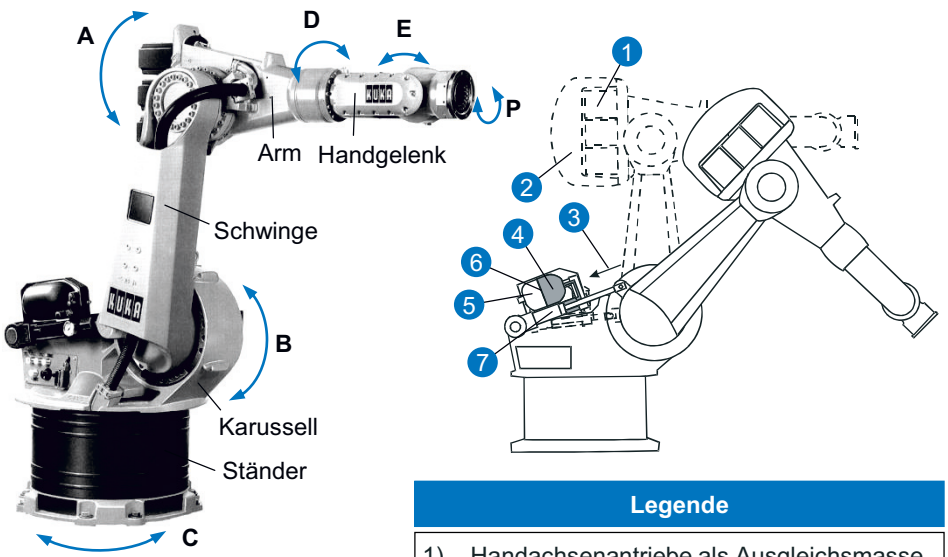


Bild 13.11 Vertikal-Knickarmroboter mit hydraulischem Massenausgleich. Nach KUKA

Leistungsdaten	
- Nutzmasse:	150,0 kg
- Reichweite:	2,4 m
- Wiederholgenauigkeit:	± 0,2 mm
- Max. Geschwindigkeit:	100,0 °/s

Legende	
1)	Handachsenantriebe als Ausgleichsmasse
2)	Zusatzmasse als Option für 150 kg
3)	Rückstellkraft F
4)	Hydraulikmedium
5)	Stickstoffdruckspeicher
6)	Membran
7)	Hydraulikzylinder

montiert werden, wodurch jedoch die Trägheitsmomente der *A*- und *B*-Achse steigen. Das Gegenmoment in der *B*-Achse wird durch einen hydraulischen Zylinder erzeugt, der kontinuierlich eine Zugkraft in einen Anlenkpunkt an der Schwinge einleitet. Die Lage und Anbindung an die *B*-Achse wurde so gewählt, dass sich bei konstanter Kraft des Zylinders das Kompensationsmoment dem Gewichtsmoment um die *B*-Achse automatisch anpasst. In senkrechter Stellung der Schwinge wird kein Gegenmoment erzeugt, da die Kraftwirkungslinie dann die *B*-Achse schneidet. Mit steigender Auslenkung der *B*-Achse wächst nicht nur der wirksame Hebelarm des Zylinderangriffspunktes an. Auch der Druck im Druckspeicher erhöht sich mit steigender Auslenkung der Schwinge, wodurch auch der Betrag der Ausgleichskraft zunimmt. Die Vorteile des hydraulischen Massenausgleichs liegen in seiner kompakten Bauform bei geringem Eigengewicht.

Bild 13.12 zeigt typische Anwendungsfelder mehrerer sechsachsiger Knickarmroboter in der Automobilfertigung. Im oberen Bild führen die Roboter mittels angeflanschter 3D-Sensoren Messoperationen von Automobilkarosserien durch. Im unteren Bild bestücken zwei Roboter eine Werkzeugmaschine für Biegeoperationen.

Der Roboter nach Bild 13.13 wird vorwiegend als Teleoperator eingesetzt und verfügt als Besonderheit über endlos drehbare Achsen, deren Antriebe in der Roboterbasis zu einer Einheit zusammengefasst sind.

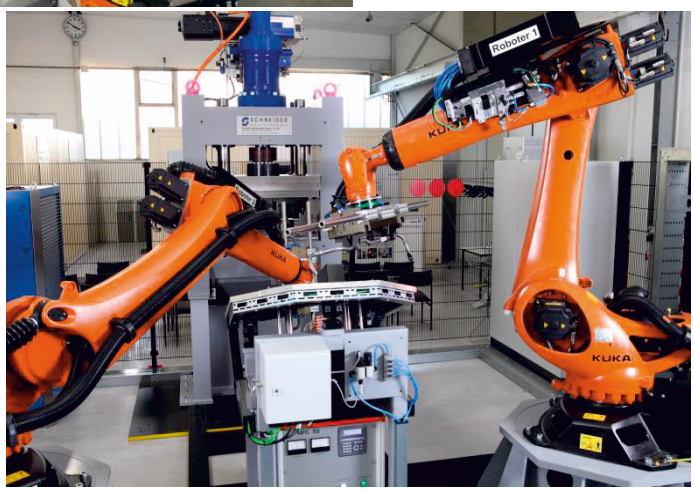
Über konzentrische Hohlwellen und Kegelradpaarungen in den Gelenken wird das Drehmoment zu den Achsen übertragen. Auch der Greifer wird von der Antriebsbasis aus über eine innenliegende Welle betätigt. Mit Hilfe eines Kugelgewindetriebes wird die Rotation der Welle in den Fingerhub umgesetzt. Alternativ zum Greifer sind beliebige Aktoren über diese Welle als vollwertig geregelte Achse adaptierbar. Der Roboter ist wahlweise frei programmierbar oder durch ein spezielles Bediengerät als Teleoperator in allen Freiheitsgraden manuell steuerbar. Dabei besteht über das Motormoment eine Kraftrückführung zum Bediengerät. Nicht zuletzt die schlanke Bauweise der kabellosen Arme und die uneingeschränkte Bewegungsfreiheit zeichnen diesen Roboter für den Einsatz in Bereichen aus, die für den Menschen unzugänglich sind. Als Einsatzgebiete sind hier die Kerntechnik, Meerestechnik, Weltraumtechnik sowie die Handhabung giftiger oder explosiver Stoffe zu nennen.

Der Leichtbauroboter Bild 13.14 verfügt über sieben Achsen, die einem menschlichen Arm nachempfunden sind.

Bild 13.12 Roboterzellen im Automobilbau. Nach KUKA



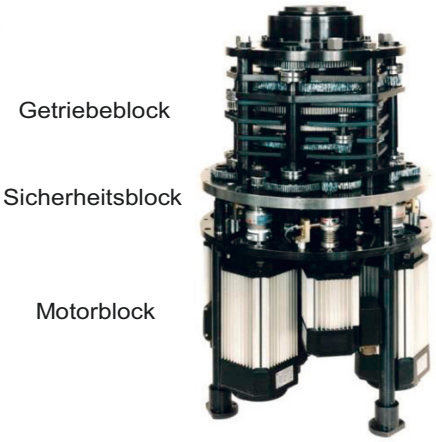
Roboterzelle zum Inlinemessen von Automobilkarosserien



Roboterzelle zum Bestücken einer Maschine für Biegeoperationen



Innerer Aufbau



Eigenschaften

- Alle Achsen endlos drehbar
- Schlanke Bauweise
- Keine Verkabelung im Arm
- Glatte, abgedichtete Arm- und Gelenkkörper
- Armlänge 1-5 m
- Nennlast 5 bis 120 kg
- Freiheitsgrade: 6-7
- Strahlenbeständigkeit bis 1 MGy

Bild 13.13 Sechsachsiger Vertikal-Knickarmroboter mit zentraler Antriebsbasis. Nach Wälischmiller Engineering



Leistungsdaten	
Achsen:	7
Nennlast:	7-14 kg
Arbeitsraum.:	800 mm
Wiederholgen.:	±0,1 mm
Gewicht.:	22-29 kg
Einbaulage:	beliebig

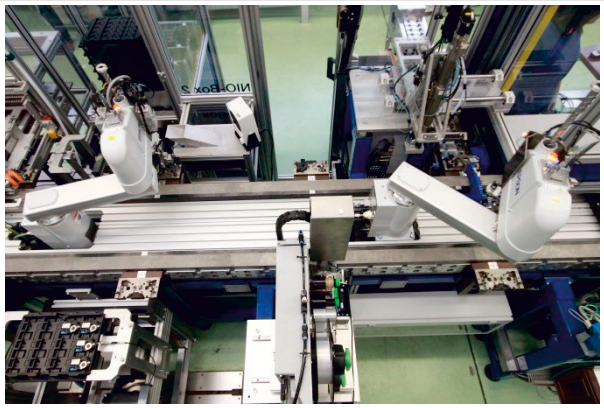
Bild 13.14 Leichtbauroboter mit integrierter Kraft-/Momenten-Sensorik. Nach KUKA

In den Gelenken sind Antriebstechnik und Elektronik samt Sensorik und Safety-Funktionen integriert. Mit der integrierten Gelenkmomenten-Sensorik dient diese Roboterkinematik insbesondere zur Automatisierung feinfühliger Montageaufgaben oder kraftgeregelter Fügevorgänge, wie z. B. das Stopfen-Setzen in der Automobilbranche oder wie in der Abbildung gezeigt, die Detektion der korrekten Einbauposition durch rückgekoppelte Kraftmessung. Auch Tätigkeiten im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation ohne Schutzzäune sind durch den integrierten, sicheren Kollisionsschutz möglich. Entsprechend ist dieser Robotertyp auch ► Kap. 13.2.6.3 zuzuordnen. Mit einer eigens entwickelten Steuerungs- und Programmierumgebung für diesen Roboter sind objektorientierte Programmierungen, wie durch Führen des Roboters mit der Hand, realisierbar.

13.2.2 Horizontaler Knickarmroboter

Der horizontale Knickarmroboter, auch als SCARA bezeichnet, wurde vorwiegend für Montageaufgaben wie z. B. für die Platinenbestückung in der Elektronikindustrie konzipiert. Die Bauweise zeichnet sich durch eine hohe Steifigkeit in vertikaler Richtung aus, da alle auftretenden Kräfte sowie das Eigengewicht als Moment senkrecht zu den Lagerdrehachsen

Bild 13.15 Vierachsiger Horizontal-SCARA-Roboter in einer Produktionslinie. Nach Epson

Epson SPIDER	Typisches Einsatzgebiet
	

Leistungsdaten	
Bauart:	innenorientierter horizontaler Gelenkarm
Traglast:	max. 4 kg
Reichweite:	350-550 mm (horizontal) 130 mm (vertikal)
Wiederholgenauigkeit:	±0,01 mm

wirken, Bild 13.15. Bei den dargestellten Handhabungsgeräten handelt es sich um vierachsige Geräte mit drei Rotations- und einer Translationsachse.

Die lineare Z-Hubachse ist zumeist als Kugelgewindetrieb ausgeführt und weist damit ebenfalls eine hohe Steifigkeit in der Vertikalen auf. In horizontaler Richtung ist die Struktur relativ nachgiebig. Die Hauptfüge- und Belastungsrichtung ist jedoch die Vertikale. Horizontal-Knickarmroboter werden wie im dargestellten Beispiel häufig für Kommissionieraufgaben („Pick & Place“) eingesetzt, weil sie vergleichsweise kostengünstig sind. Aktuelle Modelle nutzen durch geschickte Bauweise den gesamten Arbeitsbereich der Armlänge, sodass keine „Totzone“ auftritt.

13.2.3 Kartesische Linienportal-Roboter

Kartesische Flächenportalroboter und Linienportale verfügen über einen quaderförmigen Arbeitsraum. Bild 13.16 zeigt eine kompakte Bauform, die auch aufgrund ihrer Baugröße mit geringem Aufwand in Betrieb genommen werden kann. Die Antriebe der drei Linearachsen sind direktangetriebene Linearachsen, bei denen durch Umpolung verschieden gepolter Magnetfelder eine lineare Bewegung des Stators gegenüber dem Läufer erzielt wird.

Linienportale haben sich als Standardlösung zur Beschickung von Werkzeugmaschinen durchgesetzt, da sie von oben in den Arbeitsraum greifen und damit den Zugang zur Maschine kaum beeinträchtigen. Sie werden auch für Kommissionieraufgaben eingesetzt, beispielsweise um Werkstücke von einer Fertigungs- oder Montagelinie auf eine andere, parallel verlaufende Anlage umzusetzen. Linienportale haben nur zwei Hauptachsen, sodass man von einer Arbeitsfläche sprechen kann.



Leistungsdaten	
Nennlast:	40 kg
Achsanzahl:	3
Arbeitsraum:	1000/700/300 mm

Bild 13.16 Vierachsiger kartesischer Linienportalroboter. Nach Epson



Bild 13.17 Linienportale mit Doppellaufwagen-Anordnung in zwei verschiedenen Applikationen. Nach Liebherr-Verzahntechnik

Größere Ausführungen kartesischer Portale sind in Bild 13.17 dargestellt. Im rechten Bild ist eine Anordnung eines Linienportals mit mehreren Laufwagen gezeigt, die auf einem Linearführungsträger mit gleichen Hubeinheiten basiert und der Werkstückhandhabung in einer flexiblen Fertigungslinie dient. Die beiden Laufwagen sind mechanisch gekoppelt und werden durch einen Antrieb verfahren. Es existieren aber auch Linienportale mit zwei Laufwagen, die unabhängig voneinander verfahren können, sodass – je nach Applikation – eine Taktzeitoptimierung bzw. Flexibilitätserhöhung erzielt werden kann.

Die Hubachsen von Linienportalen können vielseitig gestaltet sein. Die einfachste Ausführung besitzt keine Nebenachsen und nur einen Greifer, Bild 13.17 rechts. Eine wesentliche Verkürzung der Werkstückwechselzeit kann durch eine Doppellaufwagen-Anordnung erzielt werden, bei der die erste Hubachse das Fertigteil entnimmt und die zweite Hubachse das nächste Rohteil direkt in die Maschinenvorrichtung einlegt. Ähnlich kurze Werkstückwechselzeiten wie die Doppellaufwagen-Anordnung ermöglicht die Ausführung mit Drehkopf und Doppelgreifer. Der Drehkopf erlaubt es, die Orientierung der Werkstücke zu verändern. So lassen sich bereitgestellte Werkstücke aufnehmen und in die Maschinenvorrichtung einführen. Der zusätzliche Vorteil der Änderung des Orientierungswinkels der Werkstücke lässt auch flexiblere Vorrichtungen in einer Fertigungslinie zu.

13.2.4 Kartesisches Flächenportal und Linienportal mit Querausleger

Für größere Abmessungen in y-Richtung bietet sich eine beidseitige Abstützung des Auslegers an. Man spricht dann von einem Flächenportal mit Querbalken oder Brücke,



Bild 13.18 Dreiachsiger Flächenportalroboter in einer Eisenbahn-Räder und -Achsenfertigung. Nach BLEICHERT Automation



Leistungsdaten RL80	
Nennlast:	38-114 kg
Achsanzahl:	4
Maximale Geschwindigkeit:	2,6 m/s
Arbeitsraum:	je nach Anwendungsfall

Bild 13.19 Vierachsiger Linienportalroboter mit Querausleger. Nach KUKA

worauf sich der Laufwagen in y-Richtung bewegt, Bild 13.18. Das Portal dient im gezeigten Anwendungsfall der Handhabung schwerer Werkstücke.

Bild 13.19 zeigt ein weiteres Anwendungsszenario, in dem Linienportale mit Querausleger und Vertikal-Knickarmroboter in einer Produktionslinie zusammen arbeiten. In der gezeigten Produktionslinie werden typische Strukturbauteile im Karosseriebau weiterverarbeitet wie z. B. die B-Säule und der Längsträger, sowie Querträger und das Stegteil-Radhaus. Sie unterliegen immer höheren Anforderungen, sodass verstärkt Verfahren miteinander kombiniert werden, z. B. das Kleben und Punktschweißen, um großflächige Verbindungen mit hoher Festigkeit und Stabilität zu erzielen. Dabei werden auch hochfeste, warm umgeformte Pressteile, rollgeformte Profile und Standardkomponenten, wie Isofix-Bügel, in den sicherheitsrelevanten Baugruppen verwendet.

13.2.5 Parallelkinematiken

13.2.5.1 Kombinierte Kinematiken

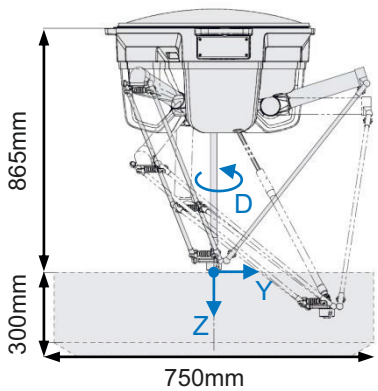
Seit Mitte der 1990er Jahre haben im Werkzeugmaschinen- und Roboterbau Parallelkinematiken Einzug gehalten. Der vierachsige Roboter in Bild 13.20 besteht aus einer dreiachsigen Parallelkinematik mit einer zusätzlichen Drehachse in der Roboterhand. An den drei rotatorisch bewegten Armen am Grundgestell sind jeweils zwei parallele Doppelstreben über Kardangelenke angekoppelt, die auf der anderen Seite mit der bewegten Plattform über Kugelgelenke verbunden sind. Auf diese Weise erhält die Plattform ihre Orientierung bei der Bewegung im Raum konstant bei, d. h. die Greiferdrehachse P bleibt in ihrer senkrechten Lage. Aufgrund der leichten Bauweise können sehr hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bis zu 1,5 g realisiert werden. Das Haupteinsatzgebiet liegt im Pick & Place-Bereich, z. B. in der Verpackungsindustrie.

13.2.5.2 Vollparallele Kinematiken

Der vollparallele Hexapodroboter nach Bild 13.21 realisiert alle sechs Freiheitgrade der Plattformbewegung über die servogetriebenen, längenveränderlichen Teleskopbeine. Er zeichnet sich ebenfalls durch eine hohe Steifigkeit aus.

Bild 13.20 Vierachsige Parallelkinematik für Pick & Place Operationen. Nach ABB





Leistungsdaten	
Achsen:	4
Nennlast:	1 kg
Arbeitsraum-D.:	750 mm
Wiederholgen.:	0,1 mm
Verfahrgeschw.:	10 m/s
Beschleunigung:	15 m/s^2



Leistungsdaten	
Achsen:	6
Nennlast:	100 kg
Reichweite:	1,04 m
Wiederholgen.:	±0,1 mm
Geschw. horiz.:	1,5 m/min
Geschw. vert.:	0,3 m/min

Bild 13.21 Sechsachsiger Hexapod-Roboter. Nach Fanuc

Bedingt durch das Hexapod-Prinzip sind die erreichbaren Neig-, Gier- und Rollwinkel gegenüber einer konventionellen Roboterhand stark eingeschränkt und zudem von der Position der Flanschplatte im Arbeitsraum abhängig.

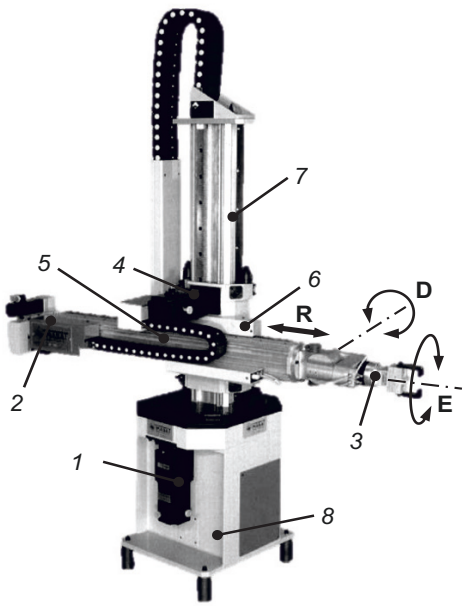
13.2.6 Sonderbauformen

13.2.6.1 Zylinder- und Kugelkoordinatenroboter

Eine reine Zylinderkoordinatenbauweise ist heute trotz des einfachen Aufbaus kaum noch anzutreffen, ◘ Bild 13.22 links.

Diese Bauart erlaubt vergleichbar dem Horizontal-Knickarmroboter nach ◘ Bild 13.15 den seitlichen Maschinenzugang, jedoch wird die Erreichbarkeit des Zielpunktes durch den graden Arm stark eingeschränkt. Die fehlende Knickachse im Arm verhindert sowohl ein horizontales wie auch vertikales Umfahren einer Störkontur. Zudem wird durch den nach hinten ragenden Ausleger der Gefahrenraum unnötig ausgedehnt, was durch die Verwendung eines Teleskoparmes jedoch verbessert werden könnte. Die linearen

Zylinderkoordinaten



Kugelkoordinaten

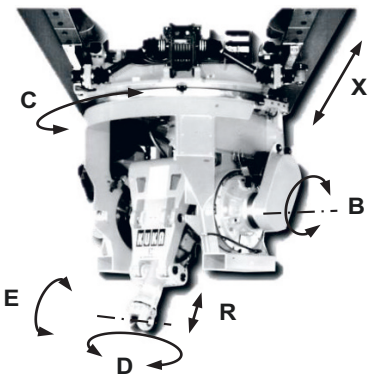


Bild 13.22 Zylinder- und Kugelkoordinatenroboter. Nach Masat, KUKA

Legende	
1:	Antrieb C-Achse
2:	Antrieb D-Achse
3:	Antrieb E-Achse
4:	Antrieb Z-Achse
5:	Ausleger
6:	Support
7:	Drehturm
8:	Ständer

Achsen für den Ausleger des hier gezeigten Roboters in radialer Richtung wie auch der Support für die Z-Achse werden über Ritzel und Zahnstange angetrieben. Eine Eigengewichtsentlastung des Supports ist durch einen seitlich angebrachten Pneumatikzylinder realisiert.

Der Kugelkoordinatenroboter nach Bild 13.22 rechts realisiert seine drei Hauptkoordinatenbewegungen durch die beiden rotatorischen *B*- und *C*-Achsen sowie durch den in seiner Länge veränderlichen Arm (*R*-Achse). Die *R*-Achse geht durch den Schnittpunkt der *B*- und *C*-Achsen (Kugelmittelpunkt). Am Ende des Armes sind die üblichen Nebenachsen für die Handorientierung angebracht.

Der Roboter wurde speziell für das einseitige Punktschweißen gegen Unterkupfer im Fahrzeugbau konzipiert. Beim konventionellen Widerstandspunktschweißen mit Zange wird die erforderliche Anpresskraft von der Zangenmechanik erzeugt. Wenn die Schweißstellen weit vom Blechrand entfernt sind, ist eine große Zangenspannweite, einhergehend mit aufwendigerer Krafterzeugung bei hohem Zangengewicht erforderlich. Als Folge wäre ein leistungsstarker, großer Roboter notwendig.

Eine sinnvolle Alternative dazu stellt das einseitige Punktschweißen dar, bei dem vom Roboter lediglich eine Elektrode geführt wird. Die zweite Elektrode ist in Form einer flächigen Kupferauflage unter dem Blech realisiert. Im Gegensatz zum Zangenschweißen muss hier die Anpresskraft vom Roboter selbst aufgebracht werden. Der gezeigte Kugelkoordinatenroboter erzeugt eine Anpresskraft von bis zu 5000 N, die von konventionellen Roboterkinematiken allein aufgrund ihrer zu geringen Steifigkeit nicht aufgebracht werden können. Die platzsparende und steife Portalbauweise realisiert die zusätzliche *X*-Achse und führt zu einer Arbeitsbereichserweiterung.



Leistungsdaten	
Achsen:	5 Drehachsen/1 Linearachse
Maximallast:	16 kg
Arbeitsraum (linear):	bis zu 30 m
Wiederholgenauigkeit:	±0,05 mm

Bild 13.23 Sechsachige Hybridkinematik. Nach KUKA

13.2.6.2 Hybridkinematiken

Unter Hybridkinematiken versteht man die Kombination zweier Roboterbauformen. In Bild 13.23 ist eine sechsachsige Hybridkinematik dargestellt, welche die Vorteile des Linearkonzepts mit denen des Knickarmkonzepts verbindet. Das Roboterportal ist gut geeignet für den Einsatz in niedrigen Produktionshallen, da aus dem kompakten Aufbau des Roboters und der kombinierten Linear-Knickarm-Kinematik eine sehr geringe Bauhöhe resultiert. Die Einsatzmöglichkeiten dieser Kinematik gestalten sich somit als sehr flexibel. Sie erstrecken sich über Tätigkeiten wie das Be- und Entladen von Werkzeugmaschinen, finden sich aber auch in Schutzgas-Schweißanwendungen für komplexere Werkstück-Geometrien wieder.

Durch die lineare Hauptachse in Längsrichtung und die fünf Drehachsen ergibt sich ein quasi zylinderförmiger Arbeitsraum parallel zur Produktionsmaschine. Kopfüber hängend kann der Roboter zum Einlegen oder Entnehmen von Bauteilen seitlich in die Maschine greifen. Die Flexibilität dieser Knickarmkinematik mit insgesamt sechs Freiheitsgraden erlaubt auch komplexe Entnahmebewegungen, ohne dass zusätzliche Kipp- oder Drehmodule an der Kopfachse montiert werden müssen.

In Bild 13.24 ist ebenfalls eine hybride Roboterbauform dargestellt. Der hier dargestellte Roboter dient zur Unterstützung häufiger Palettenwechsel, entweder direkt in die Werkzeugmaschine oder in das nebenstehende Handlingsystem.

13.2.6.3 Kollaborative Roboterbauformen

Der in Bild 13.25 dargestellte Zweiarm-Roboter bildet ein Robotersystem, welches den Mensch-Roboter-Kollaborationssystemen (MRK-Systeme) zuzuordnen ist. Mit jeweils sieben Achsen pro Roboterarm ist er, ähnlich dem Roboter „iiwa“ der KUKA Roboter GmbH (vgl. Bild 13.14), dem Arm des Menschen nachempfunden. Er stellt eine flexible

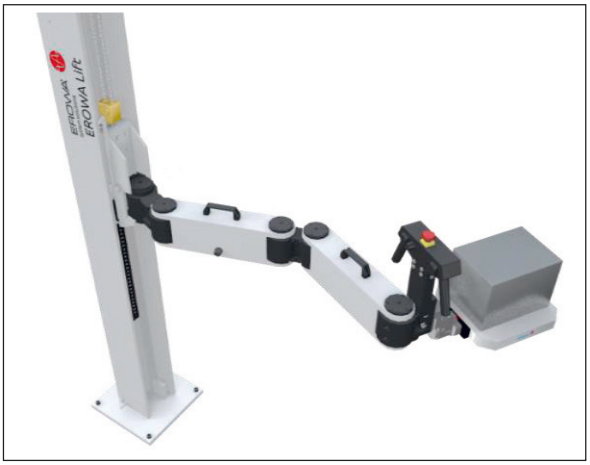
EROWA Lift	Typisches Einsatzgebiet
	

Bild 13.24 Hybridkinematik zur Unterstützung von Handlingaufgaben. Nach EROWA AG

Leistungsdaten	
Traglast:	100-250 kg
Reichweite:	1660 mm (vertikale Richtung) 1300-1850 mm (horizontale Richtung)
Schwenkbereich:	360°
Max. Geschwindigkeit:	4 m/min

Lösung zur Handhabung und Montage von Kleinteilen dar und wird aufgrund seiner hohen Flexibilität heutzutage hauptsächlich als Unterstützung in der Fertigung der Elektroindustrie verwendet. Durch eine integrierte Kraftsensorik ist der Roboter inhärent sicher, sodass er ohne die Verwendung von Sicherheitszäunen in direkter Umgebung mit Personen ohne Verletzung von Sicherheitsrichtlinien verfahren kann. Durch Integration eines Vision Systems und Greifhänden an beiden Roboterarmen ist das Robotersystem vielseitig einsetzbar.



Leistungsdaten	
Achsen:	7 pro Arm
Nennlast:	500 g pro Arm
Arbeitsraum:	559 mm
Wiederholgenauigkeit:	0,02 mm
Verfahrgeschwindigkeit:	1,5 m/s
Beschleunigung:	11 m/s^2

Bild 13.25 Kollaborativer Zweiarm-Roboter YuMi. Nach ABB

In Bild 13.26 ist der Roboter mit der Typenbezeichnung CR-35iA dargestellt. Er ist ein handelsüblicher Industrieroboter der Firma Fanuc, der zusätzlich von einer weichen Gummihaut umhüllt ist. Dadurch ist er ebenfalls den kollaborativen Robotern zuzuordnen und befähigt, auf engstem Arbeitsraum ohne Gefährdung nahestehender Personen zu arbeiten. Durch zusätzliche Kraft-Momenten-Sensorik in der Basis des Roboters werden von außen eingeleitete Störungen detektiert und die Bewegungsgeschwindigkeit herabgesetzt bzw. ein Stopp des Roboters eingeleitet. Mit einer Traglast von bis zu 35 kg und einer Reichweite von 1,8 m ist es mit diesem Robotersystem möglich, auch schwerere Werkstücke zu bewegen bzw. zu montieren.

Der Roboter APAS assistant der Firma Bosch stellt das erste Industrierobotersystem dar, welches von der deutschen Berufsgenossenschaft (BG) für den kollaborativen Betrieb zertifiziert wurde, Bild 13.27. Das System besteht aus einem handelsüblichen Vertikal-Knickarmroboter, der auf einer mobilen Basis an jeden beliebigen Arbeitsplatz integriert werden kann. Durch eine umhüllende kapazitive Sensorschicht stoppt das System berührungslos, falls sich ihm eine Person nähert. Mit einem sensitivem Greifersystem und kameragestützter Teileerkennung eignet sich das Robotersystem für das Palettieren und Sortieren von Kleinteilen, wird aber auch zum Be- und Entladen von Produktionsmaschinen genutzt.

Die Mensch-Roboter-Kollaboration in der Robotik erfährt einen zunehmend höheren Stellenwert, damit Personen und Roboter an einem gemeinsamen Arbeitsplatz komplexe



Leistungsdaten	
Achsen:	6
Traglast:	35 kg
Reichweite:	1813 mm
Max. Geschwindigkeit:	250 mm/s
Wiederholgenauigkeit:	±0,08 mm

Bild 13.26 Kollaborativer Knickarm-Roboter. Nach Fanuc



Leistungsdaten	
Achsen:	6
Traglast:	7 kg
Reichweite:	911 mm
Wiederholgenauigkeit:	±0,03 mm
Besonderheit:	Kapaz. Sensorhaut

Bild 13.27 Kollaborierendes Robotersystem APAS assistant. Nach Robert Bosch Manufacturing Solutions

Aufgaben erfüllen können. Da in diesem Zusammenhang kontinuierlich neue, innovative Roboterkonzepte erprobt und bis zur Marktreife vorangetrieben werden, führt dieses Kapitel nur einen aktuellen Ausschnitt aller kollaborativen Robotersysteme auf.

13.3 Koordinatensysteme und Bezugspunkte

Zur Beschreibung der Bewegungsoperationen eines Industrieroboters ist die Festlegung von Koordinatensystemen im Arbeitsraum und von Bezugspunkten am Industrieroboter erforderlich. Sie bilden die Basis für die eindeutige Definition von Bewegungsanweisungen im Programm des Industrieroboters. Anwendung finden dabei unterschiedliche Koordinatensysteme jeweils in Abhängigkeit der zu lösenden Handhabungsaufgabe.

Gelenkkoordinaten (*achsspezifische Roboterkoordinaten*) beschreiben die räumliche Anordnung der Industrierobotergelenke im Bezug auf einen lokalen, unbeweglich in der Achse liegenden Koordinatenursprung, Bild 13.28 a. Die aktuelle Stellung eines Roboters kann auf diese Weise mit den Verdrehwinkeln um diese Koordinatenachse bzw. als Positionsverschiebung aus dem Koordinatennullpunkt bei Schubgelenken beschrieben werden.

Weltkoordinaten (*kartesische Roboterkoordinaten*) definieren die Position und Orientierung des Tool-Center-Points (TCP) in Beziehung zu einem Roboter-Basiskoordinatensystem. Im Allgemeinen befindet sich dieses Basiskoordinatensystem zentriert in der Aufstellungsfläche des Industrieroboters Bild 13.28 b.

Die Definition eines Werkzeugkoordinatensystems ist Voraussetzung für die Programmierung von Handhabungsaufgaben mithilfe kartesischer Koordinaten (z. B. innerhalb des Weltkoordinatensystems). Das Werkzeugkoordinatensystem hat im Tool-Center-Point seinen Ursprung, vgl. Bild 13.28 c.

Die Verwendung von Werkzeugen am Roboterflansch des Industrieroboters (IR) wird durch Definition einer Werkzeugkorrektur berücksichtigt. Sie verschiebt den Tool-Center-Point und beschreibt räumlich die Lage des spezifischen Arbeitspunktes des verwendeten Werkzeugs (vgl. Geometriedatenverarbeitung, ▶ Kap. 11.2.4.2). Es ist möglich, mehrere Werkzeugkorrekturen gleichzeitig auf der Robotersteuerung abzuspeichern, um innerhalb eines Programmzyklusses Bewegungsbahnen für verschiedene Werkzeuge berechnen zu können.

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen roboter- bzw. werkzeugspezifischen Bezugssystemen ermöglichen IR-Steuerungen dem Anwender durch Festlegung applikationsabhängiger Nullpunktkorrekturen die Definition von aufgabenspezifischen Basiskoordinatensystemen, Bild 13.29. Mit Hilfe von Basiskoordinatensystemen können z. B. Palettierungsaufgaben wesentlich flexibler programmiert werden, da lediglich ein Bezugspunkt der Palette absolut im Raum definiert werden muss. Alle weiteren Werkstückpositionen auf der Palette können unabhängig vom Standort der Palette relativ zu diesem Bezugspunkt definiert werden.

Zur aktuellen Positionsbestimmung der einzelnen Roboterachsen werden in der Regel absolute oder inkrementelle

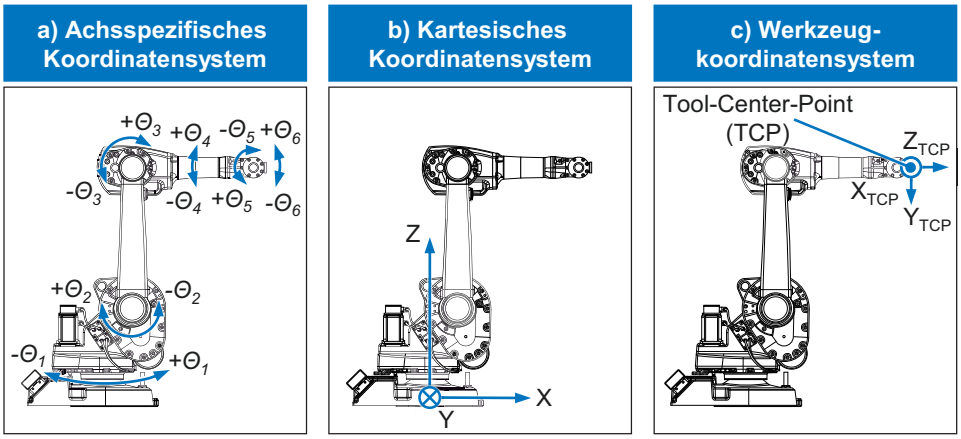


Bild 13.28 Koordinatensysteme eines Industrieroboters

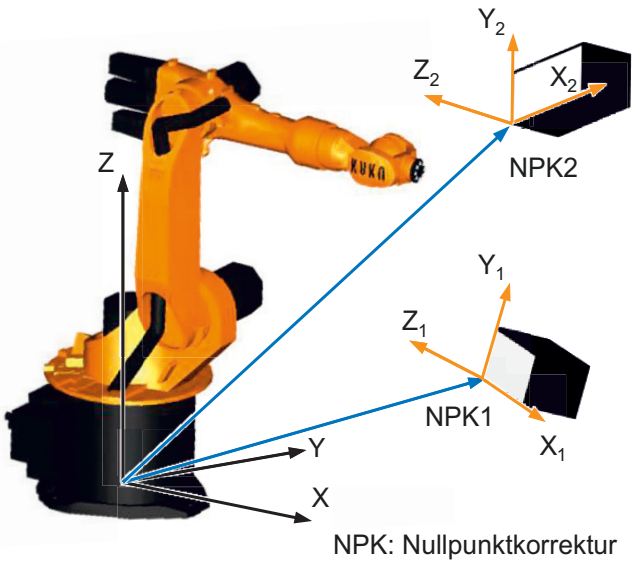


Bild 13.29 Hilfskoordinatensysteme durch Nullpunktkorrektur

Weggeber verwendet. Im Gegensatz zu absoluten Gebern können inkrementelle Geber nur eine relative Position zu einem zuvor definierten Bezugspunkt angeben (vgl. Positionsmesssysteme für NC-Maschinen, ▶ Kap. 2.3).

Darüber hinaus existieren an Industrierobotern weitere robotertypabhängige Bezugspunkte, die jeweils den mechanischen, den mathematischen bzw. den Referenzpunkt jeder einzelnen Achse festlegen. Die Unterscheidung von mechanischem und mathematischem Nullpunkt wird erforderlich, da im Allgemeinen die präzise Montage des Industrieroboters selbst nur in besonders günstigen Positionen erfolgreich durchgeführt werden kann. Die Steuerungsalgorithmen zur Bewegungsführung des Roboters basiert auf geometrisch günstig liegenden mathematischen Nullpunkten der Roboterachsen, wie z. B. der in ◘ Bild 13.29 dargestellten, rechtwinkligen „Kanonenstellung". Im Regelfall existiert eine Verschiebung zwischen diesen mathematischen und den mechanischen Nullpunkten, die durch spezielle Maschinendaten der Steuerungssoftware berücksichtigt werden.

Zur Einstellung der Roboterkinematik müssen die einzelnen Achsen jeweils justiert werden. Hierzu sind Referenzpunkte an den Achsen angebracht, die während der Justage angefahren werden, vgl. ◘ Bild 13.30. Im dargestellten Beispiel wird ein Messtaster an die zu justierende Achse ange-

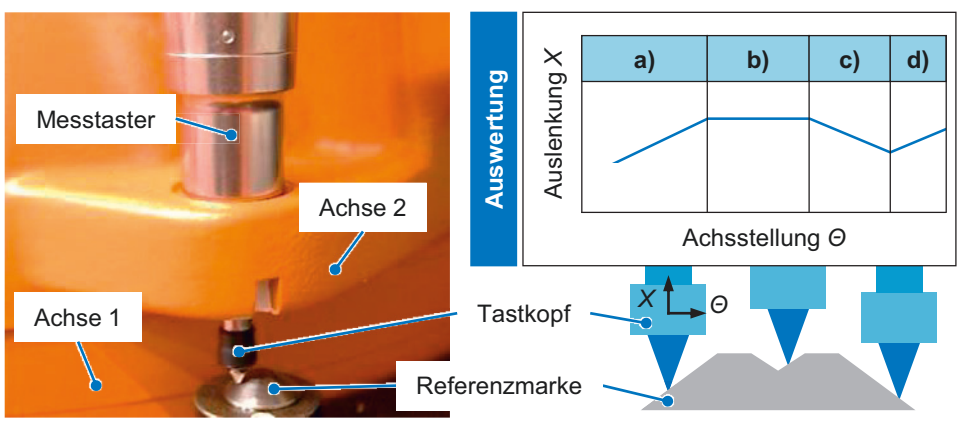


Bild 13.30 Referenzpunkt einer Roboterachse. Nach KUKA

schlossen, an dem sich ein axial verschiebbarer Tastkopf befindet. Der Tastkopf wird z. B. durch eine Federkraft gegen die Referenzmarke gedrückt und folgt somit der Außenkontur der Marke. Der Justagewert ergibt sich schließlich aus der Flankenauswertung der aufgezeichneten Messwerte. Dazu verfährt die Robotersteuerung die Achse – nach manueller Vorausrichtung der Achse – selbständig, sodass der Tastkopf allmählich auf die Ebene der Referenzkerbe geführt wird (a: steigende Flanke). Anschließend folgt der Tastkopf einem Plateau (b), ehe er in die Kerbe eintaucht (c: fallende Flanke). Am Umkehrpunkt der Kerbe nimmt die Auslenkung des Tastkopfes schließlich wieder zu (d: steigende Flanke). Dieser Punkt (Übergang c → d) markiert den Justagewert, der durch dieses Verfahren mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.

Grundsätzlich ist eine Justage bei der Erstinbetriebnahme eines Robotersystems durchzuführen und bei der wiederholten Inbetriebnahme zu überprüfen. Um bei verschiedenen Belastungsfällen der Kinematik, z. B. durch Bauteile mit stark unterschiedlicher Masse, eine höhere Positioniergenauigkeit zu erzielen, sollte eine erneute Justage zur Lastkorrektur durchgeführt werden.

13.4 Koordinatentransformation und Bahngenerierung

Programmierte Bewegungsabläufe des Industrieroboters werden in der Robotersteuerung von einer speziellen Einheit verarbeitet, die entsprechend dem definierten Bewegungsverhalten und der gewünschten Interpolationsart die Gelenke aus der aktuellen Istposition in die gewünschte Zielstellung bewegt.

Liegen die benötigten Daten einer Zielstellung in achsspezifischen Koordinaten des Roboters vor, also als Drehwinkel bei rotatorischen Achsen, so kann die erforderliche Wegdifferenz jeder Achse direkt als Differenz zwischen Ziel- und Iststellung berechnet werden. Die jeweils aktuelle Position des TCP kann während der Bewegungsausführung durch Anwendung der Vorwärtstransformation über alle IR-Achspositionen berechnet werden, ◘ Bild 13.31. Die Vorwärtstransformation entspricht dabei einer Addition der Achsabstandsvektoren, ausgehend vom Sockel des Roboters bis hin zum TCP.

Wird der Zielpunkt einer Roboterbewegung demgegenüber durch kartesische Positions- und Orientierungsvorgaben bestimmt, ◘ Bild 13.31, so müssen die Achsstellungen des Roboters mit den Algorithmen der Rückwärtstransformation entsprechend seiner Kinematik berechnet werden [BLUM81]. Hier ergeben sich mathematisch teilweise mehrdeutige Lösungen (vgl. Abschnitt „Mehrdeutigkeit der Rückwärtstransformationsalgorithmen“).

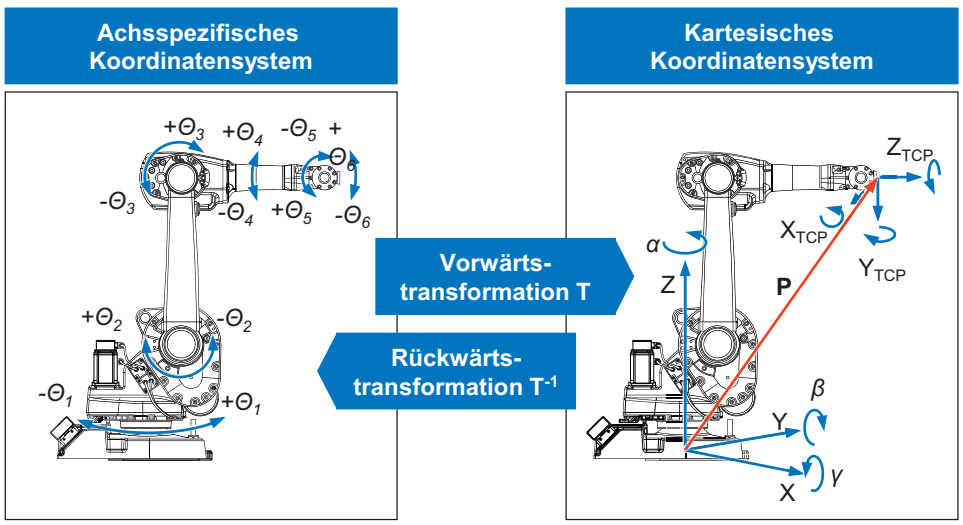
Beschreibung der Kinematik eines Handhabungsgerätes

Industrieroboter lassen sich als kinematische Kette von starren Achsen beschreiben, deren Gelenke zwischen den Armgliedern jeweils nur einen Freiheitsgrad besitzen [PAUL81; SNYD90]. Legt man in jedes Glied dieser Kette ein eigenes Koordinatensystem, so ist die Transformation zwischen den benachbarten Gelenkkoordinatensystemen nur eine Funktion des Drehwinkels bzw. des linearen Vorschubs.

Zur Bestimmung der einzelnen Gelenkpositionen des Roboters ist eine Umrechnung von kartesischen Weltkoordinaten in roboterspezifische Gelenkkoordinaten erforderlich.

Berechnung der Achsstellungen für dreiachsige Roboterarmkinematiken

Sehr einfach lassen sich die mathematischen Zusammenhänge der Achskoordinaten beschreiben, wenn das Handhabungsgerät nur eine dreiachsige kinematische Struktur besitzt und die Bewegungsrichtungen der einzelnen Achsen sich jeweils einer einzelnen Basiskoordinate zuordnen lassen.



◘ **Bild 13.31** Transformation kartesischer Positionsdaten in Achsinformationen

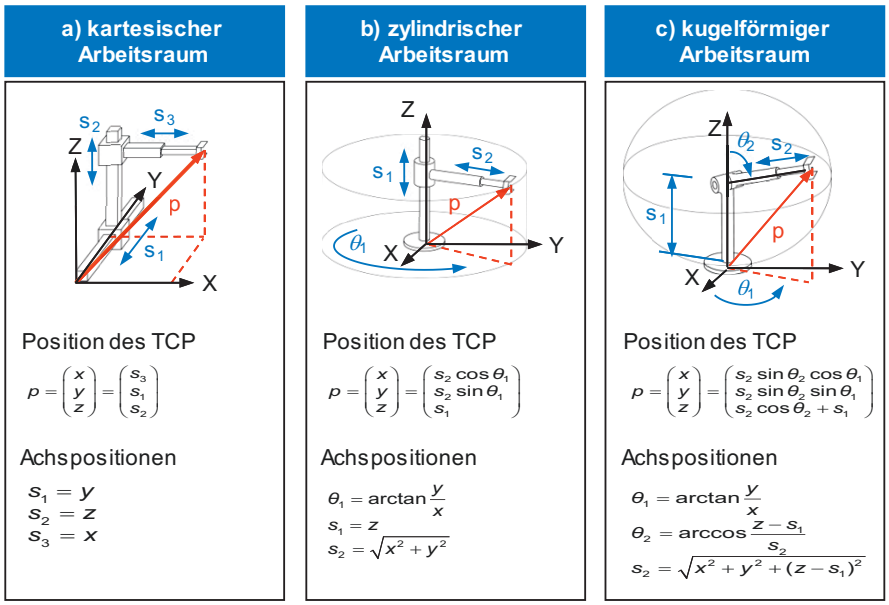


Bild 13.32 Bestimmung der Achspositionen für dreiachsige Industrieroboter

Für dreiachsige Roboterachsstrukturen mit kartesischem Arbeitsraum ergeben sich die Achspositionen direkt aus den Komponenten der TCP-Vektorkomponenten in kartesischen Koordinaten, Bild 13.32 a.

Ähnliches gilt für dreiachsige Roboter mit zylindrischem bzw. kugelförmigem Arbeitsraum bei der Anwendung von Zylinder- bzw. Kugelkoordinaten zur Beschreibung der Tool-Center-Point-Position, Bild 13.32 b/c.

Durchführung der Rückwärtsrechnung für vierachsige Schwenkarmroboter (SCARA)

Ausgangspunkt zur Bestimmung der Achsstellungen des vierachsigen SCARA-Industrieroboters ist die kartesische Positions- und Orientierungsvorgabe im Raum:

$$P = f(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$

Dieser in Bild 13.33 dargestellte Industrierobotertyp, der häufig für Montageoperationen verwendet wird, besitzt eine einfache kinematische Struktur. Der Aufbau ermöglicht die getrennte Berechnung der Achsstellungen für die Achsen 1 und 2, für Achse 3 sowie für Achse 4. Die Position der Achse 3 (z-Achse) lässt sich direkt aus der z-Koordinate des kartesisch vorgegebenen Zielpunktes bestimmen, da sie – als einzige direkt in z-Richtung wirksame Achse – nicht transformiert werden muss. Achse 4 bestimmt die rotatorische Orientierung des TCP und wird in Abhängigkeit von den Achsstellungen 1 und 2, die die translatorische TCP-Lage in der XY-Ebene festlegen,

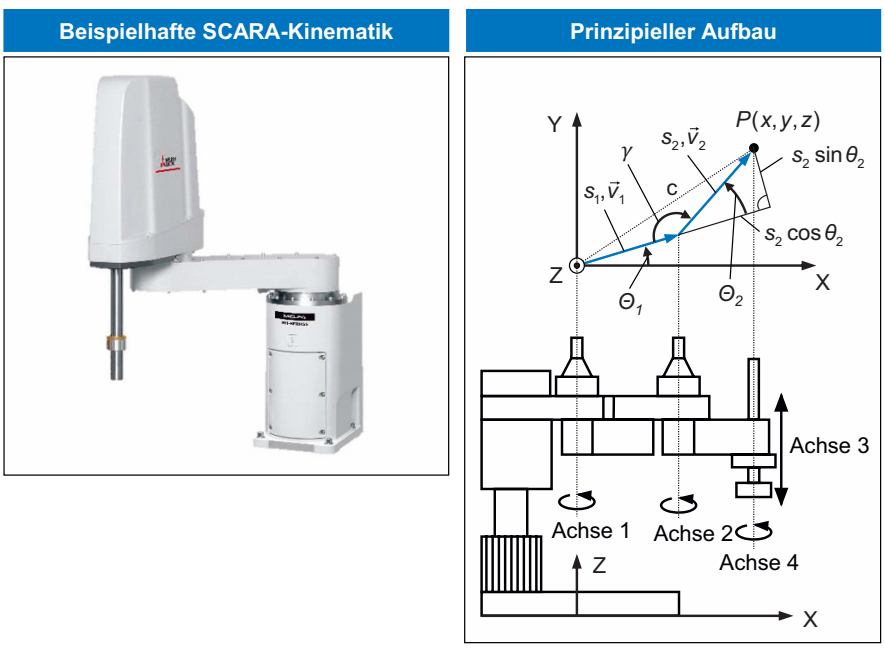


Bild 13.33 Kinematik eines SCARA-Roboters. Nach Mitsubishi Electric

berechnet. Somit lässt sich die Positionsbestimmung (Vorwärtstransformation) für die Achsen l und 2 auf ein ebenes Problem reduzieren (Bild 13.33):

$$\vec{p} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \tag{13.1}$$

$$\vec{v}_1 = s_1 \begin{pmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{pmatrix} \tag{13.2}$$

$$\vec{v}_2 = s_2 \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \tag{13.3}$$

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \cos\theta_1 + s_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ s_1 \sin\theta_1 + s_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \tag{13.4}$$

Für die Rückwärtstransformation dient der Kosinussatz. Mit ihm lassen sich die Positionswinkel von Achse l und 2 wie folgt bestimmen:

$$c^2 = x^2 + y^2 = s_1^2 + s_2^2 - 2s_1 s_2 \cos\gamma \tag{13.5}$$

mit:

$$\cos\gamma = \cos(180° - \theta_2) = -\cos\theta_2 \tag{13.6}$$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - s_1^2 - s_2^2}{2s_1 s_2}\right) \tag{13.7}$$

und

$$\theta_1 = \arctan\frac{y}{x} - \arctan\left(\frac{s_2 \sin\theta_2}{s_1 + s_2 \cos\theta_2}\right) \tag{13.8}$$

mit:

s_1, s_2 als charakteristische Kenndaten der kinematischen Kette

Berechnung der Achspositionsdaten für sechsachsige Industrieroboter

Industrieroboter mit sechs voneinander unabhängigen Gelenkachsen ermöglichen im Rahmen der mechanischen Achsgrenzen ein beliebiges Positionieren und Orientieren des Werkzeugs im Arbeitsraum.

Am Beispiel des sechsachsigen Gelenkarmroboters soll die Vorgehensweise der Rückwärtstransformation, d. h. der Berechnung der Achspositionsdaten aus den kartesischen Zielpunktdaten, gezeigt werden, Bild 13.34.

Teilt man die sechs Achsen dieses Robotertyps in Grund- und Handachsen ein, so dienen die drei Grundachsen überwiegend zur Positionierung und die drei Handachsen überwiegend zur Orientierungseinstellung. Eine klare Trennung zwischen Positionier- und Orientierungsachsen ist jedoch nicht möglich, da mit jeder Positionierung der Grundachsen auch eine Orientierungsänderung erfolgt bzw. jede Orientierungseinstellung an den Handachsen zwangsläufig zu einer Positionsänderung des TCP führt.

Da für diesen Robotertyp weder eine klare Trennung zwischen Positionier- und Orientierungsachsen noch eine einfache analytische Beschreibung der räumlichen Achsanordnung (wie für den vierachsigen SCARA-Roboter) möglich ist, soll die Rückwärtsrechnung mit Hilfe von Transformationsmatrizen gelöst werden.

Beschreibung des Zielpunktes eines Handhabungsgerätes

Die kartesische Zielpunktbeschreibung erfolgt durch die Angabe eines 3D-Positionsvektors $\vec{P}$ im Bezugskoordinatensystem und durch Angabe der Orientierung, Bild 13.35.

Die Orientierung wird durch ein Orientierungskoordinatensystem, das durch die drei Einheitsvektoren $\vec{i}$, $\vec{j}$ und $\vec{P}$ aufgespannt wird, veranschaulicht. Für die Beschreibung der Orientierung dieses Koordinatensystems – und damit des

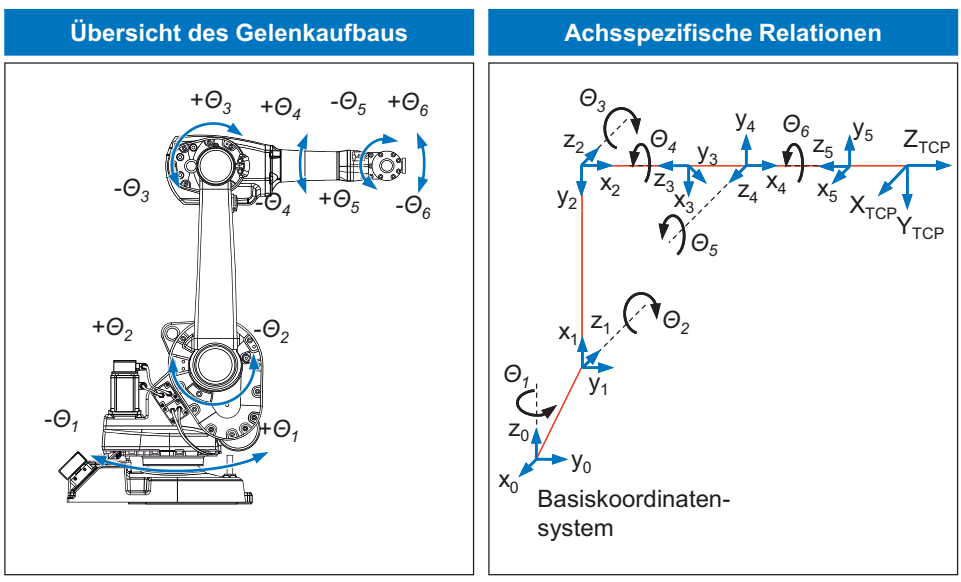


Bild 13.34 Kinematik eines sechsachsigen Knickarmroboters

Zielpunktes – gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten. Unter anderem kann sie durch Angabe von drei Winkeln um die Koordinatenachsen eindeutig beschrieben werden. So ist z. B. die Beschreibung der Orientierung mit den drei Rotationswinkeln α, β, γ um die z-, y'– und x''-Koordinate möglich (Nautische Winkel) [OSTE92].

Bild 13.35 zeigt diese Form der Zielpunktbeschreibung in vier Schritten:

1. Verschiebung um den Positionsvektor $\vec{P}$,
2. Drehung mit Winkel α um die z-Achse des noch nicht gedrehten Orientierungskoordinatensystems,
3. Drehung mit Winkel β um die y'-Achse des (um α) gedrehten Orientierungskoordinatensystems,
4. Drehung mit Winkel γ um die x''-Achse des zweimal gedrehten Orientierungskoordinatensystems.

Mathematisch kann dieser Zusammenhang mit Hilfe der Transformationsmatrix T beschrieben werden. Sie setzt sich aus dem Matrixprodukt einer Positionsmatrix P mit dem Positionsvektor $\vec{i}$ und einer Orientierungsmatrix R mit den Einheitsvektoren der Orientierung $\vec{i}$ (in x), $\vec{j}$ (in y) und $\vec{k}$ (in z) zusammen.

Für die Orientierungsbeschreibung in Nautischen Winkeln lässt sich die Matrix T aus vier Einzelmatrizen entwickeln, die jeweils die Verdrehung um eine Achskoordinate bzw. die translatorische Verschiebung beschreiben. Dabei steht die Teilmatrix (13.9) für die zuerst durchzuführende Drehung rechts:

$$T = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Verschiebung um } p} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Drehung um } k} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Drehung um } j} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Drehung um } i} \tag{13.9}$$

Die vereinfachte Schreibweise für diese Matrizenmultiplikation lautet:

$$T = \text{Trans}\,(p_x p_y p_z) \cdot \text{Rot}_z(\alpha) \cdot \text{Rot}_y(\beta) \cdot \text{Rot}_x(\gamma) \tag{13.10}$$

$\text{Rot}_x(\gamma)$ repräsentiert dabei eine Drehung um die x-Achse mit dem Winkel γ. Da Matrizenmultiplikationen nicht kommutativ sind, ist die Reihenfolge der Verdrehwinkel zur Beschreibung der Orientierung einzuhalten. Ausmultiplizieren der obigen Gleichung ergibt die Matrix (13.11):

$$T = \begin{pmatrix} \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha\cos\gamma+\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\sin\gamma+\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma & p_x \\ \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\gamma+\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & -\cos\alpha\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & p_y \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13.11}$$

Die allgemeine Beschreibung einer homogenen Transformation, in der $\vec{i}$, $\vec{j}$ und $\vec{k}$ die Vektoren der Koordinatenachsen $\vec{P}$ den Positionsvektor des Zielkoordinatensystems darstellen, lautet:

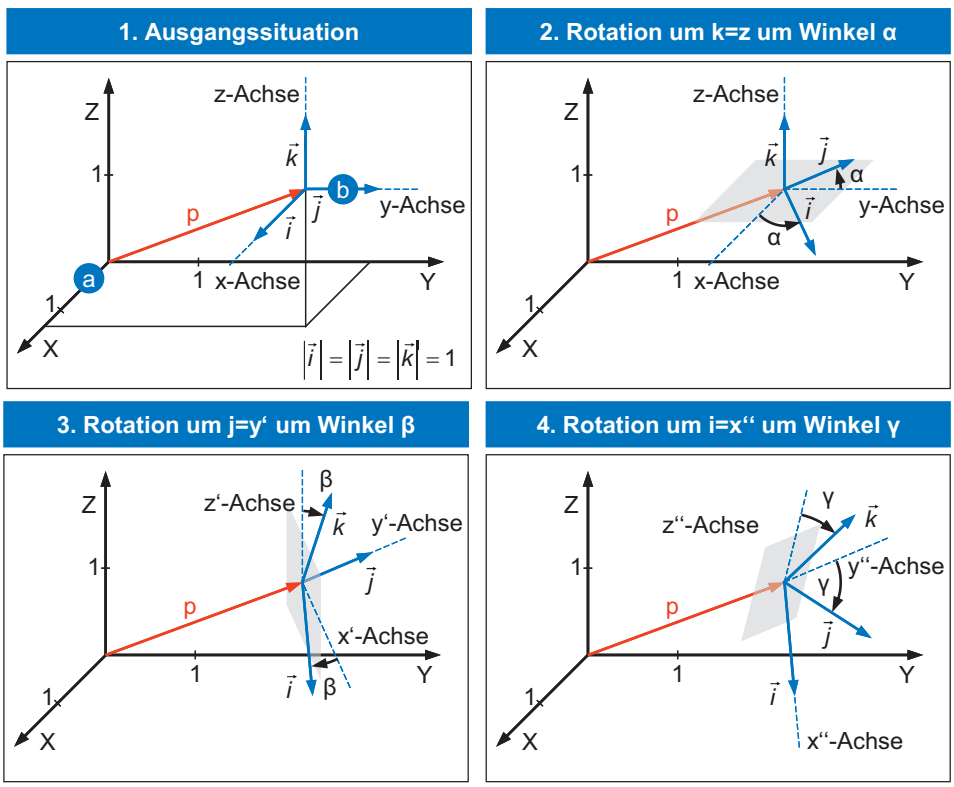


Bild 13.35 Beschreibung des Zielpunktes eines sechsachsigen Knickarmroboters

a Bezugskoordinatensystem b Orientierungskoordinatensystem

$$T = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x & p_x \\ i_y & j_y & k_y & p_y \\ i_z & j_z & k_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13.12}$$

mit den Vektoren

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \quad \vec{i} = \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{pmatrix} \quad \vec{j} = \begin{pmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{pmatrix} \quad \vec{k} = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix} \tag{13.13}$$

Durch Koeffizientenvergleich erhält man die Vektoren $\vec{i}$, $\vec{j}$ und $\vec{k}$ in Abhängigkeit von den Winkeln α, β und γ. Für einen sechsachsigen Knickarmroboter entspricht die Matrix T bei kartesischer Zielpunktbeschreibung dem TCP für die Berechnung der Rückwärtstransformation mit Matrizen (vgl. weiter unten).

Beschreibung der Kinematik eines Knickarmroboters mit Matrizen

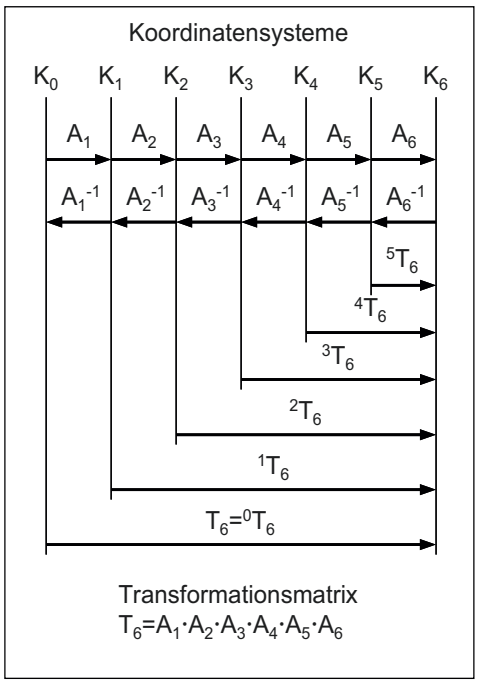
In der kinematischen Kette des Industrieroboters wird jede Achsbewegung als eine Bewegung zwischen zwei Armgliedern beschrieben. Legt man in jedes Glied dieser Kette ein eigenes Koordinatensystem, das bezugsfest zum jeweiligen Glied ist, so ist die Transformationsmatrix A_n zwischen den benachbarten Gelenkkoordinatensystemen K_n und K_{n-1} abhängig von der Gelenkstellung und der Achsbewegung.

Da das Gelenk zwischen den Armgliedern nur einen Freiheitsgrad besitzt, ist die Transformation nur eine Funktion entweder eines Drehwinkels oder eines linearen Weges. Anschaulich lässt sich diese Transformation für einen sechsachsigen Roboter an einem Transformationsgraphen, Bild 13.36 a, verdeutlichen.

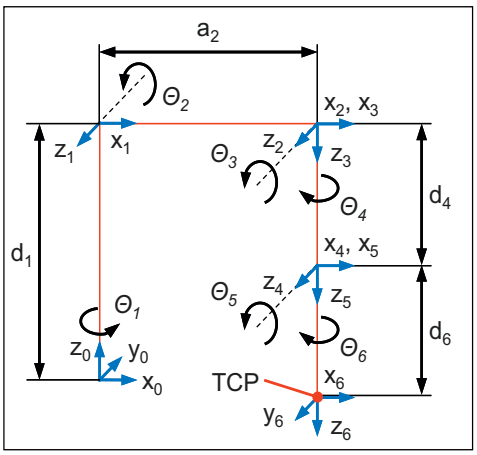
Für einen sechsachsigen Roboter lassen sich somit sechs Transformationsmatrizen A_n für die Beschreibung der Vorwärtsrechnung und sechs Transformationsmatrizen A_n^{-1} zur Beschreibung der Rückwärtsrechnung festlegen. Daraus ergibt sich für die kinematische Kette des Industrieroboters

Bild 13.36 Rückwärtstransformation für sechsachsige Knickarmroboter

a) Transformationsgraph für sechsachsige Roboter



b) Lage der Gelenkkoordinatensysteme in mathematischer 0-Stellung



c) Gelenkparameter nach Denavit-Hartenberg

Gelenk	Variable	Θ	d	a	α
1	Θ_1	Θ_1	d_1	0	π/2
2	Θ_2	Θ_2	0	a_2	0
3	Θ_3	Θ_3	0	0	π/2
4	Θ_4	Θ_4	d_4	0	-π/2
5	Θ_5	Θ_5	0	0	π/2
6	Θ_6	Θ_6	d_6	0	0

vom Fußpunkt bis zum TCP die Transformationsgleichung T_6 als Multiplikation der Einzeltransformationsgleichungen jeder Achse:

$$T_6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6. \tag{13.14}$$

Diese Transformationsgleichung muss im Ergebnis mit der Matrix der kartesischen Positions- und Orientierungsbeschreibung des TCP übereinstimmen, Gleichung (13.15):

$$T_6 = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x & p_x \\ i_y & j_y & k_y & p_y \\ i_z & j_z & k_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\substack{\text{Positionsmatrix} \\ \text{mit Positionsvektor}}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x & 0 \\ i_y & j_y & k_y & 0 \\ i_z & j_z & k_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\substack{\text{Orientierungsmatrix} \\ R \text{ des TCPs}}} \tag{13.15}$$

Weil die letzte Zeile der Matrizen keine auswertbaren Informationen liefert, erhält man zwölf Einzelgleichungen. Diese sind abhängig von den bekannten Elementen der Matrix T_6 und den unbekannten Gelenkvariablen. Sie lassen sich durch Auflösen der Gleichungen nach den Gelenkvariablen berechnen.

Denavit-Hartenberg-Verfahren zur Definition der Transformation

Eine Methode, um die mathematische Transformationsverkettung standardisiert zu beschreiben, ist das Denavit-Hartenberg-Verfahren. Hierbei sind je Glied bzw. Achse verschiedene Parameter festzulegen, anhand derer die Elemente der zugehörigen Transformationsmatrizen berechnet werden können [PAUL81].

Allgemein sind zur Aufstellung einer Transformationsmatrix sechs unbekannte Größen (drei Winkel und drei Koordinaten eines Verschiebevektors) festzulegen. Mit Hilfe des Denavit-Hartenberg-Verfahrens wird eine Reduktion auf vier Unbekannte erreicht, die sich aus zwei Drehungen (Winkel θ_n und α_n) und zwei Verschiebungen (d_n und a_n) zusammensetzen [DENA95; HART56].

Für die benötigten Transformationsgleichungen A_n sind Konventionen bezüglich der Parameter θ_n, d_n, a_n und α_n gemäß ◘ Tab. 13.1 bzw. ◘ Bild 13.37 zu beachten. Die allgemeine Beschreibung enthält jedoch noch keine Einschränkungen für Dreh- oder Schubgelenke. Für Drehgelenke stellt der Parameter θ_n die veränderliche Größe dar, für Schubgelenke – z. B. bei Portalrobotern – ist der Parameter d_n die Variable. Mit diesen Parametern werden die Transformationsgleichungen A_i zur Beschreibung der Gelenkstellung der Achsen des Industrieroboters aus folgenden Einzelmatrizen mit Hilfe der Matrizenmultiplikation gebildet und als Denavit-Hartenberg-Matrizen (DH-Matrizen) bezeichnet, Gleichungen (13.16) bis (13.18).

$$A_n = \mathrm{Rot}_z(\theta_n) \cdot \mathrm{Trans}\,(0,0,d_n) \cdot \mathrm{Rot}_x(\alpha_n) \tag{13.16}$$

$$A_n = \begin{pmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n & 0 & 0 \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_n \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_n & -\sin\alpha_n & 0 \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13.17}$$

$$A_n = \begin{pmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13.18}$$

In der mathematisch günstigen Nullstellung (◘ Bild 13.36 b) sind die DH-Gelenkparameter θ_n, d_n, a_n und α_n für alle Achsen des Roboters bestimmt worden (◘ Bild 13.36 c). Nach dem Einsetzen der Gelenkparameter in die allgemeine Transformationsmatrix A_n erhält man die Matrix A_i, die das Koordinatensystem K_{i-1} in das System K_i transformiert. Zur vereinfachten Schreibweise werden in den Transformationsmatrizen folgende Abkürzungen benutzt:

$$\begin{aligned} \sin\theta_i &= S_i \\ \cos\theta_i &= C_i \end{aligned} \tag{13.19}$$

Parameter	Bedeutung
Θ_n	Winkel zwischen der positiven x_{n-1}-Achse und der um die z_{n-1}-Achse im mathematisch positiven Sinn gedrehten positiven x_n-Achse: Bei rotatorischen Achsen entspricht dieser Winkel immer dem variablen Drehwinkel, wenn in der mathematischen Nullstellung alle x_n in die gleiche Richtung zeigen und alle z_n die Drehachsen darstellen.
d_n	Abstand des Ursprungs O_n des Koordinatensystems K_n vom Ursprung O_{n-1} des Koordinatensystems K_{n-1} in Richtung der Z_{n-1}-Achse
a_n	Normalenabstand zwischen z_{n-1} und z_n-Achse
α_n	Winkel zwischen der positiven z_{n-1}-Achse und der um die x_n-Achse im mathematisch positiven Sinn gedrehten positiven z_n-Achse

◘ Tab. 13.1 Bedeutung der Denavit-Hartenberg-Parameter

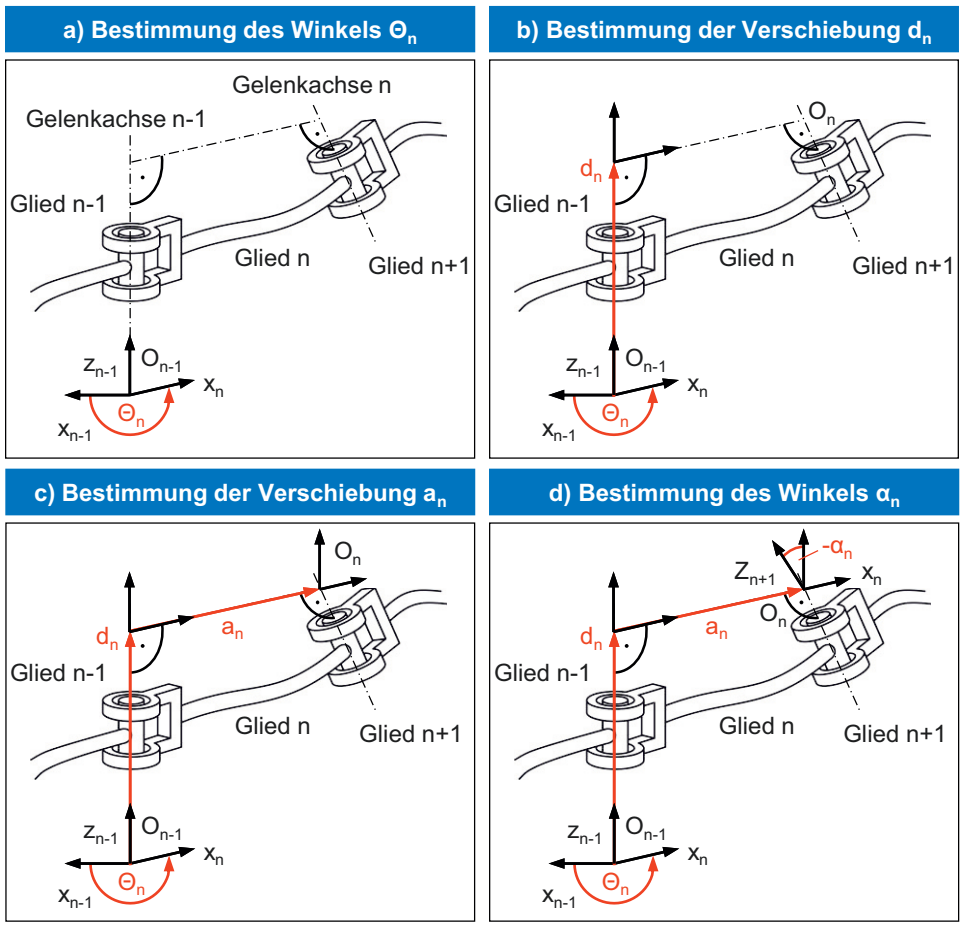


Bild 13.37 Denavit-Hartenberg-Parametrierung von Gelenken

$$A_1 = \begin{pmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_1^{-1} = \begin{pmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_2^{-1} = \begin{pmatrix} C_2 & S_2 & 0 & -a_2 \\ -S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_3^{-1} = \begin{pmatrix} C_3 & S_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S_3 & -C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13.20}$$

$$A_4 = \begin{pmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_4^{-1} = \begin{pmatrix} C_4 & S_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_4 \\ -S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_5 = \begin{pmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_5^{-1} = \begin{pmatrix} C_5 & S_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S_5 & -C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_6 = \begin{pmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad A_6^{-1} = \begin{pmatrix} C_6 & S_6 & 0 & 0 \\ -S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Bei der Bestimmung der inversen Transformationsmatrix wird berücksichtigt, dass die Drehmatrix R ein orthonormales System darstellt.

$$R = \begin{pmatrix} i_x & j_x & k_x \\ i_y & j_y & k_y \\ i_z & j_z & k_z \end{pmatrix} \quad \vec{P} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \tag{13.21}$$

Für orthonormale Matrizen R gilt $R^{-1} = R^T$. Unter Verwendung dieser Beziehungen bestimmt sich die inverse Matrix A_i^{-1} zu [BRON84; PAUL81]:

$$A_i^{-1} = \begin{pmatrix} i_x & i_y & i_z & -\left(\vec{i}\cdot\vec{p}\right) \\ j_x & j_y & j_z & -\left(\vec{j}\cdot\vec{p}\right) \\ k_x & k_y & k_z & -\left(\vec{k}\cdot\vec{p}\right) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{13.22}$$

Bestimmung der Achswinkel

Zur Ermittlung der Gelenkvariablen θ_i (i=1, …, 6) werden die Matrizengleichungen aufgestellt, die das Roboterhand-Koordinatensystem in die Gelenkkoordinatensysteme transformieren.

$$ {}^{i-1}T_6 = A^{-1}{}_{i-1} \cdot A^{-1}{}_{i-2} \cdot \ldots \cdot A_1^{-1} \cdot T_6 = A_i \cdot A_{i+1} \cdot \ldots \cdot A_6 \tag{13.23} $$

Mit der Matrizengleichung $T_6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6$ beginnend, werden zunächst diejenigen Elemente der Matrizengleichung betrachtet, die entweder null oder Funktion nur einer Gelenkvariablen sind. Falls durch den Koeffizientenvergleich keine der Gelenkvariablen bestimmt werden kann, wird die nächste Matrizengleichung (zunächst ${}^1T_6$, dann ${}^2T_6$, ${}^3T_6$, …) berechnet. Auch hier wird versucht, eine oder mehrere Variablen durch Koeffizientenvergleich zu ermitteln. Die fortlaufende Multiplikation mit den inversen Matrizen und anschließendem Koeffizientenvergleich wird so lange durchgeführt, bis alle Gelenkvariablen bestimmt sind.

Dieses Verfahren führt in der beschriebenen einfachen Form nicht für alle Roboterkinematiken zu einer analytisch geschlossenen Lösung. Unter Umständen ist es erforderlich, Teile der Lösung mit iterativen Verfahren zu ermitteln oder Zwischenpunkte zu berechnen bzw. Koordinatensysteme zu verschieben [MCKE98; RIES92].

Auch die in ◘ Bild 13.34 und ◘ Bild 13.36 gezeigte Kinematik lässt sich nicht ohne Weiteres lösen. Man kommt jedoch zu einem Ergebnis, wenn man die Länge $d_6 = 0$ annimmt. Voraussetzung für dieses Vorgehen ist, dass das Zielkoordinatensystem des Roboters vor der Rückwärtstransformation in den Schnittpunkt der Achsen 4, 5 und 6 verschoben wird. Dies kann mit Hilfe des k-Vektors des Zielkoordinatensystems geschehen. Da der Vektor $\vec{k}$ parallel zur sechsten Achse des Roboters und damit auch zur Hand mit der Länge d_6 ist, kann der Ursprung (13.24) des originalen Koordinatensystems wie folgt in den Ursprung $\vec{P}$ des neuen Koordinatensystems umgerechnet werden, Gleichung (13.25).

$$ \vec{P} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \tag{13.24} $$

$$ \vec{P}' = \begin{pmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} - d_6 \cdot \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x - d_6 \cdot k_x \\ p_y - d_6 \cdot k_y \\ p_z - d_6 \cdot k_z \end{pmatrix} \tag{13.25} $$

Im Folgenden kann nach dieser Vereinfachung, also mit dem Vektor $\vec{P}'$ und mit $d_6 = 0$, gerechnet werden. Zunächst wird Gleichung (13.26) aufgestellt.

$$ T_6 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 \tag{13.26} $$

Da die Matrix keine einfachen Ausdrücke enthält, bestimmt man die nächste Matrizengleichung ${}^1T_6$, ◘ Bild 13.36 a. Diese Matrix geht aus der vorherigen durch Multiplikation mit der Inversen A_1^{-1} hervor:

$$ {}^1T_6 = A_1^{-1} \cdot T_6 \tag{13.27} $$

Die Matrix ${}^1T_6$ wird analog auf einfache Ausdrücke zur Bestimmung der noch unbekannten Variablen untersucht. Das Verfahren der nacheinander ausgeführten Multiplikation mit der Inversen A_n^{-1} wird so lange wiederholt, bis alle sechs Gelenkvariablen bekannt sind.

$$ {}^nT_6 = A_n^{-1} \cdot A_{n-1}^{-1} \cdot \ldots \cdot A_1^{-1} \cdot T_6 \tag{13.28} $$

Element(3,4) aus ${}^1T_6 = A_1{}^{-1} \cdot T_6$ liefert:

$$ 0 = S_1 p'_x - C_1 p'_y \tag{13.29} $$

Weil die Auflösung nach dem Quotienten S_1/C_1 nicht eindeutig ist, erhält man zwei Gleichungen (13.30).

$$ \frac{S_1}{C_1} = \frac{p'_y}{p'_x} = \frac{-p'_y}{-p'_x} \tag{13.30} $$

Wird der Winkel θ_i mit Hilfe der atan2-Funktion bestimmt, muss zwischen zwei Lösungen unterschieden werden, Gleichung (13.31) und Gleichung (13.32).

$$ \Rightarrow \quad \theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{p'_y}{p'_x} \right) \tag{13.31} $$

$$ \Rightarrow \quad \theta'_1 = \text{atan2}\left(\frac{-p'_y}{-p'_x} \right) = \theta_1 + \pi \tag{13.32} $$

Anmerkung:
In der Literatur wird eine Arcustangensfunktion, welche den Winkel aus dem Quotienten von Sinus- und Kosinusfunktion bei gleichzeitiger Vorzeichenbetrachtung bestimmt, als atan2 a/b -Funktion bezeichnet.

Derselben Matrizengleichung sind auch die nötigen Bestimmungsgleichungen für die Winkel θ_2 und θ_3 zu entnehmen, Gleichung (13.33) und Gleichung (13.34).
Element (1,4):

$$ C_1 p'_x + S_1 p'_y = \left(S_2 C_3 + C_2 S_3 \right) d_4 + C_2 a_2 = S_{23} d_4 + C_2 a_2 \tag{13.33} $$

Element (2,4):

$$ p'_z - d_1 = -\left(C_2 C_3 - S_2 S_3 \right) d_4 + S_2 a_2 = -C_{23} d_4 + S_2 a_2 \tag{13.34} $$

Werden die beiden Gleichungen quadriert und anschließend addiert, so erhält man mit den trigonometrischen Beziehungen aus (13.35) eine Gleichung für S_3, Gleichung (13.36).

$$ S_{23} = S_2 C_3 + C_2 S_3, \qquad C_{23} = C_2 C_3 - S_2 S_3 \tag{13.35} $$

$$ S_3 = \pm \frac{a_2{}^2 + d_4{}^2 - \left(C_1 p'_x + S_1 p'_y \right)^2 - \left(p'_z - d_1 \right)^2}{2 a_2 d_4} \tag{13.36} $$

C_3 wird mit Hilfe des trigonometrischen Satzes von Pythagoras bestimmt, Gleichung (13.37).

13

$$C_3 = \pm\left(1 - S_3{}^2\right)^{1/2} \tag{13.37}$$

Hierbei ist zwischen zwei möglichen Lösungen zu unterscheiden, Gleichung (13.38) und Gleichung (13.39).

$$\Rightarrow \qquad C_3 > 0: \quad \theta_3 = \text{atan2}\left(\frac{S_3}{\left(1 - S_3{}^2\right)^{1/2}}\right) \tag{13.38}$$

$$\Rightarrow \qquad C_3 < 0: \quad \theta_3' = \text{atan2}\left(\frac{S_3}{-\left(1 - S_3{}^2\right)^{1/2}}\right) = -\theta_3 + \pi \tag{13.39}$$

Bei Kenntnis von θ_3 können nun aus Element (l, 4) und (2, 4) S_2 und C_2 ermittelt werden, Gleichung (13.40) und Gleichung (13.41).
Element (1,4):

$$C_1 p_x' + S_1 p_y' = \left(S_2 C_3 + C_2 S_3\right) d_4 + C_2 a_2 = S_{23} d_4 + C_2 a_2 \tag{13.40}$$

Element (2,4):

$$p_z' - d_1 = -\left(C_2 C_3 - S_2 S_3\right) d_4 + S_2 a_2 = -C_{23} d_4 + S_2 a_2 \tag{13.41}$$

Löst man die zweite Gleichung nach C_2 auf und setzt sie in die erste Gleichung ein, erhält man eine Bestimmungsgleichung für S_2. Wird umgekehrt die zweite Gleichung nach S_2 aufgelöst, erhält man nach Einsetzen in die erste C_2. Daraus folgt Gleichung (13.42).

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\frac{S_2}{C_2}\right) = \text{atan2}\left(\frac{\left(C_1 p_x' + S_1 p_y'\right) d_4 C_3 + \left(p_z' - d_1\right)\left(d_4 S_3 + a_2\right)}{\left(C_1 p_x' + S_1 p_y'\right) d_4 S_3 - \left(p_z' - d_1\right) d_4 C_3}\right) \tag{13.42}$$

Zur Bestimmung von θ_4 wird die Matrizengleichung ${}^3T_6$ aufgestellt, Gleichung (13.43).

$${}^3T_6 = A_3^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot T_6 \tag{13.43}$$

Hier muss ebenfalls eine Fallunterscheidung in Abhängigkeit von S_5 mit den Gleichungen (13.46) und (13.47) durchgeführt werden
Element (1,3):

$$C_4 S_5 = C_1 C_{23} k_x + S_1 C_{23} k_y + S_{23} k_z \tag{13.44}$$

(13.44)

Element (2,3):

$$S_4 S_5 = S_1 k_x - C_1 k_y \tag{13.45}$$

$$\Rightarrow \quad S_5 > 0: \quad \theta_4 = \text{atan2}\left(\frac{S_4}{C_4}\right) \tag{13.46}$$

$$\Rightarrow \quad S_5 < 0: \quad \theta_4' = \theta_4 + \pi \tag{13.47}$$

Für $S_5 = 0$ wird das Argument in der atan2-Funktion zu einem unbestimmten Ausdruck und ist somit nicht lösbar. Am kinematischen Ersatzschaltbild erkennt man, dass für $S_5 = 0$ ($\theta_5 = 0$) die vierte und sechste Achse zusammenfallen. Das Gleichungssystem ist in diesem Fall überbestimmt. Um auch hier eine sinnvolle Lösung zu erhalten, soll z. B. die vierte Achse ihre alte Achsstellung beibehalten, die sie unmittelbar vor Erreichen dieses Bahnpunktes hatte.

Die Matrizengleichung (13.48) liefert die nötigen Gleichungen zur Bestimmung von θ_5 durch Formulierung der Gleichungen (13.49) und 13.50).

$${}^4T_6 = A_4^{-1} \cdot A_3^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot T_6 \tag{13.48}$$

Element (1,3):

$$S_5 = \left(C_1 C_{23} C_4 + S_1 S_4\right) k_x + \left(S_1 C_{23} C_4 - C_1 S_4\right) k_y + S_{23} C_4 k_z \tag{13.49}$$

Element (2,3):

$$-C_5 = -C_1 S_{23} k_x - S_1 S_{23} k_y + C_{23} k_z$$

$$\Rightarrow \quad \theta_5 = \text{atan2}\left(\frac{S_5}{C_5}\right) \tag{13.50}$$

Aus Gleichung (13.51) kann schließlich θ_6 berechnet werden, Gleichung (13.52) bis Gleichung (13.54).

$${}^5T_6 = A_5^{-1} \cdot A_4^{-1} \cdot A_3^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot A_1^{-1} \cdot T_6 \tag{13.51}$$

Element (2,1):

$$S_6 = \left(-C_1 C_{23} S_4 + S_1 C_4\right) i_x - \left(S_1 C_{23} S_4 - C_1 C_4\right) i_y - S_{23} S_4 i_z \tag{13.52}$$

Element (2,2):

$$C_6 = \left(-C_1 C_{23} S_4 + S_1 C_4\right) j_x - \left(S_1 C_{23} S_4 - C_1 C_4\right) j_y - S_{23} S_4 j_z \tag{13.53}$$

$$\Rightarrow \quad \theta_6 = \text{atan2}\left(\frac{S_6}{C_6}\right) \tag{13.54}$$

Mehrdeutigkeit der Rückwärtstransformationsalgorithmen

Wie in den vorigen Abschnitten gezeigt wurde, liefern die Algorithmen der Rückwärtstransformation je nach Robotertyp und Anzahl der Roboterachsen mehrere Lösungen für Achsstellungen einer bestimmten Zielposition und -orientierung. Für einen sechsachsigen Knickarmroboter ergeben sich folgende Mehrdeutigkeiten für die Achspositionen im Zielpunkt, ◘ Bild 13.38:

- Mehrdeutigkeit des Schwenkbereichs, bei der zu entscheiden ist, ob der Zielpunkt durch eine Überkopfbewegung oder eine Drehung der l. Achse erreicht wird,

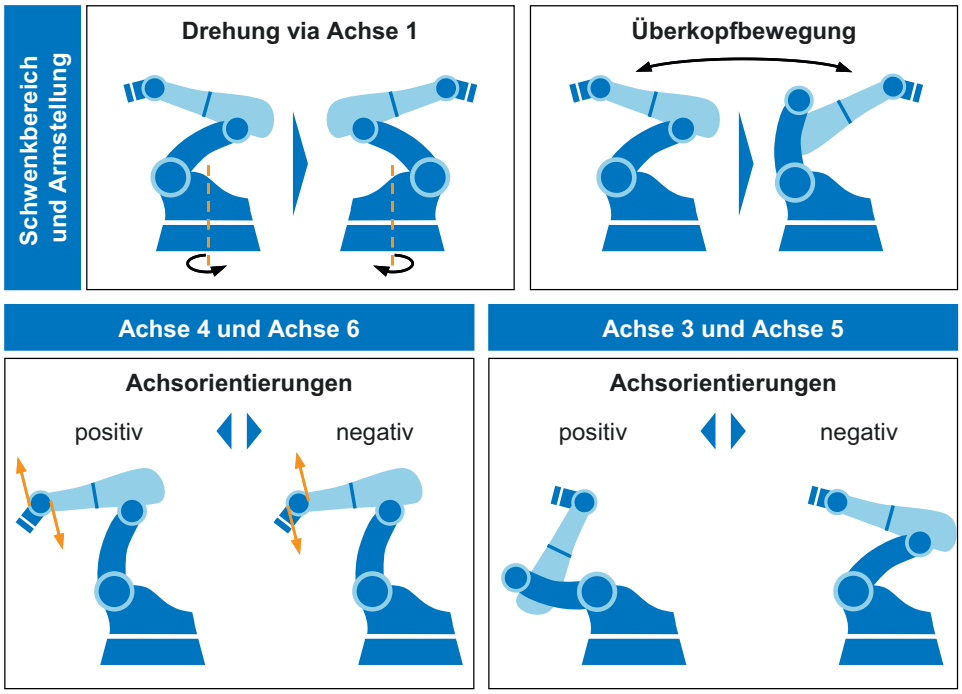


Bild 13.38 Mehrdeutigkeiten der Transformation bei sechsachsigen Knickarmrobotern

- Mehrdeutigkeit der Achsen 4 und 6 sowie
- Mehrdeutigkeit der Achsen 3 und 5.

Diese Mehrdeutigkeiten müssen von der Steuerungssoftware durch spezielle Auswahlkriterien geklärt werden. Mögliche Entscheidungskriterien sind:

- der mechanisch begrenzte Achsverfahrbereich,
- die Kontinuität der Bewegungsbahn,
- der kürzeste Weg zum Zielpunkt.

Darüber hinaus lassen sich Mehrdeutigkeiten durch Vorgaben im Anwenderprogramm ausschließen. Hierzu wird in den Bewegungsanweisungen die Definition von Zielpunktposition und Orientierung durch die Festlegung eines Winkelstatus ergänzt. Er beschreibt, in welcher Achsposition der Zielpunkt erreicht werden soll, falls Mehrdeutigkeiten in den Berechnungsalgorithmen auftreten.

Bewegungsarten

Bewegungsbefehle gehören zu den Basisanweisungen für Industrierobotersteuerungen. Es werden dabei folgende Bewegungsoperationen unterschieden:

- PTP (Point to Point):
  Bewegung des Industrieroboters von der Istposition zur Sollposition des Tool-Center-Point auf beliebiger Bahn im Raum, vgl. Bild 13.39 a. Nur Ausgangs- und Zielpunkt sind in einer PTP-Bewegung detailliert festgelegt. Die Roboterachsen erreichen ihre Zielstellungen unter Berücksichtigung der achsspezifischen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten. Üblich ist heute, dass die einzelnen Achsbewegungen synchron ausgeführt werden, sodass alle Roboterachsen ihre Zielpositionen gemeinsam erreichen. Dazu muss die Steuerung des Industrieroboters zunächst die Führungsachse bestimmen, die die längste Bewegungszeit benötigt. Die übrigen Achsen werden dann mit reduzierter Achsgeschwindigkeit bzw. Beschleunigung verfahren.
- Linear:
  Lineare Bewegung des Tool-Center-Points auf der Verbindungsstrecke zwischen Ist- und Sollposition mit vorgegebener Orientierung des Tool-Center-Point (TCP), Bild 13.39 b. Die Bewegung wird mit der definierten Bahngeschwindigkeit bzw. -beschleunigung ausgeführt, solange die hierzu erforderlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der einzelnen Roboterachsen nicht überschritten werden.
- Kreisinterpolation:
  Durch Definition von drei Punkten im Arbeitsraum des Industrieroboters können Kreisbewegungsbahnen des TCP definiert werden, Bild 13.39 c. Die drei Punkte legen die Kreisbahn eindeutig im Raum fest.

Die vorgestellten Bewegungsarten gehören zum Standardbefehlsumfang von Industrierobotersteuerungen. Zusätzliche Bewegungsarten, wie z. B. Parabel- oder Splinebahnen, können durch die Hersteller bereitgestellt und für spezielle Anwendungen genutzt werden.

Bei Verwendung der beschriebenen Bewegungsbefehle hält der Roboter nach jeder ausgeführten Bewegung an – unabhängig davon, ob ein weiterer Bewegungssatz folgt oder nicht. Sollen mehrere Bewegungen ohne Zwischenstopp ausgeführt werden, so muss das Überschleifverhalten festgelegt werden. Beim Überschleifen wird der programmierte End-

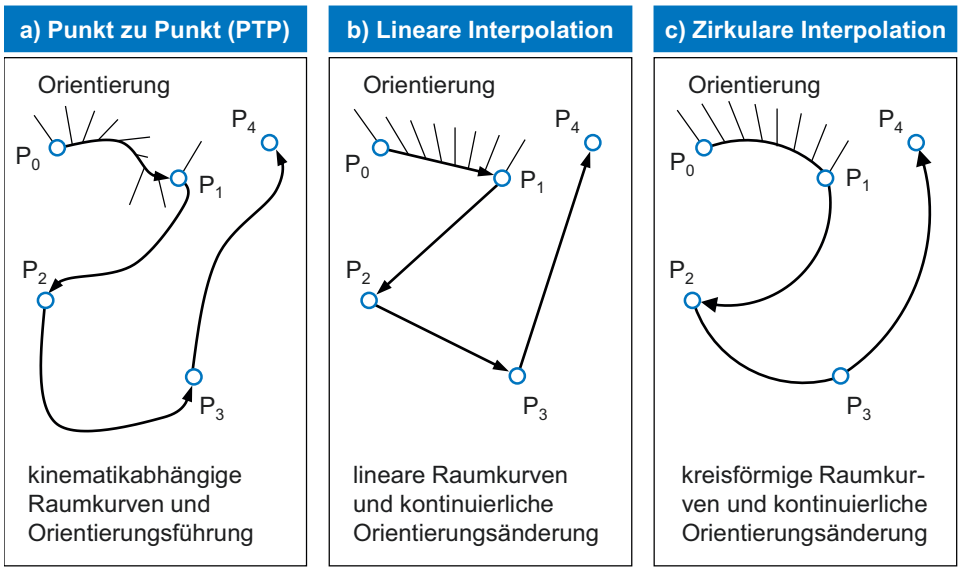


Bild 13.39 Bewegungsarten von Industrierobotern

punkt einer Bewegung nicht genau angefahren, sondern es wird vorzeitig die nächste Bewegung eingeleitet. Dazu muss der Anwender festlegen, nach welchen Kriterien die Steuerung das Überschleifen handhaben soll. Ein Kriterium kann bei Bahnbewegungen (linear oder zirkular) der tolerierte Abstand vom Zielpunkt sein. Damit wird bereits beim Unterschreiten der angegebenen Entfernung zum Zielpunkt der nächste Bewegungssatz eingeleitet. Als weiteres Kriterium kann häufig auch die Geschwindigkeit vorgegeben werden, bei deren Unterschreiten das Überschleifen beginnt.

Da bei PTP-Bewegungen keine Bahn vorgegeben und keine TCP-Geschwindigkeit berechnet wird, kann hier nur angegeben werden, wie viel Prozent vor dem Ende der Bewegung (bezogen auf den für die Bewegung erforderlichen Verfahrbereiche der einzelnen Achsen) das Überschleifen beginnen soll. Bild 13.40 zeigt das Überschleifen für eine zweidimensionale Bewegung

Im Allgemeinen berücksichtigt eine Robotersteuerung rund fünf Bewegungsbefehle, die nach der aktiv ausgeführten Bewegung folgen, um eine Bahnoptimierung durch Überschleifen durchzuführen. Bei Anwendungen mit vielen, eng beieinander liegenden Bahnpunkten, wie beispielsweise der Fräsbearbeitung komplexer Oberflächen, ist der Umfang des Vorlaufs jedoch oft nicht ausreichend, damit Technologieparameter, wie z. B. die Bahngeschwindigkeit, eingehalten werden können. Für diesen Einsatzfall bieten Steuerungshersteller spezielle Technologieoptionen, die die Anzahl der im Vorlauf ausgewerteten Bewegungsbefehle stark vergrößert.

13.5 Bedienung und Programmierung von Robotern

Die Roboterprogrammierung hat das Ziel, Steuerbefehle in Form von Programmen zu erzeugen, die eine gestellte Automatisierungsaufgabe umsetzen. Das Aufgabenspektrum reicht von einfachen Werkstückhandhabungsfunktionen bis hin zu komplexen, sensorgeführten Bearbeitungs- oder Montageaufgaben.

Es existieren verschiedene, teilweise rechnerunterstützte Programmierverfahren, deren Eignung je nach Anwendungsgebiet unterschiedlich ist. Die wichtigsten Verfahren

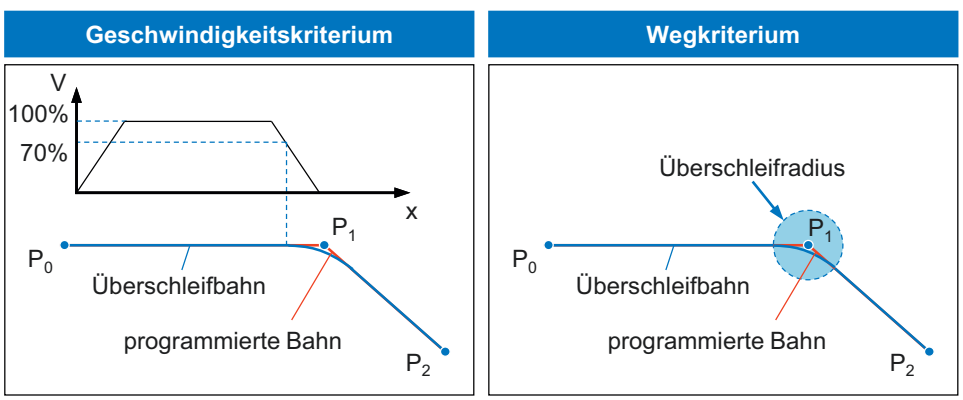


Bild 13.40 Überschleifen von Bewegungssätzen

sind in ◘ Bild 13.41 dargestellt und werden grundsätzlich nach dem Ort der Programmeingabe unterschieden:

- *Online-Verfahren* nutzen die direkte Interaktion zwischen Programmierer und Roboter bzw. seiner Steuerung (vgl. ► Kap. 1), um z. B. einzelne Bahnpunkte anzufahren und abzuspeichern (Teach-In) oder um eine vollständige Bewegungsbahn aufzuzeichnen (Playback). Ebenfalls zu den Online-Verfahren zählen werkstattorientierte Programmiersysteme, die den Benutzer – neben der reinen Bewegungsdefinition und manuellen Programmeingabe – durch Hilfswerkzeuge bei der Definition geschlossener Abläufe und Integration von Feldbussystemen zur Kommunikation unterstützen (vgl. ► Kap. .1).
- *Offline-Verfahren* sind unabhängig von der eigentlichen Produktionseinrichtung anwendbar (vgl. ► Kap. 13.5.2). Die Programmierung einer Aufgabe erfolgt indirekt mithilfe einer geeigneten Programmiersprache, grafisch (z. B. mithilfe von Ablaufdiagrammen) oder durch Simulation unterstützt, indem Bewegungsabläufe am Bildschirm generiert und anschließend simuliert werden. Daneben existieren weitere, aufgabenorientierte Verfahren, die keine exakte Definition der Programm- und Bewegungsabläufe mehr erfordern, sondern das Programm und die Bewegungen aus einer Reihe bekannter Anweisungen (z. B. „hole Bauteil aus Aufspannung“) zusammensetzen.
- *Hybride Verfahren* nutzen die Kombination von Online- und Offline-Verfahren. Die Logik der Handhabungsaufgabe wird dabei meist in der Arbeitsvorbereitung programmiert und anschließend vor Ort durch zusätzliche Festlegungen von Bewegungsabläufen ergänzt. Die Programmerstellung in der Arbeitsvorbereitung geschieht oft textuell bzw. unterstützt durch aufgabenorientierte Programmiersysteme. Der Benutzer nimmt Veränderungen am Programmcode jedoch selbstständig vor.

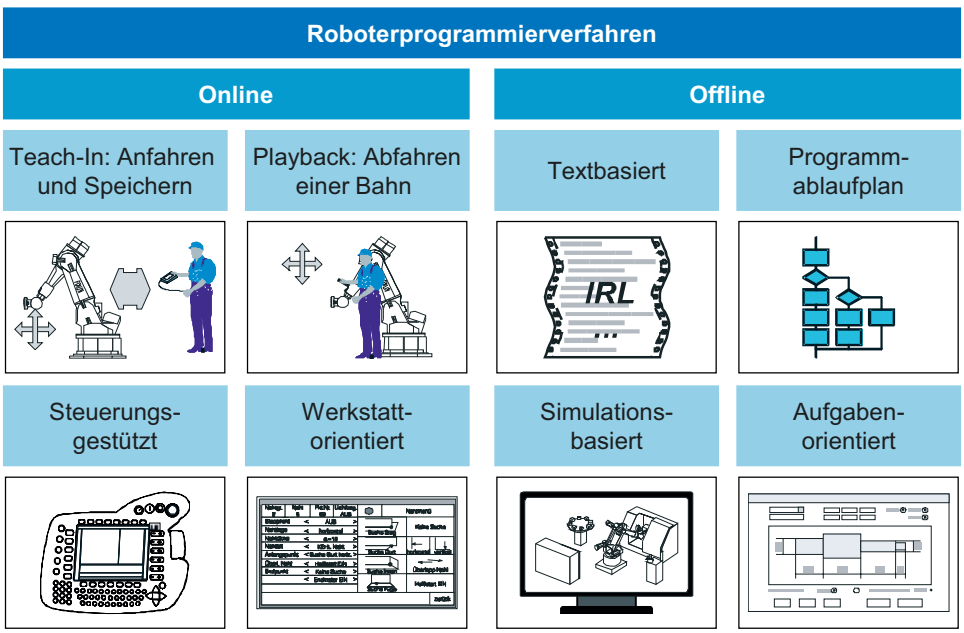
In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Methoden und Möglichkeiten der Online- und Offline-Programmierung vorgestellt.

13.5.1 Online-Programmierverfahren

Zurzeit werden die meisten Roboter prozessnah mit Hilfe sogenannter Lernverfahren programmiert. Dabei führt der Programmierer den Roboter oder eine vergleichbare Konstruktion zur Koordinatenerfassung, während die Robotersteuerung die für die spätere Wiederholung der Bewegung erforderlichen geometrischen Daten speichert. Durch den direkten Bezug zum Prozess ist dieses Verfahren wesentlich anschaulicher als die Offline-Programmierung.

Ein Programmierer am Bildschirmarbeitsplatz ist selten in der Lage, die Roboterbewegungen numerisch zu beschreiben, da die Komplexität der Bewegungsabläufe das räumliche Vorstellungsvermögen überfordert. Simulationssysteme, die den Roboter und seinen Arbeitsraum grafisch darstellen, sind bei entsprechender Leistungsfähigkeit in der Regel mit hohen Kosten verbunden. Auch bei zunehmendem Einsatz von Offline-Programmierverfahren insbesondere im Automobilsektor hat die Lernprogrammierung deshalb große Bedeutung für die Generierung von Bewegungsbefehlen. Unterschieden werden dabei zwei Varianten der Lernprogrammierung:

- Playback-Programmierung (Abfahren einer Bahn),
- Teach-In-Programmierung (Anfahren und Speichern von einzelnen Stützpunkten einer Bewegungsbahn).



◘ **Bild 13.41** Programmierverfahren für Industrieroboter

Bei der Playback-Programmierung wird der Roboter vom Bediener unmittelbar über Handgriffe, die in Werkzeugnähe angebracht sind, entlang der zu programmierenden Bahn geführt, ◘ Bild 13.42 links. Während dieser Phase speichert die Steuerung selbsttätig in einem festen Zeittakt (0,05 bis 0,5 s) alle für die Wiedergabe (Playback) der Bahn notwendigen Daten. Die Bewegung des Roboters von Hand ist allerdings nur bei leichten Konstruktionen (z. B. bei Lackierrobotern) nach Abschalten der Antriebe möglich. Deshalb wird oft auch ein in Leichtbauweise gefertigtes, kinematisches Modell des Roboters eingesetzt, das nur die Wegmesssysteme enthält und wesentlich leichter zu bedienen ist, ◘ Bild 13.42 rechts. Nachteile eines kinematischen Modells sind jedoch zum einen die zusätzlichen Kosten und zum anderen Probleme mit Toleranzen zwischen Modell und Roboter, die einen aufwendigen Abgleich beider Systeme erfordern. Aufgrund der Nachteile wird das Playback-Verfahren heute nur in Spezialanwendungen mit reduzierten Anforderungen hinsichtlich der Positioniergenauigkeit eingesetzt.

Bei der Teach-In-Programmierung führt der Programmierer den Roboter in markante, den Bewegungsablauf charakterisierende Stellungen. Dabei wird der Roboter nur selten unmittelbar von Hand, sondern meist mit Hilfe der Antriebe über ein Programmierhandgerät (PHG), ◘ Bild 13.43, bewegt. Durch Auslesen der (aktuellen) achsspezifischen Wegmesssysteme können die Positionen des Roboters erfasst und abgespeichert werden. Anschließend werden Parameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung und Genauigkeit der Bewegung) sowie Funktionen (Greifer öffnen/schließen, Werkzeugwechsel) programmiert. Während der Programmabarbeitung fährt der Roboter die abgespeicherten Stellungen unter Berücksichtigung der zugehörigen Parameter an und führt die programmierten Funktionen aus.

Bedienelemente zur Bewegungsführung von Robotern

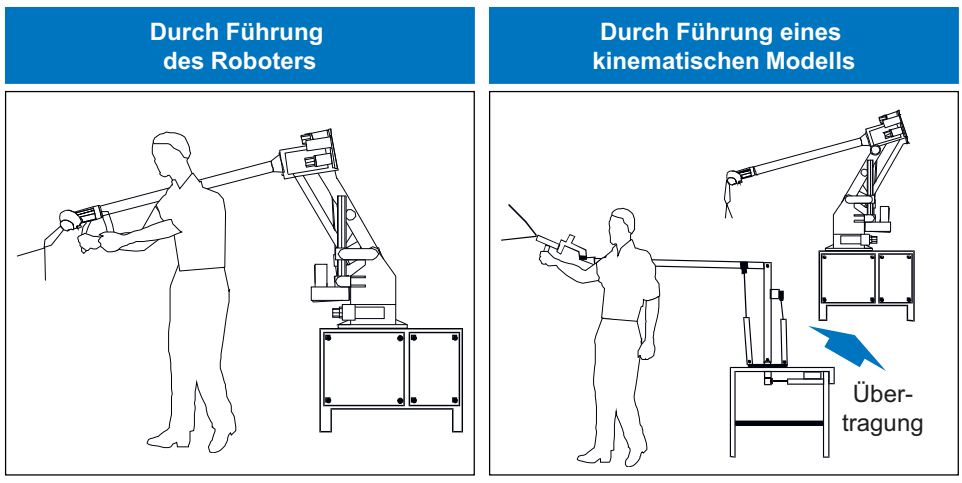
Das Bewegen des Roboters zum Zweck der Inbetriebnahme bzw. Bewegungsprogrammierung erfordert das manuelle Ansteuern der Roboterantriebe. Zur Kommandierung von Bewegung werden in der Regel Funktionstasten (Touch oder Softkey) am Bediengerät der Steuerung eingesetzt. Dabei können den Tasten durch Angabe des Bezugskoordinatensystems, ◘ Bild 13.28, verschiedene Bewegungsformen zugewiesen werden. Üblich sind hier Bewegungen entlang der Bezugsachsen des jeweils ausgewählten Koordinatensystems (sechs Freiheitsgrade) sowie alternativ Einzelbewegungen der verschiedenen Antriebe.

Neben Funktionstasten verfügen die meisten der heute verfügbaren Industrieroboter über zusätzliche Möglichkeiten zur vereinfachten Eingabe orientierungsbehafteter Positionsänderungen. Zu den verbreitetsten Eingabegeräten zählen hier 6D-Mäuse und Joystick ◘ Bild 13.43 a bzw. b, deren Stellung bzw. Verdrehung jeweils in eine Bewegung entlang eines Freiheitsgrades übersetzt wird.

So können mithilfe einer 6D-Maus alle Positionsveränderungen eines sechsachsigen Roboters ausgeführt werden. Joysticks verfügen in der Regel über drei Freiheitsgrade (zwei Stell- und eine Verdrehrichtung). Um auch hier eine vollwertige Eingabe zu realisieren, müssen den Stellbewegungen softwareseitig die gewünschten Bewegungsrichtungen bzw. Freiheitsgrade zugewiesen werden.

Zur Vereinfachung der Steuerungsbedienung erhalten – auch aufgrund der hohen Verbreitung von Touch-Technologien – zunehmend „App"-basierte Bedienkonzepte Einzug in die Gestaltung von Handbediengeräten, ◘ Bild 13.44. Apps gruppieren hier verschiedene Funktionen, die sich nach spezifischen Themenfeldern unterscheiden, wie z. B. Sicherheits- oder Kalibrierfunktionalitäten.

Neben den Standard-Verfahren zur Bewegungseingabe existieren weitere Konzepte im Forschungsumfeld, die beispielsweise Programmierzeiger nutzen, um Roboterbewegungen durch Positions- oder Richtungszeigen auszuführen [GÖBE12]. Daneben wurden Verfahren zur Evaluation von Prozesskräften untersucht, um Rückschlüsse auf die vom Roboter aufgebrachten Kräfte während der Bewegung (z. B. bei



◘ **Bild 13.42** Playback-Programmierung durch Abfahren einer Bahn. Nach AKR

a) Programmierhandgerät mit 6D-Maus nach KUKA



b) Programmierhandgerät mit Joystick nach ABB



Bild 13.43 Handbediengeräte für Industrieroboter. Nach KUKA, ABB

Montageprozessen) zuzulassen [BISC10]. Ein weiterer Ansatz zur Bewegungsvorgabe basiert auf optischer Messtechnik aus dem Umfeld der virtuellen Realität. Hierbei gibt der Programmierer die Bewegungen des Roboters durch seine eigenen Bewegungen vor, die z. B. zur Kollisionsvermeidung simultan auch auf ein virtuelles Anlagenmodell am Computer übertragen und evaluiert werden kann (vgl. ▶ Kap. 13.9). In Zusammenhang mit der stärkeren Verbreitung von direkten Mensch-Roboter-Interaktionsszenarien z. B. zur kooperativen Bauteilmontage können zukünftig auch handgestenbasierte Eingabeverfahren zur Auslösung von Roboteraktionen von Bedeutung sein.



Bild 13.44 Handbediengerät mit umgesetztem „App"-Bedienkonzept. Nach KUKA

Erstellung eines Roboterprogramms an der Steuerung

Bei der Online-Programmierung wird der auszuführende Programmcode mit dem Programmierhandgerät erstellt. Hierzu wird ein Anzeigeprogramm mit Editierfunktion genutzt, das den Bediener z. B. durch eine integrierte Syntaxkontrolle bei der Programmeingabe unterstützt. Die Eingabe erfolgt heute in der Regel über ein berührungsempfindliches Touch-Display, auf dem eine Tastatur und Funktionstasten in Form von Softkeys eingeblendet werden (vgl. ◘ Bild 13.45). Mit vordefinierten Unterstützungsfunktionen für die Eingabe von Standardoperationen können Bewegungs- und Logikbefehle vereinfacht eingefügt und verkettet werden.

Nach dem Einschalten der Steuerung am Steuerschrank und dem Anwählen des Testmodus (T1) als Betriebsart befindet sich die Steuerung im Handbetrieb. Die exakte Stellung der Robotermechanik ist der Robotersteuerung im Auslieferungszustand nicht bekannt, sodass der Roboter zunächst justiert werden muss (vgl. ▶ Kap. 13.3).

Zum Teachen eines Punktes wird der Roboter bei gehaltenem Zustimmtaster manuell positioniert. Anschließend kann die eingenommene Position ausgelesen und bezogen auf ein auszuwählendes Koordinatensystem in einer neuen Punktvariable gespeichert werden. Zur manuellen Bewegungsführung stehen dem Anwender verschiedene Modi zur Verfügung. Außerdem besteht die Möglichkeit, je nach aktivem Greifer- bzw. Bezugskoordinatensystem, manuelle Bewegungen innerhalb verschiedener Koordinatensysteme auszuführen:



Bild 13.45 HMI einer Robotersteuerung. Nach KUKA

1 Touchscreen
2 Softkeys
3 Hauptmenü-Taste
4 Tastatur einblenden
5 Programm-STOPP
6 Programm-START-Rückwärts
7 Programm-START-Vorwärts
8 Status: Logiksteuerung (Soft-SPS)
9 Status: Fahrbedingungen/Sicherheit
10 Status: Bewegungsprogramm
11 Anzeige Betriebsart
12 Geschwindigkeits-Override
13 Programmablaufarten
14 Auswahl Greifer/Basis

- Achsspezifisches Koordinatensystem: Die sechs Verfahrtasten bewirken in diesem Modus die Vorwärts- und Rückwärtsbewegung von maximal sechs Achsen.
- WORLD-Koordinatensystem: Drei Fahrtasten ermöglichen die Bewegung des TCP parallel zu einem kartesischen Koordinatensystem, das im Fuß des Roboters liegt. Die übrigen drei Tasten dienen zur Änderung der Orientierung (A, B, C), ohne den eingestellten Arbeitspunkt zu verändern.
- BASE-Koordinatensystem: Die Fahrtasten haben die gleiche Bedeutung wie unter 2., jedoch befindet sich der Ursprung des Koordinatensystems in einem benutzerdefinierten Punkt, in der Regel am Werkstück.
- TOOL-Koordinatensystem: Die Fahrtasten haben die gleiche Bedeutung wie unter 2., jedoch befindet sich der Ursprung des Koordinatensystems an der Spitze des Werkzeugs und wird entsprechend der Roboterbewegung mit verschoben.

Weiterhin ist es möglich, Koordinaten textuell über die Tastatur des Bediengerätes einzugeben. Die Koordinaten können dabei aus Zahlenwerten, Variablen und Konstanten bestehen und auch zur Programmlaufzeit berechnet werden. Eine parametrische Beschreibung von Bewegungsanweisungen bietet den Vorteil, dass eine einfache Anpassung an variable Prozessabläufe möglich ist. Werden z. B. Positioniervorgänge zur Aufnahme und zur Ablage von Werkstücken mit unterschiedlicher Höhe durchgeführt, so lässt sich der Arbeitspunkt in Abhängigkeit von der extern vorgegebenen Werkstückhöhe (Parameterübergabe durch Leitrechner) bestimmen.

Programmtest

Bei der Programmgenerierung erfolgt eine automatische Überprüfung der Befehlssyntax und es wird der Funktionsumfang des Bediengeräts – je nach Kenntnisstand des Nutzers – eingeschränkt. Zudem können numerische Eingaben auf Bereichsüberschreitungen der einzelnen Achsen oder des Arbeitsraumes hin untersucht werden. Trotz der bestehenden, Code-bezogenen Hilfsfunktionen ergeben sich vielfältige Fehlerquellen dadurch, dass der strukturelle Aufbau eines Programms unvollständig oder fehlerhaft sein kann.

So können z. B. arithmetische Operationen erst bei der Programmausführung zu nicht definierten Zuständen führen. Bewegungsanweisungen müssen daher zunächst im Handbetrieb mit verringerter Geschwindigkeit getestet werden, damit Kollisionen zwischen dem Roboter und seiner Umwelt erkannt und eliminiert werden können.

Zu den wichtigsten Testhilfen gehören:

- Externe Beeinflussung der Geschwindigkeit: Zusätzlich zu den programmierten Geschwindigkeiten (Achs- und Bahngeschwindigkeiten) lässt sich sowohl beim Programmtest als auch beim Automatikbetrieb die tatsächliche Ausführungsgeschwindigkeit über das Bediengerät einstellen.
- Einzelsatz: Der Einzelsatzbetrieb bewirkt, dass jeweils nur eine Programmanweisung ausgeführt wird. Anschließend nimmt die Steuerung den Stopp-Zustand ein und wartet auf ein erneutes Startsignal durch den Bediener.
- Einzelschritt: Die Programmbearbeitung wird so lange fortgesetzt, bis eine Bewegungsanweisung erreicht ist. Die Ausführung der jeweils folgenden Bewegung erfolgt nach erneuter Bestätigung durch den Bediener.
- Satzfolge: Das zu testende Programm wird kontinuierlich abgearbeitet, solange der Bediener den Ablauf bestätigt.
- Unterbrechungsmarken im Programm: Nach der Bestätigung des Programmablaufs wird das Programm bis zur nächsten Unterbrechungsmarkierung ausgeführt. Anschließend wechselt die Steuerung in den Stopp-Zustand.
- Test einzelner Programmabschnitte im Handbetrieb: Zum Test umfangreicher und gegliederter Roboterprogramme sind Testhilfen erforderlich, die eine abschnittsweise Überprüfung ermöglichen. Dazu kann der Ablaufzeiger auf den entsprechenden Programmabschnitt gesetzt und der Ablauf von dieser Stelle aus begonnen werden.
- Testen mit Arbeitsgeschwindigkeit: Im Betriebsmodus „Test 2“ (T2) werden alle Bewegungsvorgänge mit voller Antriebsleistung ausgeführt. Dabei dürfen sich aus Sicherheitsgründen – im Gegensatz zum T1-Betrieb – keine Personen im Arbeitsraum des Roboters befinden.

Erst nach Abschluss aller Test- und Korrekturarbeiten ist ein Ablauf der Programme im Automatikbetrieb sinnvoll.

Vermessung von Werkzeugen und Basiskoordinatenverschiebungen

Die in ▶ Kap. 13.3 beschriebenen Bezugssysteme werden in der Regel vor Beginn der Programmerstellung definiert, damit auf sie während der Bewegungsprogrammierung zurückgegriffen werden kann. Grundvoraussetzung für alle Vermessungsoperationen bildet eine justierte Roboterkinematik, mithilfe derer verschiedene Raumpunkte zum Zweck der Vermessung angefahren werden können. Vermessungsoperationen werden folglich immer *online*, d. h. unter Verwendung des realen Roboters durchgeführt.

Ziel der Werkzeugvermessung ist es, den Tool Center Point des Werkzeugs (TCP) festzulegen, mit dem eindeutige Punkte im Raum angefahren werden und auf den sich z. B. die Greif- oder Schweißpunkte beziehen. Die Angaben zur TCP-Lage entsprechen einer Verschiebung und ggf. Verdrehung relativ zum Flansch-Koordinatensystem des Roboters, ◘ Bild 13.31. Zur Vermessung können unterschiedliche Methoden angewendet werden, die gleichwertige Ergebnisse liefern und – je nach Verfügbarkeit von zusätzlichen Messhilfsmitteln und Inhalt der Programmieraufgabe – ausgewählt werden können:

- XYZ 4-Punkt-Methode: Der zu vermessende TCP muss für vier unterschiedliche Achsstellungen des Roboters auf einen ortsfesten Referenzpunkt wie z. B. eine Messspitze ausgerichtet werden. Die Robotersteuerung kann dann aus den vier Flanschpositionen die relative Lage des TCP berechnen.
- XYZ Referenz-Methode: Ein neues Werkzeug wird mit einem bereits vermessenen Werkzeug verglichen und der TCP des neuen Werkzeugs bestimmt. Dazu wird ein ortsfester Referenzpunkt zunächst mit dem bekannten Werkzeug angefahren. Anschließend wird das Werkzeug getauscht und der gleiche Referenzpunkt mit dem neuen

TCP angefahren. Aus der Differenz ergibt sich die neue relative Lage des TCP.

- ABC 2-Punkt-Methode: Ziel der ABC-Methoden ist es, die Orientierung eines Werkzeugs exakt zu vermessen. Bei der 2-Punkt-Methode wird dazu ein Referenzpunkt angefahren und das Werkzeug anschließend in Stoßrichtung (X-Richtung) senkrecht auf das Greifobjekt zubewegt. Schließlich wird das Werkzeug zur Definition der werkzeugseitigen Y-Richtung innerhalb seiner XY-Ebene bewegt. Die Orientierung der TCP-Achsen kann dann aus den drei resultierenden Stützpunkten berechnet werden.
- ABC World-Methode: Mithilfe der ABC-World-Methode wird die Orientierung des TCP relativ zum Weltkoordinatensystem festgelegt. Dies erleichtert die Programmierung z. B. von Schweiß- oder Klebeoperationen, bei denen die Anstellung des Werkzeugs großen Einfluss auf den Prozess nimmt und konstant gehalten werden muss. Zum Vermessen werden die Werkzeugachsen zum Weltkoordinatensystem ausgerichtet und die Differenz abgespeichert. Mit derart vermessenem TCP wird die Bahnprogrammierung (entlang der Schweißnaht) erleichtert, da die Anstellung des Werkzeugs beim manuellen Verschieben des Roboters nicht bedacht werden muss.

Numerische Eingabe: Werkzeugdaten können auch virtuell anhand des CAD-Modells des Greifers berechnet werden. In diesem Fall kann auf eine Vermessung verzichtet werden. Die Robotersteuerung bietet dazu die Möglichkeit, Verdrehung und Verschiebung manuell in Form von Offset-Werten und Orientierungswinkeln einzugeben. Durch externe Sensorik können die eingetragenen Werte während des Betriebes zudem überprüft bzw. korrigiert werden [WIES01].

Zusätzlich zu den Angaben zur TCP-Lage können für das jeweilige Werkzeug auch Lastdaten definiert werden. Diese bestehen aus der Traglast am Roboterflansch (aus der Summe der Werkzeug- und ggf. Werkstückmasse bzw. Prozesskräften), der Lage des Traglastschwerpunktes und den jeweiligen Massenträgheiten bezogen auf den Schwerpunkt. Die Werte können einerseits numerisch anhand der Masseverteilung im CAD-Modell ermittelt werden. Andererseits bieten die jeweiligen Roboterhersteller auch steuerungsseitig Funktionen zur Lastbestimmung durch Auswertung des dynamischen Achsverhaltens an. Dazu führt der Roboter eine Pendelbewegung der einzelnen Achsen aus.

Die Angaben zur Traglast werden durch die Robotersteuerung bei der Interpolation berücksichtigt, sodass bei geringer Traglast höhere Beschleunigungen und Verzögerungen realisiert werden können und sich die Zykluszeit verkürzt. Werden Bewegungen ohne Angaben zur Traglast ausgeführt, werden die Beschleunigungswerte für den Fall der maximalen Roboterbelastung angenommen. Hierdurch vergrößert sich die Zykluszeit.

Mit der Basisvermessung werden benutzerspezifische Koordinatensysteme definiert, auf die sich die Positionsangaben der einzelnen Bewegungspunkte beziehen. Grundsätzlich ist es dem Bediener überlassen, ob Bahnpunkte in Weltkoordinaten oder in Abhängigkeit zu einem definierten Basissystem gespeichert werden. Die Verwendung verschiedener Basissysteme bietet jedoch große Vorteile, insbesondere bei der Roboterinbetriebnahme in einer sich häufig verändernden Umgebung. So müssen beispielsweise bei der Neuanordnung einer Werkstückpalette nicht alle einzelnen Palettenplätze neu programmiert werden, sondern es genügt, die zugehörige Basis erneut zu vermessen. Dadurch kann das bestehende Palettierungsprogramm wiederverwendet werden.

Die Lage eines Basiskoordinatensystems kann analog zur Werkzeugdefinition vermessen oder mittels numerischer Eingabe festgelegt werden. Voraussetzung für die Basisvermessung ist dabei ein vermessenes Werkzeug. Dabei werden zwei Ansätze unterschieden:

- 3-Punkt-Methode: Der TCP des Werkzeugs wird zunächst im Ursprung des Koordinatensystems positioniert. Anschließend wird der TCP in positiver X-Richtung verfahren. Der dritte Stützpunkt resultiert aus einer beliebigen Bewegung des TCP innerhalb der XY-Ebene in positiver Y-Richtung.
- Indirekte Methode: Es werden nacheinander Soll-Positionen innerhalb des neu zu definierenden Koordinatensystems angegeben und der TCP an die reale Position bewegt. Die Lage und Orientierung des Koordinatenursprungs kann dann aus dem Abgleich von Soll-Position und angefahrener Ist-Position berechnet werden.

Basiskoordinatensysteme haben – neben der Erleichterung der nachträglichen Programmeditierung – große Bedeutung für die Anwendbarkeit der virtuellen Inbetriebnahme, da sie den Abgleich zwischen Modell-Geometrien und realer Betriebsmittelumgebung sicherstellen.

Werkstattorientierte Programmiersysteme

Mit werkstattorientierten Programmiersystemen (WOP) für Roboter sind Hilfssysteme gemeint, die den Programmierer bei der Programmerstellung unterstützen und deren Funktionsumfang deutlich über den gängiger Robotersteuerungen hinausgeht [DREW97]. Die Hilfsfunktionen betreffen z. B. die grafische Darstellung von programmierten Bahnen, Unterstützung durch Programmierautomatismen (Makros), die Nutzung von CAD-Daten oder neuartige Ein-/Ausgabeverfahren (Touchscreen, Spracherkennung, Gestensteuerung usw.). Ziel solcher Systeme ist es, die Programmierung vor Ort gegenüber bekannten Systemen deutlich schneller, ergonomischer und mit höherer Qualität durchführen zu können. Der Programmierer muss in keiner Phase der Programmerstellung direkte Änderungen im Programm-Code vornehmen.

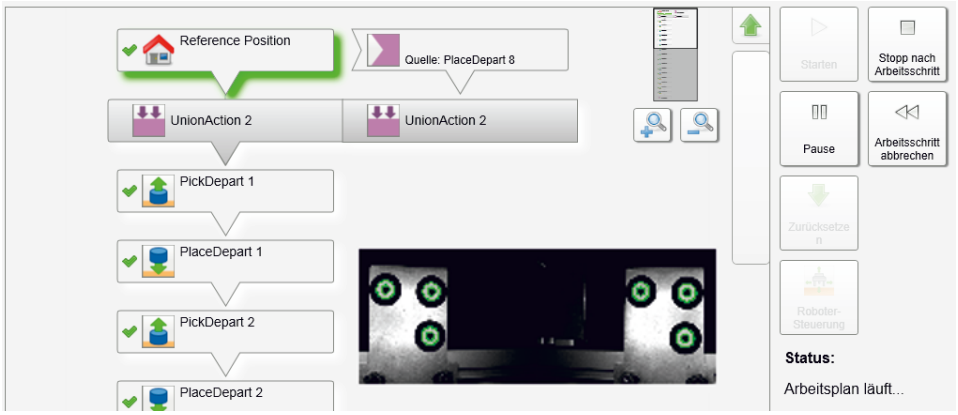


Bild 13.46 Bedienoberfläche des werkstattorientierten Programmiersystems APAS. Nach Robert Bosch Manufacturing Solutions

Bild 13.46 zeigt ein Beispiel für eine werkstattorientierte Programmieroberfläche. Die Programmierung findet hier vor Ort mit Hilfe des Handbediengerätes mit Touchscreen-Funktionalität statt und erlaubt somit das schnelle Anpassen des Programmablaufs durch den Maschinenbediener. Wie dargestellt ist es möglich, als Bediener ein Kamerasystem z. B. zur Lagereferenzierung in den Programmierprozess bzw. in die automatisierte Ausführung einzubeziehen.

13.5.2 Offline-Programmiersysteme

Die Offline-Programmierung kommt im Gegensatz zu den Online-Verfahren ohne direkten Zugriff auf den real existierenden Roboter aus. Dabei besteht der größte Vorteil zu Online-Verfahren – neben der Möglichkeit der produktionsparallelen Anwendbarkeit – in der leichteren Eingabemöglichkeit komplexer Programmabläufe. Unterschieden werden die Verfahren textuelle Programmierung, grafische Programmierung und simulationsgestützte Programmierung, welche nachfolgend erläutert werden.

Textuelle Programmerstellung

Bei textueller oder allgemein bei nicht auf CAD-Daten basierender Programmierung wird die Programmerstellung meist in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird das Programmgerüst offline, also z. B. in der Arbeitsvorbereitung, erstellt. Dabei werden die Bewegungsbefehle zunächst in Form von Platzhaltern vorgesehen, aber nicht mit Positionswerten ausgefüllt. Das Einlernen der Positionen sowie der Programmtest und die Optimierung finden dann im zweiten Schritt direkt am Roboter, also online, statt. In diesem Fall spricht man auch von hybrider Programmierung.

Für die Offline-Programmierung werden von den verschiedenen Roboterherstellern rechnergestützte Programmiersysteme angeboten, mit denen die Programmierung in der steuerungsspezifischen Sprache (z. B. KRL bei KUKA, RAPID bei ABB, KAREL bei FANUC, V+ bei Adept und VAL3 bei Stäubli) durchgeführt werden kann. Die Programmiersprache IRL (Industrial Robot Language, DIN 66312, Teil 1) wird stellvertretend für eine Reihe ähnlicher marktüblicher Programmiersprachen ausführlich in ▶ Kap. 13.5.3 beschrieben. Ihr Aufbau und Syntax sind an die Programmiersprache PASCAL angelehnt.

Grafische Programmierung mit Ablaufdiagrammen

Die geringe Übersichtlichkeit textueller Roboterprogramme und die hohe Fehlerrate bei der Programmerstellung sorgten in der Vergangenheit besonders bei roboterunerfahrenen Anwendern für Berührungsängste. Aus diesem Grund wurde eine Programmiermethodik auf Basis grafischer Ablaufdiagramme entwickelt [WECK97]. In Kooperation mit der Firma Bosch wurde am WZL das Programmiersystem BAPS plus entwickelt, Bild 13.47, das eine Roboterprogrammerstellung unabhängig von der Syntax einer Programmiersprache ermöglicht.

Nach diesem Konzept lassen sich auch komplexe Programmstrukturen einfach und übersichtlich erstellen und handhaben. Die Programmerstellung erfolgt durch die Auswahl von Programmbefehlen, die in Form von Icons dargestellt werden und aus einer Bibliothek auswählbar sind. Dabei wird der unterlagerte Programmcode während der Programmerstellung automatisch generiert, Bild 13.47 rechts.

Die Anbindung an die Robotersteuerung eröffnet dem Programmierer Möglichkeiten zum Online-Debugging und zur Optimierung der erstellten Programme. Die Funktionalitäten beinhalten dabei das Hoch- und Herunterladen von Programmdateien, das Auslesen und Setzen von Variablen bzw. Signalen und die grafische Anzeige des aktuellen Steuerungszustandes.

Roboterprogrammsimulation

Ein wesentlicher Nachteil der rein textuellen Programmierung mit Hilfe einer Sprache ist, dass die offline erstellten Programme oft lange Test- und Optimierungszeiten vor Ort erfor-

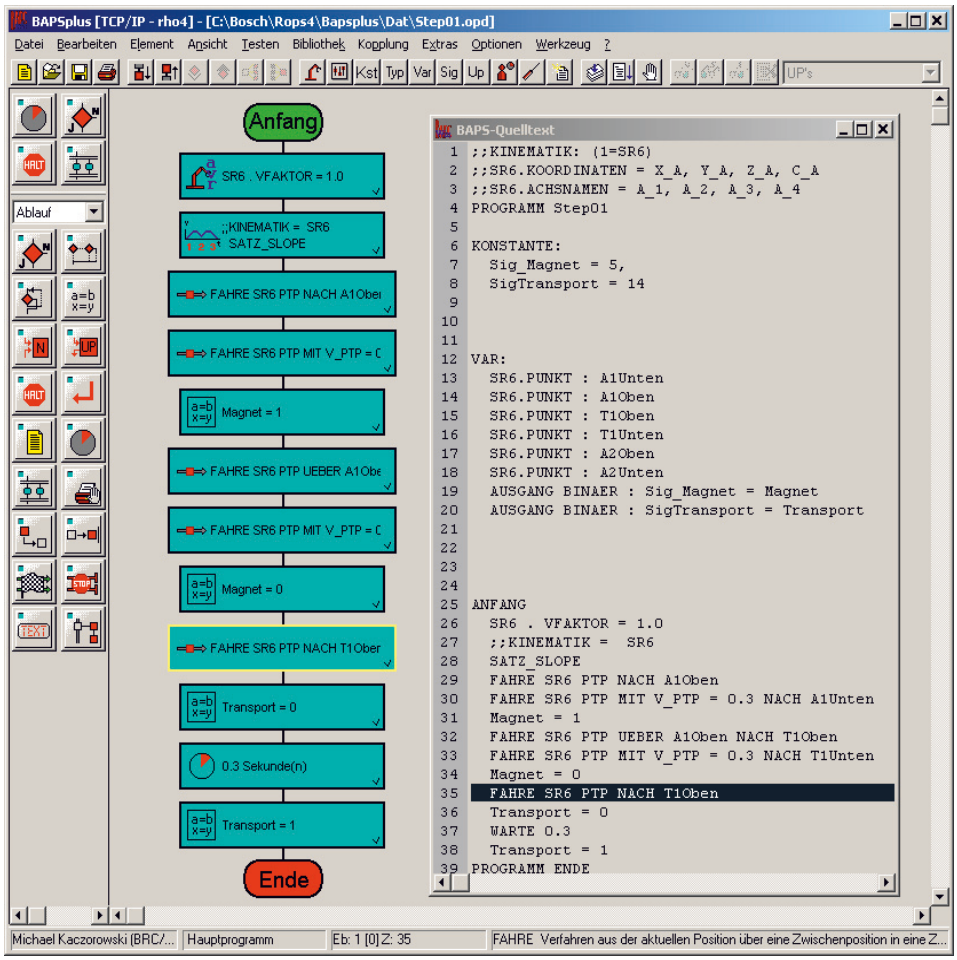


Bild 13.47 Grafisches Programmiersystem BAPS plus

dern. Weiterhin ist insbesondere bei der Programmierung von komplexen räumlichen Bearbeitungsvorgängen mit sechsachsigen Gelenkrobotern eine vollständige Offline-Programmierung ohne entsprechende Hilfsmittel praktisch nicht möglich, da das räumliche Vorstellungsvermögen des Programmierers dabei überfordert wird. Hier schafft die Simulation der Industrieroboterprogramme durch die grafische Darstellung der Bewegungen Abhilfe. In der Regel umfassen Systeme zur Ablaufsimulation auch Funktionen zur automatischen Generierung des zugehörigen Programmcodes.

Den Ablauf einer simulationsgestützten Roboterprogrammierung zeigt Bild 13.48.

Voraussetzung für die Erstellung und Simulation eines Roboterprogramms ist immer die Modellierung der Arbeitszelle und des Roboters selbst. Prinzipiell bieten alle Simulationssysteme die Möglichkeit zur Modellierung beliebiger Systemkomponenten durch den Anwender. Insbesondere für Roboter, aber auch für gängige Werkstückpositionierer und Transporteinrichtungen, werden zusätzlich in der Regel umfangreiche Bibliotheken angeboten, die den Modellierungsaufwand für den Anwender reduzieren. Zusätzlich sind Schnittstellen zur Übernahme von CAD-Daten, sowohl für zu bearbeitende Bauteile, als auch für Systemkomponenten, vorhanden. Gängige von den Systemanbietern angebotene Schnittstellen basieren auf den Datenformaten IGES (International Graphics Exchange Standard), STEP (ISO 10303, Standard for the Exchange of Product Model Data), VDAFS (Verband der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle), STL (Stereolithographie File Format), oder JT (Jupiter Tesselation) sowie auf herstellerspezifischen Formaten.

Zur Modellierung eines Roboters gehören neben den Angaben zur Geometrie auch zusätzliche Informationen über die Kinematik und Dynamik. So müssen Achsen definiert, Zusammengehörigkeiten einzelner Teile vorgegeben und Achsgrenzen angegeben werden. Weiterhin ist für eine realistische Simulation die Angabe der erreichbaren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen für die einzelnen Achsen erforderlich. Prinzipiell sind mit einem solchen Modell bereits eine Simulation der Roboterbewegungen und eine Umrechnung von kartesischen in achsspezifische Roboterkoordinaten (und umgekehrt) möglich. Problematisch ist in diesem Zusammenhang jedoch die Behandlung von Mehrdeutigkeiten und Singularitäten, die Reaktion der realen Robotersteuerung in Grenzbereichen, das Überschleifverhalten usw. Dies resultiert aus der Tatsache, dass

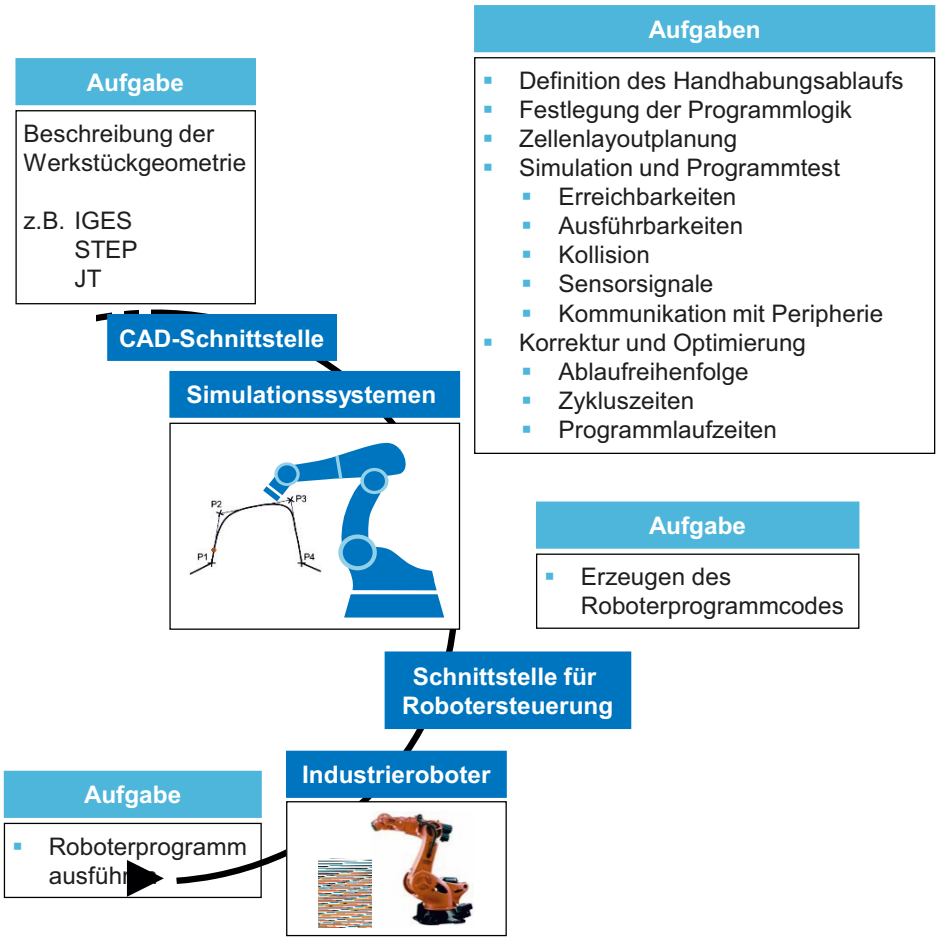


Bild 13.48 Ablauf der Offlineprogrammierung mit Simulationssystemen

jeder Steuerungshersteller spezielle, vereinfachte Transformationsalgorithmen und eigene Sonderfallbehandlungen in seine Steuerung implementiert. Weiterhin unterscheiden sich Robotersteuerungen teilweise erheblich im Überschleifverhalten und in weiteren, nicht durch die reine Kinematik vorgegebenen Umsetzungsdetails.

Die herstellerspezifischen Lösungen führen dazu, dass derselbe Roboter, von unterschiedlichen Steuerungen bewegt, teilweise erkennbar andere Bewegungen ausführt. Deshalb ist es erforderlich, neben dem Roboter auch das Steuerungsverhalten im System detailliert zu simulieren. Die Genauigkeit und damit die Nutzbarkeit eines Robotersimulationssystems ist entscheidend davon abhängig, wie realitätsnah die implementierte virtuelle Robotersteuerung das reale Steuerungsverhalten nachbilden kann. Die Nachbildung der unterschiedlichen Robotersteuerungen stellt einen erheblichen Aufwand bei der Entwicklung eines Simulationssystems dar und muss vom Systemhersteller in enger Zusammenarbeit mit dem Steuerungshersteller durchgeführt werden. Berücksichtigt man, dass in der Regel kein Steuerungshersteller bereit ist, seine exakten Transformationsalgorithmen und weitere Steuerungsinterna preiszugeben (sie bedeuten einen hohen Entwicklungsaufwand und sind eng mit den Leistungsmerkmalen der Steuerung verbunden), wird das Problem der Simulationssystemanbieter und -kunden deutlich. Um dem entgegenzuwirken, ist eine einheitliche RRS (Realistische Roboter Simulations)-Schnittstelle entwickelt worden, über die auf definierte Art und Weise das Bewegungsverhalten der realen Steuerung durch ein vom Steuerungshersteller zu lieferndes Softwaremodul mit den Originalalgorithmen abgefragt werden kann [JACO94].

Nach der Modellierung der Arbeitszelle und des Roboters kann der Anwender Roboterprogramme über die Definition von Tasks erzeugen. In einem Task werden alle für den Progammablauf und die Roboterbewegungen erforderlichen Befehle abgelegt. Das Erstellen des Tasks geschieht dabei in der Regel nicht textuell, sondern wird menügestützt und durch direktes interaktives Positionieren des Roboters oder Vorgeben von Zielpunkten in der Arbeitszelle durchgeführt. Parallel dazu generiert das System den entsprechenden Programmtext, wobei häufig eine spezielle, für das Simulationssystem entwickelte Programmiersprache genutzt wird. Das Umsetzen dieser Programme in die unterschiedlichen Steuerungssprachen wird nach Beendigung der Programmerstellung und -tests von einem Postprozessor geleistet.

Nach der Definition eines Task kann dieser simuliert werden. Als Standard hat sich hier mittlerweile eine Darstellung im virtuellen Raum durchgesetzt, Bild 13.49. Dabei

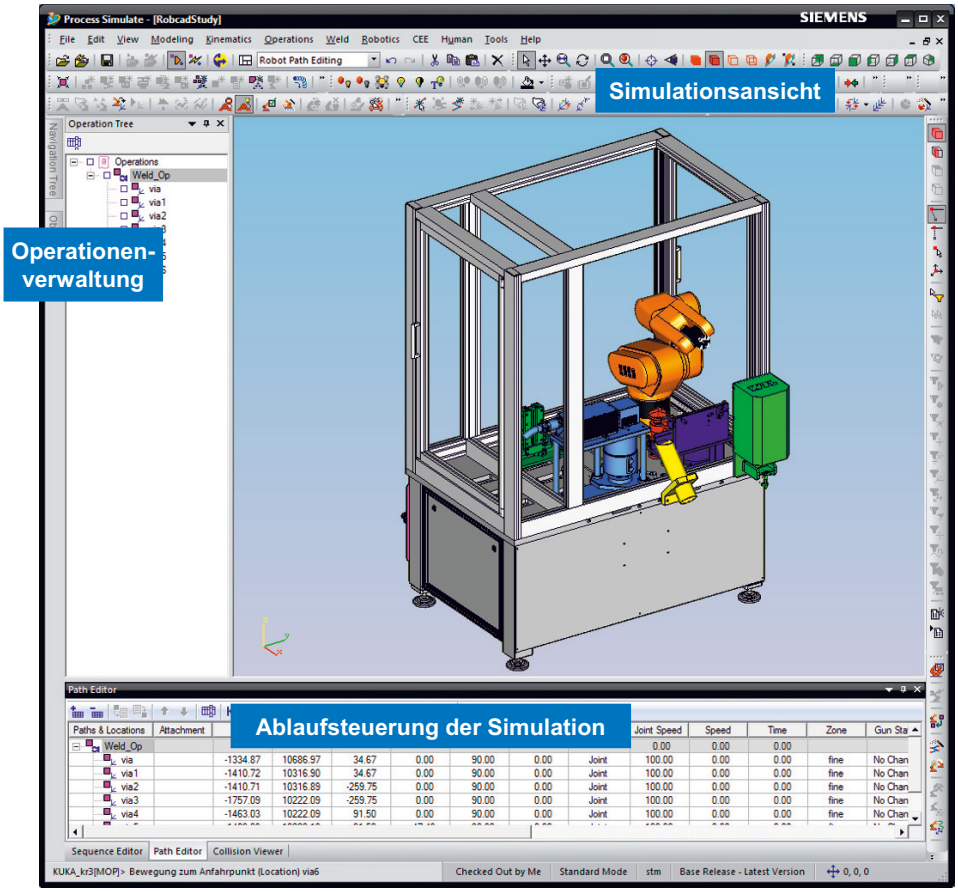


Bild 13.49 Robotersimulations- und Programmiersystem Process Simulate. Nach SIEMENS

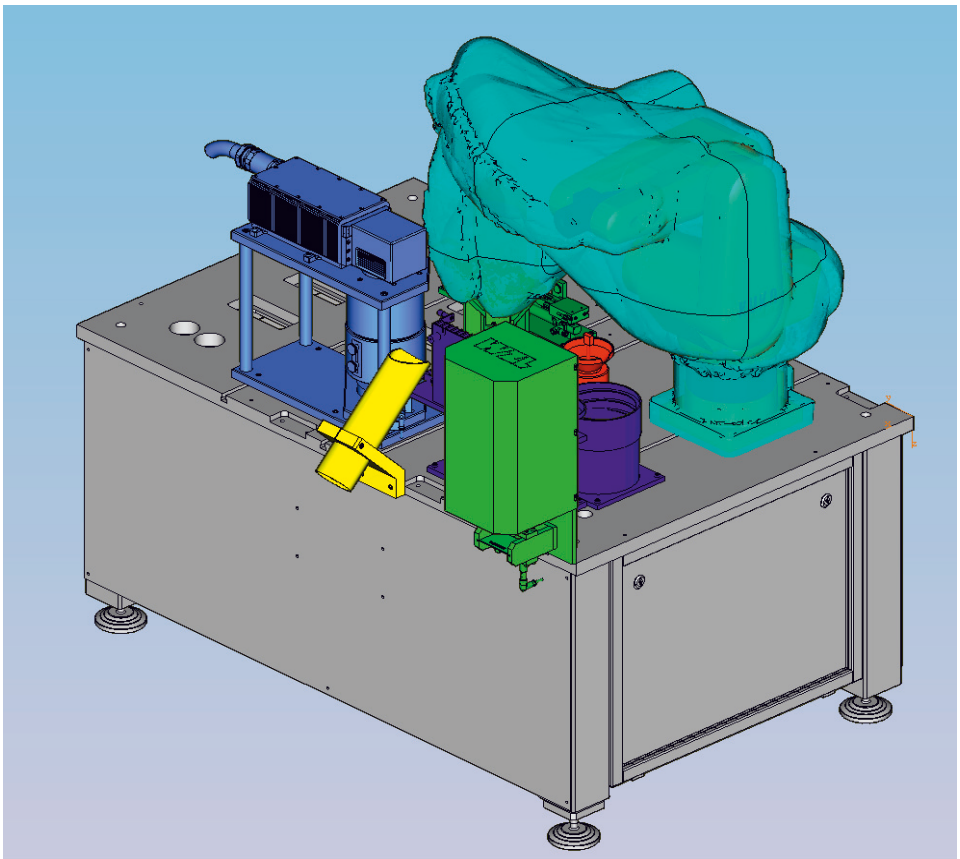


Bild 13.50 Hüllkurvenberechnung in Process Simulate. Nach SIEMENS

können mehrere Lichtquellen vorgegeben und der Betrachtungsstandpunkt frei gewählt werden.

Neben der reinen Simulation des Programmablaufs und der Roboterbewegungen stehen in den meisten Systemen umfangreiche weitere Funktionen zur Verfügung. So ist z. B. die Taktzeitermittlung und -optimierung ein wichtiges Kriterium für die Programmerzeugung. Weiterhin werden Funktionen zur Layoutoptimierung, automatischen Bahnplanung, Roboterkalibrierung usw. angeboten. ◘ Bild 13.49 zeigt beispielhaft die Oberfläche des Simulationssystems Process Simulate der Fa. Siemens.

Die immer stärker werdende Forderung zur Automatisierung umfangreicher und komplexer Fertigungsprozesse und die damit verbundenen stark variierenden Anforderungen an die Funktionalität geeigneter Simulationssysteme hat zur Entwicklung applikationsspezifischer Softwarepakete innerhalb der Simulationssysteme geführt. Die einzelnen Module enthalten spezifische Funktionalitäten wie z. B. das Anlegen von Schweißparameter-Datenbanken, die automatische Erzeugung von Schweißpunkten, die Kollisionserkennung und Hüllkurvenberechnung einer Roboterbewegung (◘ Bild 13.50), prozessspezifische Eingabemasken usw.

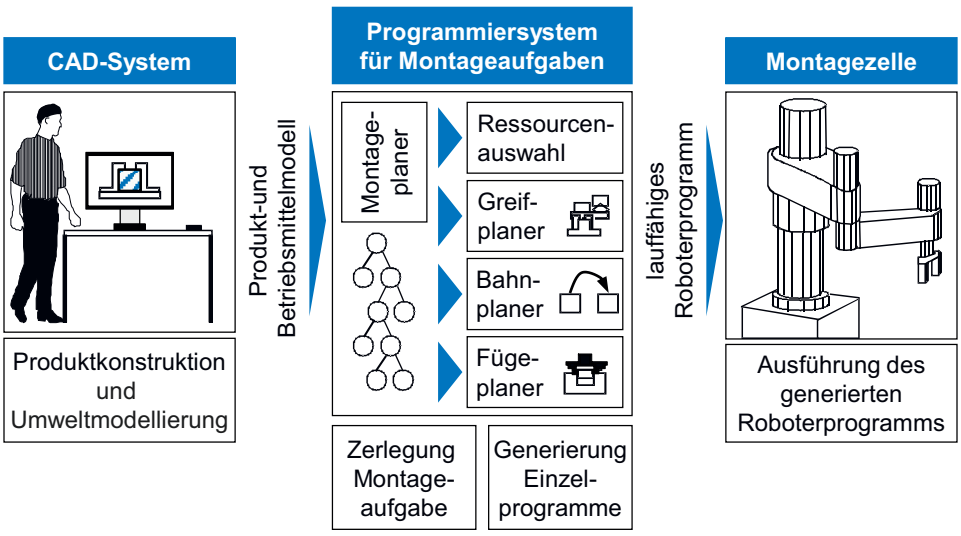
Aufgabenorientierte Roboterprogrammierung

Die vorgestellten textuellen oder grafischen Verfahren definieren das steuerungstechnische Verhalten eines Robotersystems, indem sie die auszuführenden Handlungen explizit festschreiben, z. B. „Linearbewegung von Stützpunkt 1 nach Stützpunkt 2 mit 1 m/s Bahngeschwindigkeit“. Aufgrund des engen Bezugs zur ausführenden Roboterkinematik werden die Methoden auch als roboterorientierte Programmierverfahren bezeichnet.

Die aufgabenorientierte Roboterprogrammierung zählt ebenfalls zu den Offline-Programmierverfahren. Im Unterschied zu den roboterorientierten Verfahren erfolgt hier eine Abstraktion der zu realisierenden Tätigkeiten des Roboters bezüglich des zugrunde liegenden Ziels einer Roboterbewegung bzw. -aktion. Dabei legt der Planer eine Abfolge von Aufgaben fest, die das Robotersystem nacheinander abarbeitet, wie z. B. „Greife Bauteil A aus Magazin B“. Zur Ausführung durch die Robotersteuerung werden diese Anweisungen durch ein Planungssystem zunächst in Einzelbewegungen und Logikoperationen übertragen und in Code übersetzt. Zu Beginn der Planung müssen dazu die notwendigen impliziten Informationen über den Ablauf aus der Aufgabenbeschreibung extrahiert werden, die der Bediener bei roboterorientierten Programmierverfahren explizit festlegt.

Ausgangsbasis für viele aufgabenorientierte Programmierungsansätze ist die detaillierte Produkt- und Umweltbeschreibung im CAD-System. Die vorhandenen Systeme orientieren sich in ihrem Funktionsumfang an den Online-Programmierverfahren und übertragen diesen auf das Simulationssystem. Die möglichen Einsparpotenziale z. B. durch Programmoptimierungen führen jedoch noch nicht zu einer merklichen Reduzierung der Programmierzeit. Dies ist nur durch verstärkten Einsatz von Automatismen möglich, die dem Anwender zeitaufwendige Arbeiten, wie das Vorgeben einer kollisionsfreien Bahn, das genaue Definieren von Greifpunkten oder die Auswahl von Schweißparametern usw., abnehmen.

Die Struktur eines aufgabenorientierten Roboterprogrammiersystems für den Montagebereich ist in ◘ Bild 13.51 gezeigt. Teilaufgaben, wie die Ressourcen- oder Werkzeugauswahl, die Greifplanung und die Bahnplanung, erfordern entweder den Eingriff des Planers z. B. durch ein Expertensystem für die Greifplanung oder können durch automatische Planungsmodule selbstständig gelöst werden, wie z. B. die Berechnung einer kollisionsfreien Bewegungsbahn. Das Programmiersystem leistet hier die Integration der verschiedenen Planungsergebnisse zur Erstellung eines vollständigen Ablaufs.



◘ **Bild 13.51** Struktur eines Programmiersystems für Montageaufgaben

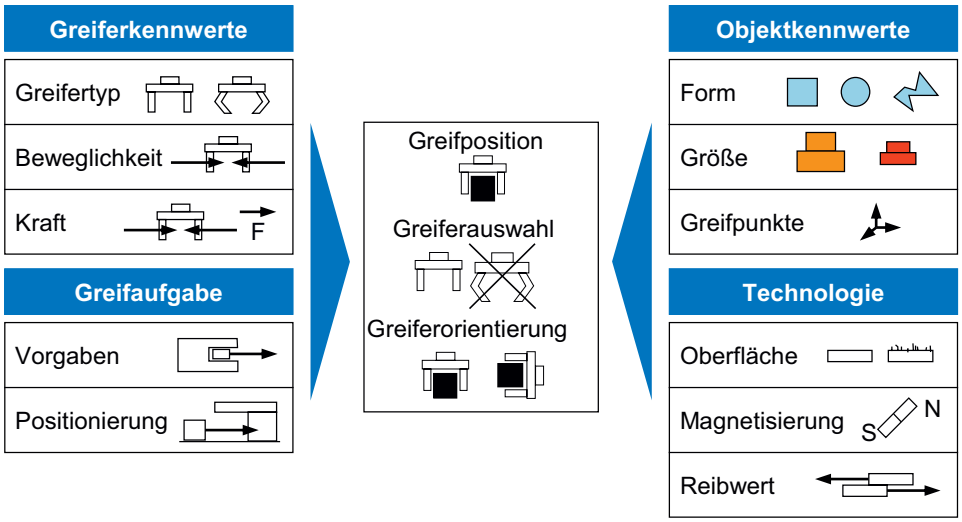


Bild 13.52 Aspekte zur Greifplanung

Aktionsplaner

Aufgabe des Aktionsplaners ist die Zerlegung der Gesamtmontageaufgabe in logische Teiloperationen, die anschließend in den weiteren Planungsmodulen Greif-, Bahn- oder Fügeplaner in ausführbare Roboterprogrammanweisungen aufgelöst werden können.

Greifplanung

Aufgabe der Greifplanung ist es, eine günstige Greiferposition für die Handhabung eines Objektes zu finden, sodass der sichere Transport, ohne Beschädigung der Werkstücke während des Greifens, möglich wird. Um dies zu verwirklichen, müssen mehrere Kriterien berücksichtigt werden, Bild 13.52.

Die vom Greifer auf das Objekt wirkenden Kräfte müssen ausreichend sein, um sämtliche äußere Kräfte, die auf dieses Objekt wirken (Gewichts- und Trägheitskraft), zu überwinden. Die Greifstelle muss für den Greifer erreichbar sein, sowohl in der Anfangs- als auch in der Zielstellung, d. h. sie muss so ausgesucht werden, dass keine Kollision zwischen Greifer und umliegenden Objekten beim Zusammenfügen vorkommt. Ist dies nicht möglich, muss eine Sequenz von Greifoperationen erzeugt werden, d. h. das Objekt muss umgegriffen werden.

Bahnplanung

Die Aufgabe der Bahnplanung beinhaltet, dass bei gegebener Roboterumwelt, Anfangskonfiguration und Zielkonfiguration eine Sequenz von Roboterbewegungen zu finden ist, bei denen keine Kollision mit Objekten der Roboterumwelt auftritt. Die Roboterkonfigurationen beschreiben die achsspezifischen Position des Roboters eindeutig und lösen dadurch mögliche Mehrdeutigkeiten des Roboters auf, sofern dieser TCP-Positionen und -Orientierungen mit unterschiedlichen Achsstellungen anfahren kann.

Die zweite Teilaufgabe besteht darin, eine kontinuierliche Folge von Roboterkonfigurationen zu finden, damit der Roboter von einer Anfangskonfiguration zu einer Zielkonfiguration gesteuert werden kann. Mit steigender Achsenanzahl steigt auch die Komplexität dieses Zustandsübergangs, sodass hier rechenaufwendige Algorithmen (z. B. durch „Trial and Error“ [FERR05]) oder Heuristiken Anwendung finden.

Fügeplaner

Die Hauptaufgabe des Fügeplaners ist die detaillierte Planung der Fügeoperationen. Hierzu müssen vom System die geeigneten Fügepositionen und -orientierungen sowie die zulässigen Fügekräfte am Werkstück ermittelt und die Auswertung von Sensorsignalen im Roboterprogramm vorgesehen werden. Expertenorientierte Planungssysteme berücksichtigen zur Prozessgestaltung Kontaktzustände der betroffenen Fügeobjekte, um eine Montagestrategie abzuleiten, die im Anschluss in Fügebewegungen umgesetzt werden kann [SAYL11].

Die Aufgabe, ein möglichst universell einsetzbares Programmiersystem zur Vereinfachung der Programmerstellung zu realisieren, ist bisher u. a. aufgrund der Komplexität des Problems noch nicht zufriedenstellend gelöst.

13.5.3 Industrial Robot Language (IRL) als Beispiel einer Roboter-Programmiersprache

Analog zur DIN 66025 aus der NC-Technik wurde Anfang der neunziger Jahre eine Norm für Roboterprogrammiersprachen entwickelt (IRL, Industrial Robot Language; DIN 66312, Teil 1), die zu einer Vereinheitlichung der Programmiersprachen und damit zu reduziertem Schulungsaufwand der Bediener führen sollte [DIN93; PRIT92]. Ihr Aufbau ähnelt dabei Hochsprachen wie z. B. Pascal. Damit wurde dem Trend zu immer komplexeren Roboterprogrammen und den gestiegenen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Robotersysteme und Steuerungen Rechnung getragen.

Zwar konnte das Ziel der einheitlichen Steuerungsprogrammierung mittels IRL bis heute nicht realisiert werden. Viele Steuerungshersteller haben sich jedoch bei der Entwicklung ihrer proprietären Programmiersprachen an der IRL orientiert, sodass der Funktionsumfang der Eigenentwicklungen im Wesentlichen dem der IRL entspricht. Aus diesem Grund wird die IRL im Folgenden als Beispiel zur Beschreibung üblicher Befehle und Funktionen herangezogen.

Allgemein werden mehrere Programmanweisungen in Module gegliedert, die jeweils einzelnen Aufgabenschritten entsprechen (z. B. „Bauteil aus Magazin holen“ oder „Bauteil in Spannmittel einlegen“). Die Möglichkeit, Module in verschiedenen Programmen durch Referenzieren wiederzuverwenden, reduziert den allgemeinen Codeumfang und verbessert die Übersichtlichkeit bei komplexen Abläufen.

Die Elemente eines IRL-Programms bzw. Moduls lassen sich in unterschiedliche Gruppen einteilen. Tab. 13.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Befehle und Funktionen der IRL.

System-Deklarationsdatei

Für jede Roboterzelle muss eine Beschreibung ihrer Fähigkeiten und der implementierten Zusatzfunktionen der Steuerung in Form einer Datei angegeben werden. In dieser Systemdeklaration wird zumindest eine Reihe minimal erforderlicher Variablen und Typen deklariert. Dazu zählen Angaben wie die Anzahl und Namen der Roboter einer Zelle, Anzahl und Typen der Haupt- und Zusatzachsen, Angabe von Endlosachsen, die Art der Orientierungsvorgabe, mögliche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen usw. Von diesen Angaben hängt die Funktion vieler IRL-Befehle ab. Als Beispiel sei hier die Angabe der Anzahl der Grundachsen des Systems und der Zusatzachsen genannt. Je nach Anzahl der Achsen müssen bei einem Befehl zur Roboterbewegung

Tab. 13.2 IRL-Befehlsumfang

Anweisung	Parameter/ Unteranweisung	Beispiel	Erläuterung
Datenlisten, Import- und Export-Deklarationen			
IMPORT DATALIST	Datenlistenname	IMPORT DATALIST Palette.pkt;	Einbinden einer Datenliste in das Programm (z. B. Palette.pkt mit Raumpunkten)
FROM ... IMPORT ...	Programmname, Funktionsliste	FROM Hauptprogramm IMPORT ALL;	Einbinden von Funktionen und Prozeduren aus anderen Programmen
EXPORT ... TO ...	Funktionsliste Programmname	EXPORT funktion1,funktion2 TO Palettenprogramm;	Freigeben von Funktionen für den Export in andere Programme
Deklarationen/Datentypen			
TYPE	RECORD, ARRAY, FILE	TYPE RECORD INT x; INT y; ENDRECORD = Platz;	Definition beliebiger benutzerdefinierter Datentypen aus Feld-, Record-, Datei- und benutzerdefinierten Typen
VAR Definition	BOOL, INT, CHAR, REAL, STRING, TEXT, POSITION, ORIENTATION, POSE, ROBTARGET, JOINT, INPUT, OUTPUT	VAR BOOL Fehler; STRING Meldungl:=„TeilOK“; INPUT BOOL Greifer AT 2; POSE Punkt l; Platz Anfangsplatz;	beliebiger Variablen unterschiedlicher Datentypen (sowohl vordefinierte als auch alle benutzerdefinierten Typen sind möglich)
CONST	analog VAR	analog VAR	analog VAR, nur werden Konstanten erzeugt

Tab. 13.2 IRL-Befehlsumfang (Fortsetzung)

Anweisung	Parameter/ Unteranweisung	Beispiel	Erläuterung
Systemvariablen			
Zuweisung oder Abfrage/ Verknüpfung	R_BASE, R_ACC, R_C_CP, R_TOOL, R_ROBTARGETACT, R_SPEED, R_SPEED_ORI	R_SPEED := 80; R_TOOL := Werkzeugkorr_3; R_BASE:=Basis1; IF (R_ACC > 20) THEN ...;	Bestimmung von aktuellen Geschwindigkeiten, Basiskoordinatensystemen, Werkzeugkorrekturen, Beschleunigungen, Position, Überschleifparametern, aktuellem Roboter
Hauptprogramme, Prozeduren und Funktionen			
PROGRAM	Programmname	PROGRAM Palette_fuellen; ... BEGIN ... ENDPROGRAM	Definition eines Hauptprogramms mit einem beliebigen Programmnamen
PROCEDURE	Prozedur-Name	PROCEDURE Greifer_auf (INT a); BEGIN ... ENDPROC;	Definition einer Prozedur mit beliebigem Namen und Übergabeparametern (innerhalb eines Hauptprogramms)
FUNCTION	Funktions-Name	FUNCTION Greifen (INT a): INT; BEGIN ... ENDFCT;	Definition einer Funktion mit beliebigem Namen, Übergabeparametern und Rückgabetyp (in Hauptprogramm)

(MOVE) unterschiedlich viele Achswerte vorgegeben werden, d. h. der Datentyp für die Roboterstellung ist ein anderer. Ähnliches gilt für Rechenoperationen.

Datenlisten, Import- und Export-Deklarationen

In der IRL können Daten, die von Zelle zu Zelle unterschiedlich sind, oder Roboterstellungen, die geteacht werden müssen, in sogenannten Datenlisten abgelegt werden. Als Datenliste wird eine Datei bezeichnet, die Variablen, Konstanten, Typen und sonstige Deklarationen (z. B. E/A-Namen) enthält. Der Vorteil von Datenlisten ist die Trennung zwischen zellenabhängigen und zellenunabhängigen Daten. Soll z. B. ein Programm auf zwei Robotern ablaufen, so sind aufgrund von Toleranzen die zu programmierenden Roboterstellungen für beide Programme geringfügig verschieden. Werden diese Stellungen in Datenlisten abgelegt, so muss lediglich eine neue Datenliste erstellt und in das Programm eingebunden werden (INCLUDE). Änderungen am Programm selbst sind nicht erforderlich. Gleiches gilt auch für die Belegung von Ein- und Ausgängen, denen in IRL Namen zugeordnet werden können. Ändert sich die physikalische Zuordnung der Ein- und Ausgänge von einer Zelle zur nächsten und ist die Namenszuordnung in einer Datenliste abgelegt, so reicht eine Aktualisierung der Datenliste aus, um das Programm auf der zweiten Zelle lauffähig zu machen.

Ferner können mit Hilfe der IMPORT- und EXPORT-Anweisungen Funktionen aus anderen Programmen genutzt bzw. eigene Funktionen anderen Programmen zur Verfügung gestellt werden.

Deklarationen

IRL erlaubt die Vergabe nahezu beliebiger Bezeichnungen für Variablen. Wie bei höheren Programmiersprachen allgemein üblich, müssen alle im Programm benutzten Variablen, Konstanten, Typen oder Funktionen vor ihrer Benutzung deklariert werden. Neben der Reduzierung von Fehlern (der Compiler kann Schreibfehler in Namen erkennen) bietet dieses Konzept auch die Möglichkeit, eigene, komplexe Datentypen zu erzeugen. Hierzu zählen unter anderem Felder und Records sowie beliebige Kombinationen und Verschachtelungen bereits deklarierter Typen.

Tab. 13.2 IRL-Befehlsumfang (Fortsetzung)

Anweisung	Parameter/ Unteranweisung	Beispiel	Erläuterung
Programmablaufanweisungen			
FOR	Laufvariable, von, bis, Schrittweite	FOR i:=1 TO 10 STEP 2 {Anweisungsblock}; ENDFOR;	Schleife zur mehrmaligen Wiederholung eines Anweisungsblocks
WHILE	Ausführungs-Bedingung	WHILE i < 10 {Anweisungsblock}; ENDWHILE;	Wiederholung eines Anweisungsblocks solange eine Bedingung wahr ist
REPEAT	Abbruch-Bedingung	REPEAT {Anweisungsblock}; UNTIL i >= 10;	Wiederholung eines Anweisungsblocks bis eine Abbruch-bedingung eintritt
LABEL	Sprungmarken-Name	LABEL Anfang;	Definition einer Sprungmarke
GOTO	Sprungmarken-Name	GOTO Anfang;	Unbedingter Sprung zur angegebenen Sprungmarke
IF	Bedingung	IF (Palette = OK) THEN ... ELSE ... ENDIF;	Bedingte Verzweigung
CASE	Bezeichner, Alternativen	CASE Greifer OF WHEN Greifer_1: i:=1; WHEN Greifer_2: i:=2; ... ENDCASE;	Bedingte Verzweigung mit mehrfacher Auswahl (beliebig viele Alternativen und Zweige)
WAIT	FOR, SEC	WAIT FOR Greifer=OK TIMEOUT 10 SEC ERROR ... ENDERROR;	Warten auf eine Bedingung oder für eine bestimmte Zeit. Beim Überschreiten eines Timeout-Intervalls wird ein gesonderter Anweisungsblock abgearbeitet
PAUSE	Meldung	PAUSE „Bitte Palette wechseln“;	Warten, bis die Start-Taste gedrückt wird. Die Ausgabe einer Meldung auf der Steuerung ist möglich
RETURN	Rückgabewert	RETURN 5;	Rücksprung aus einer Funktion (mit Rückgabewert) oder Prozedur
HALT		HALT;	Beendet den Programmablauf

Tab. 13.2 IRL-Befehlsumfang (Fortsetzung)

Anweisung	Parameter/ Unteranweisung	Beispiel	Erläuterung
Bewegungsanweisungen			
MOVE PTP	Zielpunkt ACT_ROB, C_PTP, SPEED_PTP, ACC_PTP, TIME, UNTIL	MOVE PTP Wechselpos C_PTP SPEED_PTP:=80;	Punkt-zu-Punkt Parameter: Überschleifverhalten, Beschleunigung, Bewegungszeit, Bewegungsbedingung
MOVE LIN	Zielpunkt ACT_ROB, C_CP, C_SPEED, SPEED_ORI, SPEED, ACC, TIME, UNTIL, WOBBLE	MOVE LIN Wechselpos C_CP TIME:=4 WOBBLE;	Lineare Bewegung Parameter: Überschleifverhalten, Beschleunigung, Bewegungszeit, Bewegungsbedingung Zusätzlich kann die lineare Bewegung mit einer Pendelbewegung überlagert werden (WOBBLE)
MOVE CIRC	Stützpunkt, Zielpunkt, sonst analog LIN	MOVE CIRC Zwischenpkt Wechselpos SPEED:= 100;	analog LIN, jedoch mit einem Stützpunkt auf dem Kreis und dem Endpunkt
MOVE_INC PTP/LIN/ CIRC	analog MOVE	analog MOVE	analog MOVE, nur mit relativen Positionsangaben zur aktuellen Roboterstellung

Tab. 13.2 IRL-Befehlsumfang (Fortsetzung)

Anweisung	Parameter/ Unteranweisung	Beispiel	Erläuterung
Ein-/Ausgabeanweisungen			
Zuweisung/ Abfrage	Ausgangsname, Wert/Eingangsname	OUT_5 := FALSE; IF ANALOG_INI > 12.5 THEN ...	Ein-/Ausgänge werden wie Variablen/Konstanten behandelt und können entsprechend gesetzt bzw. abgefragt werden. Je nach Typ des Ein-/Ausgangs (binär, digital, analog) hat die Variable einen anderen Datentyp
OPEN	Dateizeiger, Dateiname, Modus, Fehlercode	OPEN (Datei,„test.dat“,R, Fehler).	Öffnet eine Datei oder einen Datenkanal
CLOSE	Dateizeiger	CLOSE (Datei);	Schließt die angegebene Datei oder den Datenkanal
READ/ READLN	Datenvariable	READ (Datei, Daten);	Liest aus der Datei in die Variable Daten
WRITE/ WRITELN	Datenvariable	WRITE (Datei, Daten);	Schreibt den Inhalt von Daten in die Datei

Tab. 13.2 IRL-Befehlsumfang (Fortsetzung)

Anweisung	Parameter/ Unteranweisung	Beispiel	Erläuterung
Logische und arithmetische Verknüpfungsanweisungen, Rechenfunktionen, vordefinierte Funktionen			

NOT,+,-,*,/, MOD, DIV, <, >, =, <>, AND, &, OR,EXOR...	ein oder zwei Operanden (je nach Verknüpfung)	Zustand := NOT Fehler;
		IF (Param <> 10) THEN ...;
		ok:=(E1 AND E2) OR E3;
			Praktisch alle gängigen logischen und binären Verknüpfungsanweisungen

SIN, COS, ASIN, ACOS, ATAN2, ROUND, SQRT, COMPARE, ...	je nach Funktion unterschiedlich	x: =SIN(y);
		Gleich:=COMPARE(Text1,Text2);
		xr:=ROUND(x);
		Wurzel:= SQRT(134.44);
			Funktionen für trigonometrische und geometrische Berechnungen. Funktionen für Stringbearbeitung und Vergleich etc.

Geometrische Verknüpfungsanweisungen			
+,-,/, *,@	Operand1, Operand2	NeuPos:=Zielpos1@ Pose1;	Verknüpfungen von Positionsvariablen. Im Beispiel: Transformation von Zielpos1 durch Pose1

13

Systemvariablen

Viele Vorgaben, für die bisher oft spezielle Befehle existierten, werden in IRL durch das Ändern unterschiedlicher Systemvariablen realisiert. Dies gilt beispielsweise für das Einstellen der Achs- und Bahngeschwindigkeit sowie der Beschleunigung bei Bewegungssätzen. Ebenso werden der aktuelle Roboter ausgewählt und Werkzeugkorrekturen oder Koordinatensysteme geändert.

Hauptprogramme

Ein Hauptprogramm bildet die Basis für die Definition und den Aufruf weiterer Programmkomponenten.

Prozeduren und Funktionen

Wiederkehrende Programmanweisungen werden in Prozeduren oder Funktionen abgelegt und können aus allen Programmteilen, die zum selben Hauptprogramm gehören, aufgerufen werden. Der Unterschied zwischen Funktionen und Prozeduren besteht darin, dass Funktionen zusätzlich zu den Übergabeparametern, die beliebig vom Anwender vorgeben werden können, einen frei definierbaren Rückgabewert besitzen.

Schleifen

Schleifen bieten die Möglichkeit der wiederholten Ausführung bestimmter Programmabschnitte. Wahlweise kann die Anzahl der Wiederholungen oder eine Ausführungsbedingung für die Schleife angegeben werden. Je nach Schleifentyp erfolgt die automatische Prüfung der Ausführungsbedingung zu Beginn oder am Ende eines jeden Durchlaufs.

Programmablaufanweisungen

Zu den Programmablaufanweisungen gehören Sprungbefehle sowie Befehle zur logischen Programmverzweigung, Unterbrechungsmarken, Rücksprunganweisungen und Warteanweisungen.

Bewegungsanweisungen

Zur Festlegung der verschiedenen Bewegungsarten eines Roboters (Point-To-Point, Linear- und Zirkularbewegung, vgl. ► Kap. 13.4) werden entsprechende Befehle eingesetzt. Die Programmierung der maximalen Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte legt das achs- bzw. bahnbezogene Fahrverhalten fest. Ausgewählte Nullpunkt- und Werkzeugkorrekturen verschieben die im Anwenderprogramm festgelegten TCP-Positionen und beeinflussen die zugehörigen Handorientierungen. Durch Überschleifparameter werden Zielpunkte nicht mehr genau angefahren, sondern der nächste Bewegungssatz vorzeitig in Abhängigkeit von gewählten Grenzwerten (Geschwindigkeit oder Weg) eingeleitet.

Für spezielle Anwendungen, z. B. im Bereich der Schweißtechnik, werden Pendelfunktionen eingesetzt, die der programmierten Bahn eine oszillierende Bewegung überlagern.

Ein-/Ausgabeanweisungen

Zu dieser Befehlsgruppe gehören zum einen einfache Grundfunktionen speicherprogrammierbarer Steuerungen, wie z. B. das Setzen und Zurücksetzen binärer Ausgänge, zum anderen die Handhabung digitaler und analoger Ein- und Ausgänge. Durch Möglichkeiten zur Definition von Ein- und Ausgängen durch den Benutzer, die automatische Umsetzung binärer, digitaler und analoger Zustände in boolesche, ganzzahlige und reale Zahlen und die damit praktisch beliebige Verknüpfbarkeit dieser Signale (z. B. Durchführung arithmetischer und logischer Funktionen) können mit wenigen ein- bzw. ausgabespezifischen Anweisungen nahezu alle erforderlichen Funktionalitäten abgedeckt werden. Auch Wortoperationen zur Besetzung von Parametern und Ausgängen, die Verarbeitung von prozessabhängigen Analogsignalen und Anweisungen zur Betätigung von Greifern (Öffnen, Schließen) lassen sich hiermit realisieren.

Weiterhin fallen alle Funktionen zum Lesen und Schreiben von Daten auf beliebige Geräte in diesen Bereich. Hierzu zählt das Ausgeben von Texten auf dem Bildschirm oder dem PHG (Programmier-Hand-Gerät) wie das Schreiben und Lesen von Dateien auf externen Datenspeichern. Durch das in IRL eingeführte Kanal-Konzept in Verbindung mit den Read- und Write-Anweisungen ist das Ansteuern unterschiedlichster Geräte möglich.

Logische Verknüpfungsanweisungen

Boole'sche Operationen (z. B. UND, ODER) dienen zur bitweisen Verknüpfung von Variablen oder Konstanten. In der IRL stehen umfangreiche Möglichkeiten zur Verknüpfung und Manipulation auf Bit-Ebene zur Verfügung. Ebenfalls sind Funktionen zum Vergleich von Variablen vorhanden.

Arithmetische und geometrische Operationen

Arithmetische Operationen ermöglichen die Verarbeitung beliebiger Variablen und Konstanten. Neben den bekannten Grundrechenfunktionen stehen trigonometrische Funktionen und Operanden zur Koordinatentransformation zur Verfügung. Dadurch sind mittels IRL komplexe Rechenoperationen realisierbar.

Wie die Aufzählung zeigt, bietet IRL eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten zur Strukturierung des Programms, zur Durchführung von Berechnungen, zur Ein- und Ausgabebearbeitung, zur Deklaration von Typen, Variablen und Funktionen usw. Die Anzahl der roboterspezifischen Anweisungen ist dabei verhältnismäßig gering. Dies liegt in der Zielsetzung bei der Erstellung der DIN 66312 Teil 1 begründet, die darauf ausgerichtet ist, mit einem möglichst geringen Funktionsumfang einen möglichst großen Teil der Standard-Befehle einer Robotersteuerung abzudecken.

Mit dem so geschaffenen Hilfsmittel lassen sich darüber hinaus nicht nur Grundfunktionen, sondern auch einige Sonderfunktionen durch geeignete Funktionsanwendungen abdecken. Dies wird durch die Möglichkeit, Module, z. B. von Sensor- oder Greiferherstellern, zur Ansteuerung ihrer Komponenten in IRL-Programme einzubinden, weiter unterstützt. Dabei besteht auch die Möglichkeit, bereits compilierte Programmteile, z. B. in Form von Bibliotheken, in das eigene Programm einzubinden. Diese getrennte Compilierung bietet den Vorteil, dass applikationsspezifische Bibliotheken oder ausgetestete Bausteine nicht bei jeder Änderung im Anwenderprogramm neu übersetzt werden müssen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Zusatzfunktionen der Roboterprogrammierung beschrieben, die heute von vielen Steuerungsherstellern angeboten werden.

Sensoranweisungen

Zur Kommunikation mit leistungsfähigen Sensorsystemen (z. B. Laserscanner oder Systeme zur Bildverarbeitung) werden Befehle zum Ein- und Ausschalten der Sensorschnittstelle benötigt. Während Sensorsteueranweisungen und Befehle zur Sensordatenanforderung, -übernahme und -verarbeitung bereits mit dem Sprachumfang der IRL abgedeckt werden können, sind Funktionen zur extern vorgegebenen Geschwindigkeitsführung und Bahnkorrektur nicht genormt.

Interruptbearbeitung

Bei Robotersteuerungen besteht, insbesondere in Verbindung mit Sensoren, häufig die Notwendigkeit, direkt auf plötzlich eintretende Ereignisse programmtechnisch zu reagieren. Bei abstandsmessenden Sensoren soll die Roboterbewegung z. B. bei Erreichen eines bestimmten Abstands gestoppt werden. Darüber hinaus muss der Sensor auf das Eintreten bestimmter Systemzustände unverzüglich reagieren (Fehlerbehandlung). Dazu kann ein Interrupt definiert werden, der bewirkt, dass im Falle des Eintretens eines Ereignisses oder einer Bedingung der Programmablauf sofort – auch während einer Bewegung – unterbrochen und eine entsprechende Interrupt-Prozedur gestartet wird. In dieser Prozedur kann der Programmierer auf das Ereignis reagieren, indem er z. B. die Bewegung des Roboters beendet, Fehlermeldungen ausgibt oder Maßnahmen zur Fehlerbeseitigung initiiert.

Bahnschaltfunktion / Analogausgabe

Mit einer Bahnschaltfunktion kann ein beliebiger Schaltbefehl, z. B. das Einschalten der Luftzufuhr zu einem Greifer, während einer Bewegung ausgeführt werden, wenn eine vorgegebene Bedingung bezüglich der Bewegung erfüllt ist (bestimmte Geschwindigkeit erreicht oder Abstand zum Zielpunkt unter- bzw. überschritten usw.). Diese Funktion dient vor allem der Optimierung eines Programmes in zeitlicher Hinsicht, da keine Unterbrechung der Bewegung zum Auslösen bestimmter Ereignisse mehr erforderlich ist.

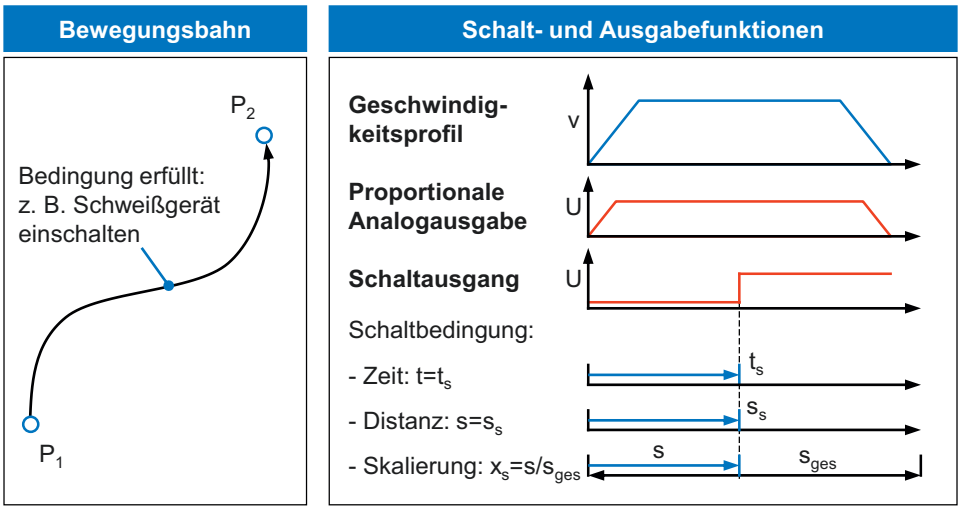


Bild 13.53 Bahnschaltfunktionen und geschwindigkeitsproportionale Analogausgabe

Des Weiteren wird in einigen Anwendungen von externen Systemen die Information über die aktuelle Bahngeschwindigkeit des TCP benötigt. Dies gilt z. B. für das Auftragen von Klebstoffen auf PKW-Scheiben, bei dem die Fördermenge des Klebstoffs entsprechend der Bahngeschwindigkeit geregelt werden muss.

Eine konstante Bahngeschwindigkeit des Roboters ist nicht immer möglich. Dies gilt insbesondere bei kleinen Radien, die eine deutlich reduzierte Geschwindigkeit erfordern können. Bild 13.53 veranschaulicht die Wirkungsweise von Bahnschaltfunktionen durch einen geschwindigkeitsproportionalen Spannungswert (Analogausgabe), der z. B. durch eine Schweißprozesssteuerung zur Parameterkorrektur verwendet werden kann.

Bahnschweißbefehle

Viele Steuerungen bieten inzwischen Möglichkeiten zur Ansteuerung von Schweißquellen für Bahnschweißanwendungen, da dies eine der häufigsten Applikationen von Industrierobotern darstellt. Die Schweißquelle benötigt in der

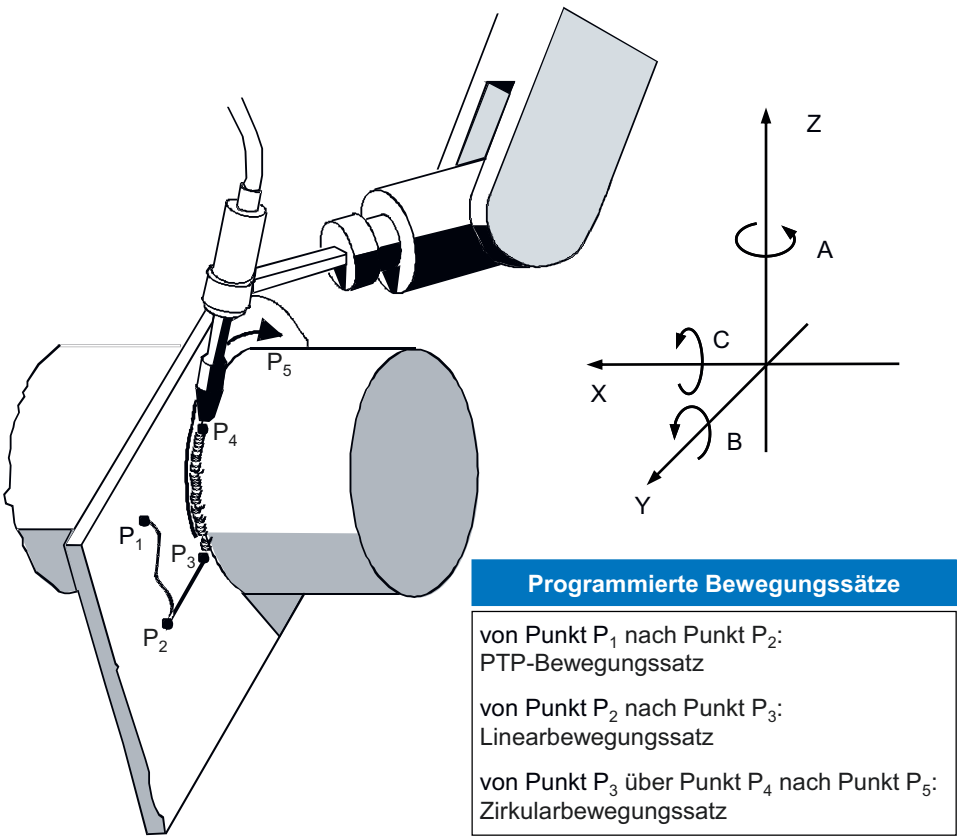
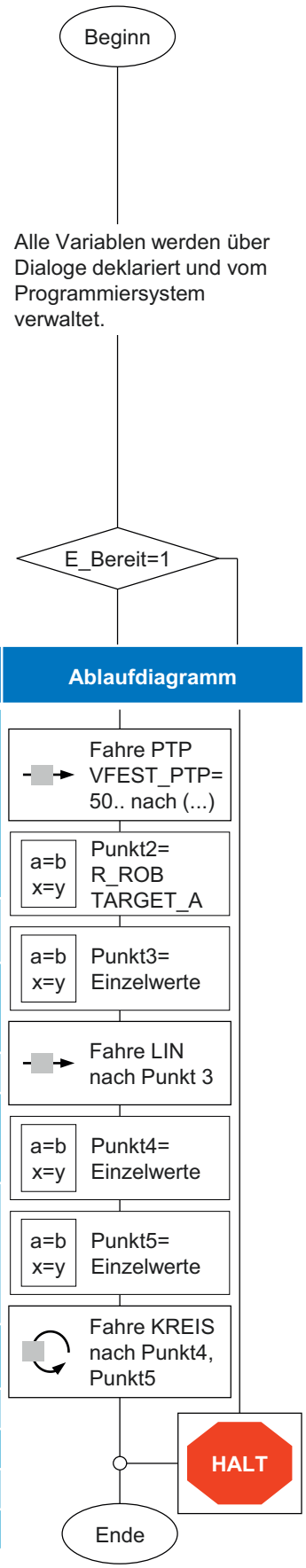


Bild 13.54 Programmierbeispiel für Roboterbewegungsanweisungen. Nach SIEMENS

Bild 13.55 Gegenüberstellung: Textuelle und grafische Programmierung

Programmanweisung	Erläuterung
Program Beispiel;	Definition des Programms
VAR	Beginn der Variablen-Deklaration
ROBTARGET: Punkt2, Punkt3; ROBTARGET: Punkt5	Punktvariablen definieren: der Datentyp ROBTARGET beinhaltet sowohl die Lage (Position und Orientierung) als auch die Achskonfiguration
POSITION: Punkt4;	Stützpunkt-Positions-Variable: Der Datentyp POSITION beinhaltet nur die Positionsdaten (3 Koordinaten) und keine Orientierungsdaten
BEGIN	Programmanfang
R_SPEED:=50;	Bahngeschwindigkeit
R_ACC:=40;	Bahnbeschleunigung
IF (E Bereit=1)	Abfrage des digitalen Eingangs, ob ein Werkstück eingelegt ist
THEN	Wenn ein Werkstück eingelegt ist, dann...
MOVE PTP POSE(POSITION(230.083,340.947,-800.358), ORIXYZ(35,-60,130));	Verfahrbewegung mit PTP-Interpolation: Da die Bewegungssätze bzw. deren Lagedaten in der Regel geteacht werden, muss dieser Befehl nur selten textuell eingegeben werden.
Punkt2:=R_ROBTARGET_ACT;	Aktuelle Position für Berechnungen von Punkt3 speichern
Punkt3:=Punkt2; Punkt3.PSE.POS.Y:= Punkt3.PSE.POS.Y-20;	Punkt3 berechnen mit y-Koordinate von Point2 - 20mm
MOVE LIN Punkt3;	Linearbewegung nach Punkt3
Punkt4:= POSITION(230.083, 315.0,-770.358);	Stützpunkt Koordinaten vorgeben
Punkt5:=ROBTARGET (POSE(POSITION(230.083,300,-750.358), ORIXYZ(85,-60.35)), 0,0,0,0);	Koordinaten von Punkt5 eingeben
MOVE CIRCLE Punkt4, Punkt5;	Kreisbewegung von Punkt3 über Punkt4 nach Punkt5
ELSE	Sonst
HALT;	Programm beenden
ENDIF;	Ende der IF-Anweisung
ENDPROGRAMM	Ende des Programms



Regel eine relativ große Anzahl von Schweißparametern (Spannung, Strom, Wartezeiten, Drahtvorschub, Parameter für Start und Ende der Naht usw.). Obwohl die Übergabe der Parameter z. B. in IRL prinzipiell möglich ist, ist im Sinne einer möglichst einfachen Programmierung des Schweißablaufs die Aufnahme entsprechender spezieller Technologieanweisungen hilfreich. Roboterhersteller bieten zur Erweiterung der Steuerungsfunktionen hierzu verschiedene Technologieoptionen als Erweiterung ihres Steuerungssystems an.

Parallele Prozesse

Viele Robotersteuerungen bieten heute die Möglichkeit, mehrere Programme oder Programmteile parallel, d. h. gleichzeitig, ablaufen zu lassen. Neben der Möglichkeit, zwei oder mehr völlig getrennte Roboter mit einer Steuerung zu steuern, erlaubt dieses Konzept zusätzliche Möglichkeiten zur Programmoptimierung im Sinne kürzerer Programmlaufzeiten. Da eine Steuerung durch eine Roboterbewegung selten voll ausgelastet ist, können parallel z. B. Berechnungen oder die Kommunikation mit Sensoren und Peripheriegeräten durchgeführt werden.

IRL-Programmierbeispiel

Bild 13.54 zeigt ein Programmierbeispiel aus der Schweißtechnik. Es werden die drei Bewegungsarten PTP, Linear- und Kreisinterpolation ohne Überschleifen benutzt. Die eingetragenen Koordinatenachsen beschreiben das raumfeste Roboterkoordinatensystem. Auf die Einbindung von Schweißbefehlen wurde im Beispiel verzichtet.

Das in Bild 13.55 gezeigte Roboterprogramm stellt einen Auszug aus einem Steuerungsprogramm für Industrieroboter dar. Entwickelt wurde das Anwenderprogramm in der Programmiersprache IRL. Zum direkten Vergleich ist in der Tabelle das gleiche Programm auch strukturbasiert dargestellt.

13.6 Kommunikationsschnittstellen für Robotersteuerungen

Heute am Markt befindliche Robotersteuerungen verfügen über Kommunikationsschnittstellen, die eine Datenverbindung mit Leit- oder Zellenrechnern, Sensoren und peripheren Komponenten wie Maschinen oder Zuführeinrichtungen ermöglichen. Der Funktionsumfang dieser Schnittstellen reicht vom Senden und Lesen digitaler Einzelsignale bis hin zum Austausch komplexer Datenstrukturen.

Die Kommunikationsschnittstelle eines Roboters stellt digitale Ein- bzw. Ausgangssignale dar. Anwendungsbeispiele hierfür zeigen sich in der Abfrage der Anwesenheit eines zu handhabenden Werkstücks oder im „Handshake" mit einer zu beschickenden Maschine, d. h. bei der gegenseitigen Abfrage der Programmfreigabe und Zykluseinleitung zwischen beiden interagierenden Maschinen.

Über die serielle Schnittstelle der Steuerung ist es in der Regel möglich, Programme und Parameter zu laden und zu speichern, Variablen und Fehlerzustände auszulesen und zu überwachen, sowie Programme anzuwählen und zu starten.

Für Robotersysteme, deren Kommunikation über den einfachen Austausch von Bitsignalen hinausgehen, sind heute leistungsfähige, international genormte Bussysteme verfügbar. Allgemein gebräuchliche Beispiele hierfür sind Interbus (IEC 61158), Profibus bzw. Profinet (IEC 61158/61784) und CAN-Bus (Controller Area Network, OSI/ISO 11898). Mit den genannten Bussystemen ist es möglich, mit geringem Verdrahtungsaufwand eine beliebige Anzahl von Komponenten mit hoher Datenrate an die Robotersteuerung anzukoppeln. Es existieren dazu verteilte Ein- und Ausgänge sowie Sensoren, die mittels Plug&Play mit Konfigurationsaufwand an das Bussystem angeschlossen werden können. Im Vergleich zur aufwendigen Verkabelung und Installation früherer Systeme bieten die genannten Feldbussysteme damit entscheidende Vorteile (vgl. auch ▶ Kap. 9.3).

Für den Programmtransfer, die Prozessüberwachung und -steuerung sowie für den Teleservice verfügen die meisten modernen Robotersteuerungen über ethernet-basierte Kommunikationsdienste. Dazu gehören TCP/IP-basierte Dienste sowie die Kommunikation über OPC (OLE for Process Control) [SCHW07]. Insgesamt ist damit eine Tendenz zur zunehmenden Abstraktion der Kommunikation zu verzeichnen.

Neuere Ansätze, wie z. B. das mxAutomation-Funktionspaket der Firma Kuka ermöglicht eine stärkere und damit einfachere Integration von Roboter- und Maschinensteuerung, sodass beispielsweise kooperative Abläufe bei der Maschinenbeschickung durch einen Industrieroboter zentral auf Maschinenseite durch den Bediener definiert werden können [KUKA15]. Darüber hinaus können einfache Bewegungen des Roboters an der Maschinentafel der Werkzeugmaschine eingegeben werden.

13.7 Sensordatengewinnung und -verarbeitung

Im Bereich der Handhabungs- und Automatisierungstechnik werden zunehmend Systeme verlangt, die sich flexibel an neue Anforderungen und Umgebungsbedingungen anpassen lassen. Hierfür werden Handhabungsautomaten eingesetzt, die in Verbindung mit Sensorsystemen betrieben werden. Mit Hilfe dieser Systeme können über geeignete Messumformer aktuelle Informationen der jeweiligen Umwelt aufgenommen werden, um so eine adaptive Anpassung an veränderte Umweltbedingungen zu ermöglichen [GECK11; KUHN09]. Neben der Steigerung der Flexibilität

kann damit auch eine Senkung der Kosten für Vorrichtungen erreicht werden, da die Zielpunkte der Roboterbewegung automatisch erfasst und korrigiert werden können.

Ein wichtiges Einsatzfeld von Sensoren ist die Qualitätssicherung. Nach der Bearbeitung kann schon während des Handhabungsprozesses auf der Basis von Sensorsignalen überprüft werden, ob beispielsweise Bohrungen vorhanden oder Toleranzen eingehalten worden sind.

In der Praxis eingesetzte Sensoren basieren auf unterschiedlichen Prinzipien. Häufig eingesetzt werden z. B.:

- einfache Abstandssensoren (taktil, induktiv, kapazitiv usw.),
- Lasermesssysteme (Triangulation, Laufzeitmessung, Schattenbildung, Lichtschnittverfahren usw.),
- 2D-Bildverarbeitungssysteme (Grauwert, Binärbild, Schweißbadbeobachtung, Moiré usw.),
- 3D-Bildverarbeitungssysteme (Stereo-Kamerasysteme, strukturiertes Licht usw.)
- allgemeine Messwerterfassung (Schweißstrom in Verbindung mit Pendelbewegung, Kraft-/Momentensensoren usw.).

Die im jeweiligen industriellen Umfeld gestellten Anforderungen sind dabei für den Einsatz des Sensortyps entscheidend. In Tab 13.3 sind einige wichtige praktische Aufgaben und die geeigneten Sensoren zusammengestellt.

Werden diese Sensoren in Verbindung mit Robotersystemen betrieben, so besteht die Möglichkeit, Einfluss auf programmierte Koordinaten bzw. hierdurch bestimmte Bahnen zu nehmen. Die zur Verfügung gestellten Informationen werden in der jeweils eingesetzten Robotersteuerung für die Generierung der aktuellen Positionswerte verarbeitet.

Je nach Anforderung kann der Eingriff durch Sensorsysteme in den Programmablauf bzw. die Steuerung auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Zur Werkstückvermessung oder Positionserkennung reicht in der Regel ein Eingriff in das Programm selbst aus, da keine Korrektur während der Roboterbewegung notwendig ist. Demgegenüber erfordern Systeme zur Online-Bahnkorrektur oder -verfolgung (z. B. beim Schweißen) eine schnelle Reaktion der Steuerung auf die kontinuierlichen Sensorsignale, sodass hier teilweise sogar der Eingriff in die Lageregelung der Steuerung notwendig wird.

Die Kommunikation des Sensorsystems mit der Steuerung des Roboters erfolgt je nach Aufbau der Geräte über digitale oder analoge Schnittstellen. Die Information bzw. die aktuellen Korrekturdaten, die das Sensorsystem zur Verfügung stellt, werden demnach durch definierte Telegramme, digitale Ein-/Ausgänge oder Strom-/Spannungswerte spezifiziert. Die Verarbeitung der Sensordaten erfolgt entweder durch ein externes System (in der Regel einen PC) oder innerhalb der Steuerung.

Moderne Robotersteuerungen bieten die Möglichkeit der Auswertung von beliebigen Sensorsignalen direkt in der Steuerung durch entsprechende Software-Sensorschnittstellen. Das jeweilige Anwenderprogramm legt dabei fest, an welcher Stelle im Programmablauf die Daten benötigt werden. In Bezug auf die vorhin getroffene Klassifikation der Schnittstellen kann dies die Abfrage eines Eingangs- bzw. das Setzen eines Ausgangsdatums, die Verarbeitung eines Telegramms durch Setzen von Variablenspeichern oder die Verarbeitung der Strom-/Spannungswerte als Stellgrößen für Servoverstärker u. Ä. bedeuten.

Tab. 13.3 Beispiele für Einsatzmöglichkeiten von Sensoren

Prozess/ Aufgabenbereich	Aufgabe	Sensortyp
Bahnschweißen, Punktschweißen	Nahtanfang und Nahtende suchen, Fugenverlauf verfolgen, Fugengeometrie ermitteln, Schweißergebnis dokumentieren	Induktiver/optischer Abstandssensor, taktiler Sensor, Schweißstromsensor, Lichtschnitt, Triangulation, Schweißbadbeobachtung
Gussputzen, Schleifen	Entgraten, Konturverlauf finden, Gratstärke ermitteln, Anpresskraft regeln	Taktiler Sensor, Kraft-/ Momentensensor, Motorstromsensor
Qualitätssicherung	Werkstückvermessung, Ermittlung von Toleranzabweichungen, Vollständigkeitskontrolle	Visuelle Sensoren mit Zeilen- und Matrixkameras, taktile Sensoren, Abstandssensoren
Montage, Handhabung, Maschinenbestückung	Greifen von Werkstücken, Drehlageerkennung, Montage toleranzbehafteter Teile, Aufnahme von Förderbändern, Greifkraftüberwachung	2D-/3D-Kamerasysteme, Abstandssensoren, Kraft-/ Momentensensoren (für Prozesskräfte), Laserscanner, Lichtschranken



Bild 13.56 Kameragestütztes Greifen von Schaltschrankelementen

Durch ihren geringen Preis und die universelle Einsetzbarkeit werden Bildverarbeitungssysteme inzwischen auch in der Handhabungstechnik immer häufiger eingesetzt. Für 2D-Anwendungen, insbesondere für Aufgaben wie die Bauteil- und Lageerkennung auf Förderbändern, Drehlageerkennung für KFZ-Felgen (Position der Radschrauben) stehen mittlerweile ausgereifte Systeme zur Verfügung.

Bild 13.56 zeigt den Einsatzfall des sensorgestützten Greifens von Schaltschrankelementen auf einem sich bewegenden Förderband durch einen Industrieroboter, der mit einer CCD-Kamera ausgerüstet ist. Basierend auf den Kamerasignalen wird das Schaltschrankelement zu Beginn des Greifprozesses identifiziert, um während des Prozesses eine kontinuierliche Lageerkennung durchzuführen. Auf Basis dieser kontinuierlichen Lageerkennung wird das Bauteil abschließend gegriffen. Diese Anwendung ist ein typisches Beispiel dafür, dass das aufwendige, geordnete Zuführen der zu handhabenden Teile durch den Einsatz eines Sensorsystems entfallen kann. Die Steuerung des Roboters erfolgt hier über ein externes Rechnersystem, welches im Interpolationstakt neue Positionsvorgaben an die Robotersteuerung schickt. Somit ist ein flexibler Greifvorgang möglich. Bei diesem Beispiel wird keine komplette Vermessung des Bauteils mit anschließender CAD-Modellerzeugung vorgenommen, sondern lediglich ein Vergleich zwischen dem Ist-Zustand und dem aus Trainingsdaten bekannten Soll-Zustand durchgeführt.

Neben der Qualitäts- und Montageprüfung werden Tiefenmesswerte häufig zur Bahnkorrektur von Industrierobotern eingesetzt. Die Hauptanwendungsfelder sind hier die flexible Handhabung von Bauteilen sowie Montagevorgänge an bewegten Baugruppen. Bei Ersterem geht es speziell um den Umgang mit Bauteilen, welche in einer unstrukturierten und zufälligen Lage angeliefert werden. Der sogenannte „Griff in die Kiste“ beschäftigt sich hier mit der Handhabung von Bauteilen, welche in Form von Schüttgut bereitgestellt werden. Hier besteht die Herausforderung, dass sowohl Position als auch Lage der Bauteile stark variieren und sensorbasiert erfasst werden müssen. Auf Basis der erfassten Bauteillage werden die Anfahrbewegung sowie die Greifkonfiguration bestimmt.

Im Bereich der robotergestützten Montage kommt heutzutage dem bewegten Zusammenfügen von Bauteilen eine steigende Bedeutung zu. Beim klassischen Ansatz erfolgt die Montage im Stillstand, sodass die Fügepositionen und Anfahrwege bekannt und bei aufeinanderfolgenden Abläufen konstant sind. Im Bereich der Fließbandfertigung (beispielsweise bei der Automobilfertigung) erfordert diese Art der Montage zusätzliche Aufwände hinsichtlich An- und Abkoppelstation von Baugruppen auf dem Fließband. Bei der bewegten Montage erfolgt die Montage parallel zur Fließbandbewegung, ohne diese anzuhalten.

Für die Anwendung von Sensoren zur Bahnkorrektur eines Industrieroboters ist eine unmittelbare Anpassung der Bewegungsbahn während des Prozesses notwendig. Um diese Bewegungsanpassung im dreidimensionalen Raum vorzunehmen, müssen ebenfalls dreidimensionale Sensormesswerte vorliegen. Im Allgemeinen reicht hier der Einsatz einer einzelnen Kamera aus. Der Rückschluss auf dreidimensionale Werte erfolgt auf Basis bekannter Features des betrachteten Bauteils (beispielsweise Länge von Kanten oder Radius von Bohrlöchern). Können keine Features ausgewertet werden, ist der Einsatz von Sensortechnik notwendig, welche ein explizites, dreidimensionales Abbild der betrachteten Umgebung generiert. Aktuelle Entwicklungen gehen in die Richtung der Generierung von RGBD-Messdaten. Diese Messdaten enthalten neben den Farbinformationen (RGB-Informationen) zusätzlich noch eine Entfernungsinformation (Depth). Solche Systeme erfordern oft mehrere Sensoren und Aktoren (mindestens zwei Kameras oder einer Kamera mit Streifenprojektion). Aufgrund der hohen Datenmenge,

welche durch Tiefensensorik generiert wird, erfolgen die Messdatenauswertung sowie die daraus resultierende Berechnung der Bewegungsanpassung des Industrieroboters auf einem zusätzlichen Rechnersystem. Speziell bei Roboterbewegungen mit hoher Geschwindigkeit müssen die zusätzlich durch Signalübertragung entstehenden Latenzzeiten für die Bestimmung der Korrekturbewegung berücksichtigt werden.

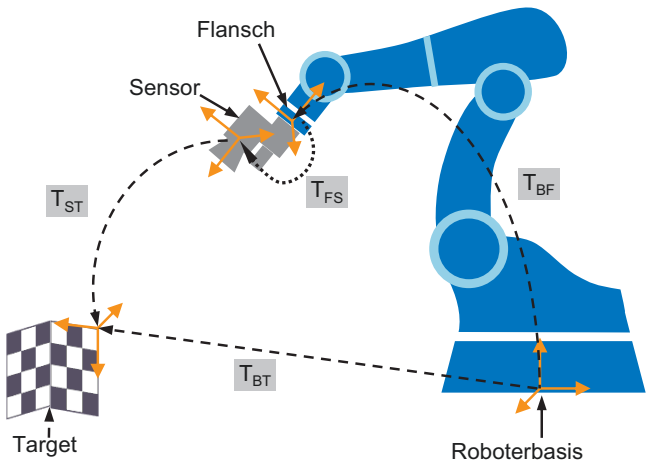
Unabhängig von dem verwendeten Sensorsystem muss für alle am Industrieroboter mitgeführten, optisch arbeitenden Sensoren eine sogenannte Hand-Auge-Kalibrierung durchgeführt werden. Ziel dieser Kalibrierung ist die Überführung der Sensormessdaten aus dem mitbewegten Sensor-Koordinatensystem in das ortsfeste Basis-Koordinatensystem des Industrieroboters. Dadurch wird es möglich, Positionsabweichungen, die durch das Sensorsystem detektiert werden, in roboterbezogene Koordinaten umzurechnen und diese durch den Roboter auszugleicheen ◘ Bild 13.57 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge und verwendeten Koordinatensysteme bei der Hand-Auge-Kalibrierung.

Die Hand-Auge-Kalibrierung T_{FS} gibt die konstante 3D-Transformationsmatrix vom Flanschkoordinatensystem in das Sensorkoordinatensystem an. Zur Ermittlung dieser Transformation wird ein Target verwendet, welches sowohl vom Sensor als auch über die Roboterkinematik eindeutig im Raum verortet werden kann.In ◘ Bild 13.57 ist ein Schachbrettmuster als Target gezeigt, welches für die Hand-Auge-Kalibrierung einer Farb- bzw. Graustufenkamera geeignet ist. Das verwendete Target muss an das Messprinzip des Sensors angepasst werden. Durch Antasten des Targets mit dem Industrieroboter kann die 3D-Tranformation T_{BT} von der Roboterbasis in das Tragetkoordinatensystem bestimmt werden. Die 3D-Tranformation T_{ST} vom Sensorkoordinatensystem in das Tragetkoordinatensystem wird aus den Sensordaten bestimmt. Zusätzlich ist die 3D-Transformation T_{BF} vom der Roboterbasis in das Flanschkoordinatensystem aus der Robotersteuerung bekannt. Über die geschlossene kinematische Kette aus Gleichung (13.55) kann die Hand-Auge-Kalibrierung T_{FS} berechnet werden.

$$T_{BF} \cdot T_{FS} \cdot T_{ST} = T_{BT}$$
$$\Leftrightarrow T_{FS} = T_{BF}^{-1} \cdot T_{BT} \cdot T_{ST}^{-1} \quad (13.55)$$

Um die Genauigkeit der Kalibrierung zu erhöhen und die Kalibrierung zu verifizieren, wird die Vermessung mit verschiedenen Roboter-Achsstellungen wiederholt. Im Allgemeinen muss die Hand-Auge-Kalibrierung sowohl für jeden einzelnen Sensor als auch bei erneuter Montage desselben Sensors wiederholt werden. Um diesen Aufwand zu reduzieren, werden die Adapter zwischen Sensor und Roboterflansch mit Fixierstiften ausgestattet, sodass bei erneuter Montage der Sensor nahezu an derselben Position montiert wird.

Auf Basis der Hand-Auge-Transformation können die Messwerte des mitgeführten Sensors zur Laufzeit in das ortsfeste Basiskoordinatensystem des Industrieroboters transformiert werden. Somit kann unmittelbar eine Reaktionsbewegung des Industrieroboters auf neue Sensorwerte bestimmt werden.



◘ **Bild 13.57** Hand-Auge-Kalibrierung für einen Industrieroboter

13.8 Greiftechnik in der Robotik

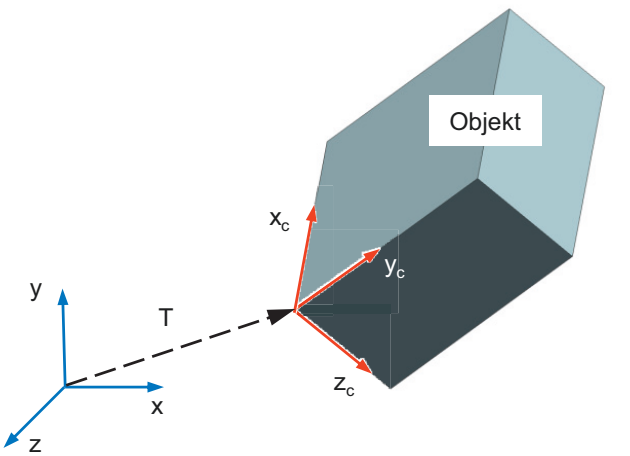
Industrielle Robotersysteme werden heute, neben Schweißaufgaben, hauptsächlich für Aufgaben der Materialhandhabung und Montage eingesetzt [GRUN09]. Derartige Prozesse erfordern einerseits hohe Genauigkeiten in der wiederholten Positionierung einzelner Roboterachsen, andererseits muss die durch den Roboter aufgeprägte Lagedefinition oder -veränderung sicher auf das jeweilige Objekt übertragen werden können [VDI90]. Dazu werden Bauteilpositionen relativ zu einem ortsfesten Bezugskoordinatensystem angegeben, das allgemein einen beliebigen Ursprung und eine beliebige Orientierung aufweist. Die Festlegung von Bezugskoordinatensystemen geschieht unter Berücksichtigung der umgebenden Fertigungseinrichtungen, um den resultierenden Programmieraufwand zu reduzieren. So ist beispielsweise bei der Bauteilpositionierung die Richtung der Oberflächennormalen von Ablageflächen hilfreich, um Bauteilannäherungen senkrecht zu den Ablageflächen ausführen zu können. Für eine Kette von Handhabungsschritten bieten Robotersteuerungen daher die Möglichkeit, mehrere Bezugskoordinatensysteme festzulegen und diese, an die Situation angepasst, auszuwählen. Steuerungsintern werden die jeweiligen Positionen in das globale Weltkoordinatensystem des Roboters transformiert, vgl. ► Kap. 13.3.

Neben Bezugskoordinaten existieren mit körpereigenen Koordinatensystemen weitere mathematische Beschrei-

bungsmittel, die den geometrischen Zustand von Objekten beschreiben. Sie werden oft an der Oberfläche von Handhabungsobjekten definiert und während des Prozesses mitbewegt. Durch die feste Verbindung zwischen dem Handhabungsobjekt und seinem spezifischen Körperkoordinatensystem kann die zu programmierende Roboterbewegung auf einzelne Transformationen zurückgeführt und abgespeichert werden, Bild 13.58.

Da Handhabungseinrichtungen, wie z. B. Robotersysteme, die Bauteillage und Orientierung mit jedem Prozessschritt mittelbar beeinflussen und undefinierte Veränderungen zu Abweichungen zwischen programmierter und tatsächlicher Bauteilposition führen, bestehen hohe Anforderungen an die jeweilige Vorrichtung, die die temporäre Verbindung zwischen Kinematik und Bauteil herstellt. Derartige Vorrichtungen werden, wegen ihrer oft einachsig ausgeführten, linearen Schließbewegung, als Greifsysteme bezeichnet. Ihre Bauform kann sich, je nach Handhabungsaufgabe, jedoch stark unterscheiden. Dabei treten sowohl technische (z. B. bei der Wahl des Greiferantriebssystems) als auch technologische Unterschiede auf. Eine typische Anordnung aus Industrieroboter und Greifsystem zeigt Bild 13.59.

Zusätzlich zum Einsatz in Verbindung mit Industrieroboter zur Objekthandhabung und -manipulation findet die Greiftechnik Anwendung in verschiedenen Bereichen der Fertigungstechnik. Bei automatisierten Anlagen ermöglicht sie Montage-, Bearbeitungs- oder Verpackungsprozesse. In flexiblen Fertigungssystemen werden Werkstückwendeoperationen durch kinematisierte Greifer ausgeführt. Neben



Legende		
	(x, y, z)	Bezugskoordinatensystem
	(x_c, y_c, z_c)	Objekt-Koordinatensystem
	T	Transformation

Bild 13.58 Beziehung von Koordinatensystemen bei Handhabungsaufgaben

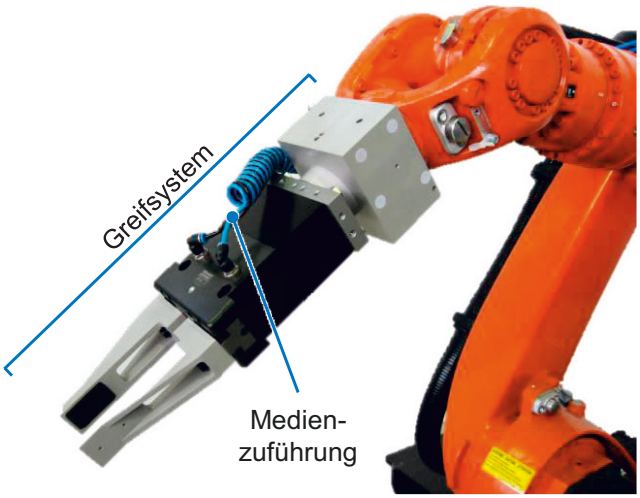


Bild 13.59 2-Backen-Parallelgreifer an einem Robotersystem

der direkten Interaktion mit dem jeweiligen Werkstück können Greifsysteme aber auch für Unterstützungsprozesse, wie z. B. Werkzeugwechsel in NC-Maschinen oder am Handhabungsgerät, eingesetzt werden [HESS04].

13.8.1 Prozessdefinitionen

Ein Greifsystem ist nach [VDI90] ein Subsystem eines Industrieroboters bzw. ein Teilsystem einer Handhabungseinrichtung [HESS04], welches einen temporären Kontakt zu einem Greifobjekt herstellt. Dabei erfüllt es *Hauptfunktionen* zum Vorbereiten und Herstellen des Kontaktes sowie Operationen zur Manipulation und Ablage des Objektes. Die Kontaktvorbereitung, durchgeführt vom Menschen oder einem automatischen Subsystem, umfasst dabei das Zurechtlegen von Teilen zur Erzielung einer bekannten, definierten Objektlage und Orientierung, damit es in reproduzierbarer Weise durch den Greifer aufgenommen werden kann. Unter Manipulation werden alle greiferinternen oder -externen Operationen zusammengefasst, welche die Ortsveränderung oder Montage von Objekten adressieren.

Sonderfunktionen von Greifsystemen sind Operationen, welche durch externe Sensorik und Informationsverarbeitung erfolgen, wie z. B. Anwesenheitskontrolle, Lageerkennung oder Kraft-, Momenten- oder Wegmessung. Auch das Bereitstellen von Montageteilen (z. B. Schraubenzuführung) oder die Bauteilreinigung wird zum Bereich der Sonderfunktionen gezählt [VDI95].

13.8.2 Greifprinzipien

Zur Herstellung des Kontaktes werden vier relevante Wirkmechanismen in der Greiftechnik unterschieden [HESS04]:

- mechanische Greifer,
- fluidisch wirksame Greifer,
- magnetische Greifer,
- adhäsive Greifer.

Die Einteilung in Wirkprinzipien gibt Aufschluss über die verwendete Technologie; die einzelnen Greiferlösungen der verschiedenen Prinzipien können sich technisch zum Teil stark unterscheiden. Sie werden anhand von Anforderungen, die den Handhabungs- bzw. Positionierungsprozess beschreiben, ausgelegt und ausgewählt. Grundsätzlich muss zunächst geprüft werden, ob das jeweilige Wirkprinzip auf das vorliegende Greifobjekt angewendet werden kann und eine sichere Verbindung zwischen Handhabungseinrichtung und Greifobjekt entsteht. Anschließend wird der Greifer anhand von Kriterien, wie z. B. der garantierten Greifkraft, der resultierenden Greifgenauigkeit, dem Gewicht, Öffnungs- und Schließzeiten (bei mechanischen Greifern) sowie den steuerungstechnischen Anschluss- und Regelungsmöglichkeiten, näher spezifiziert. Die Greifkraft kann weiter untergliedert werden in Haltekraft, d. h. die Kraft zur Fixierung des Greifobjektes am Handhabungsgerät, und die Greifkraft, d. h. die zur Erzeugung des Haltegriffes erforderliche Kraft, wobei die Greifkraft meist größer ist als die Haltekraft. Greifkräfte wirken, je nach Greifertyp, punktuell, linienartig oder flächig.

Die Planung von Greifprozessen erfolgt anhand von Greifstrategien. Jeder Strategie liegt eine allgemeine Struktur aus Anrücken, Greifen, Objektmanipulation, Loslassen und Abrücken zugrunde. Ein spezifizierter Greifvorgang beschreibt die Art und Lage der Griffpunkte relativ zum Greifobjekt. Dabei sind die Beschaffenheit des Greifobjektes und die Art seiner Zuführung zu berücksichtigen. Befindet sich das Greifobjekt z. B. auf einem Förderband, werden seine Griffpunkte synchron zum Förderband mitbewegt, sodass die absolute Griffpunktposition zeitlichen Randbedingungen unterliegt. Zudem muss geklärt werden, ob die Griffpunkte mit dem verfügbaren Handhabungsgerät erreicht werden können.

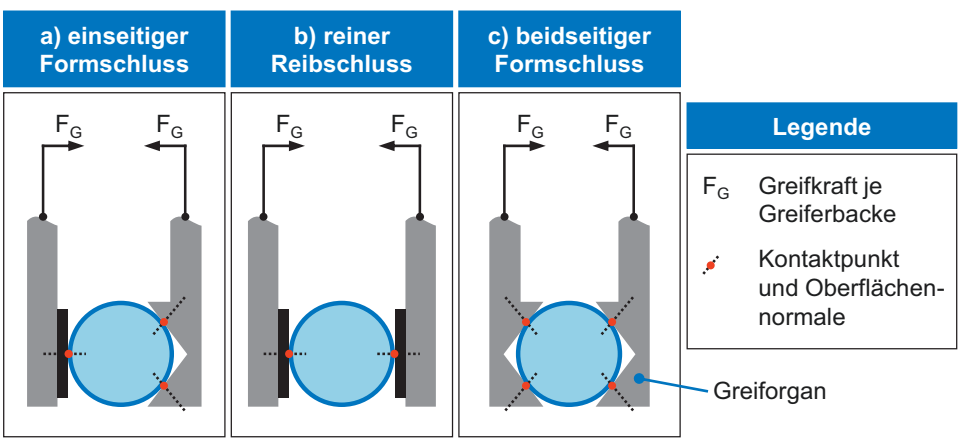
Bei Verfahrbewegungen des Handhabungsgeräts ist insbesondere auf Kollisionsfreiheit zu achten. Wird beispielsweise die Griffposition sensorgestützt während des Prozesses nachgeregelt, variiert die Bewegung des Handhabungsgeräts in nicht vorab bestimmter Weise. In derartigen Anwendungsfällen wird die ausgeführte Bewegung räumlich begrenzt, damit Kollisionen vermieden werden. Die Definition von Bewegungsgrenzen wird dabei auf der Steuerung des Handhabungsgeräts hinterlegt und bei der Generierung der Bewegung berücksichtigt. Da externe Werkzeuge wie z. B. Greifer der Steuerung zunächst unbekannt sind, müssen der Steuerung insbesondere Informationen über deren Abmessungen bekannt gemacht werden. Über die kinematische Kette des Handhabungsgeräts kann dann der durchdrungene Arbeitsraum bestimmt und die Kollisionsfreiheit überprüft werden.

13.8.3 Greifertypen

Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Greifern wird zum einen über das gewählte Wirkprinzip und zum anderen über die jeweilige Bauform des technischen Systems getroffen. Je nach Anwendung handelt es sich bei der Bauform des Greifers um eine speziell entwickelte Lösung, die nicht auf andere Anwendungsfälle übertragen werden kann. Hier soll daher lediglich auf standardisierte Greifertypen eingegangen werden, die insbesondere auch im Umfeld von Werkzeugmaschinen zu finden sind.

13.8.3.1 Mechanische Greifer

Die verbreitetsten Greifer für Robotersysteme sind mechanische Greifer. Sie halten das Greifobjekt unter Ausnutzung von Form- und Reibschluss bzw. eines stabilen Kraftgleichgewichtes, ◘ Bild 13.60. Das Gleichgewicht stellt sich ein, indem durch den Greifer Kräfte in das Greifobjekt eingeleitet werden. Für die Auslegung von mechanischen Greifern ist daher entscheidend, wie die Freiheitsgrade des Greifob-



◘ **Bild 13.60** Möglichkeiten der Greifkrafteinleitung

jektes beschränkt werden und ob die zur Fixierung notwendigen (Reib-)Kräfte erreicht werden können.

Im Fall eines zylindrischen Greifobjekts stellt der einseitige Formschluss das aus positioniermechanischer Sicht geeignetste der drei dargestellten Alternativen dar, Bild 13.60 a. Der dreifache Punktkontakt bewirkt eine radiale Zentrierung des Zylinders, sodass in dieser Ebene eine hohe Wiederholgenauigkeit bezüglich der Bauteillage erzielt werden kann. Dem gegenüber besitzt das Greifobjekt bei einem Parallelbackengreifer mit reinem Reibschluss prinzipiell einen Freiheitsgrad senkrecht zur Greifrichtung, Bild 13.60 b. Je nach Genauigkeit des Handhabungsgeräts bzw. seiner Programmierung können hier Relativbewegungen entlang der Reiboberflächen auftreten. Ebenso nachteilig wie eine statische Unterbestimmtheit kann auch eine redundante Bindung von Freiheitsgraden die Positioniergenauigkeit verschlechtern. Bei idealen, formschlüssigen Greifern, Bild 13.60 c, verteilen sich die Kontaktkräfte gleichmäßig auf alle Kontaktpunkte. Reale Greifer unterliegen jedoch stets Fertigungs- und Betriebstoleranzen, sodass die ideale, zentrierte Ausrichtung der Formelemente des Greifers relativ zum Greifobjekt nicht erreicht werden kann. Es besteht die Gefahr von Verkantungen und Tragseitenwechseln, wodurch allgemein die Positioniersicherheit des Kontaktes verringert wird.

Je nach Beschaffenheit des Greifobjekts und der Greifoberfläche kann trotz der prinzipbedingten Nachteile ein positioniertechnisch ungünstiges Verfahren notwendig sein, um die notwendigen Reibkräfte aufzubringen und den Greifprozess sicher ausführen zu können.

Neben dem angewendeten Prozessprinzip müssen weitere Parameter festgelegt werden, um einen sicheren Greifprozess zu definieren. Dazu zählt insbesondere auch der Ort, an dem die aufgeprägte Kraft des mechanischen Greifers wirksam wird. Dieser Ort wird maßgeblich durch die Eigenschaften des zu greifenden Objekts, wie z. B. Form, Steifigkeit, Oberflächenbeschaffenheit oder Masse und Massenschwerpunkt, bestimmt. Zusätzlich müssen die Umgebung und der Zustand der Produktzuführung berücksichtigt werden. Wenn Greifobjekte starre, geschlossene Körper darstellen, wird bei der Handhabung häufig ein Außengriff angewendet, Bild 13.61 a. Die Greifbacken werden für das Fixieren von außen geschlossen. Eine Anwendung ist jedoch nur möglich, wenn sich der Greifer dem Greifobjekt in geöffnetem Zustand nähern kann, ohne eine Kollision mit Umgebungsobjekten zu verursachen. Stehen mehrere Greifobjekte dicht gepackt auf einer Transportpalette, können offene Bauteile durch den Innengriff aufgenommen werden, Bild 13.61 b. Der Zwischengriff, Bild 13.61 c, bietet sich insbesondere bei schlechter Zugänglichkeit und großen Bauteilabmessungen an.

Mechanische Greifer werden auf unterschiedliche Weise angetrieben. Das Antriebsprinzip kann bei der Spezifikation grundsätzlich frei gewählt werden, hängt jedoch meist vom verfügbaren Energieträger ab. Wichtige Energieträger sind hier elektrische Energie und Druckluft. Die aufgenommene Energie wird durch den Antrieb des Greifers in eine Linearbewegung umgesetzt. Je nach Antriebskonzept beinhaltet dies die Transformation einer Rotationsbewegung beispielsweise über einen Kugelgewindetrieb oder eine Keilhakenkinematik in die gewünschte Linearbewegung.

Damit es bei einem Ausfall des Antriebssystems nicht zum unkontrollierten Verlust des Greifobjektes kommt, verfügen Greifer häufig über Greifkraftsicherungen. Diese halten die zur Fixierung notwendige Kraft auch dann aufrecht, wenn z. B. die Energiezufuhr ausfällt. In seiner einfachsten Form besteht eine Greifkraftsicherung aus einer Rückstellfeder, die in Richtung der Greifkraftaufbringung gespannt ist und zusätzlich zum Greiferantrieb auf das Greifobjekt wirkt, Bild 13.62 a. Zum Öffnen des Greifers muss der Antrieb der Federkraft entgegenwirken, sodass allgemein die maximale Kraft der Greifkraftsicherung geringer sein muss als die des Antriebssystems. Pneumatische Greifer können alternativ auch durch wechselseitig ver-

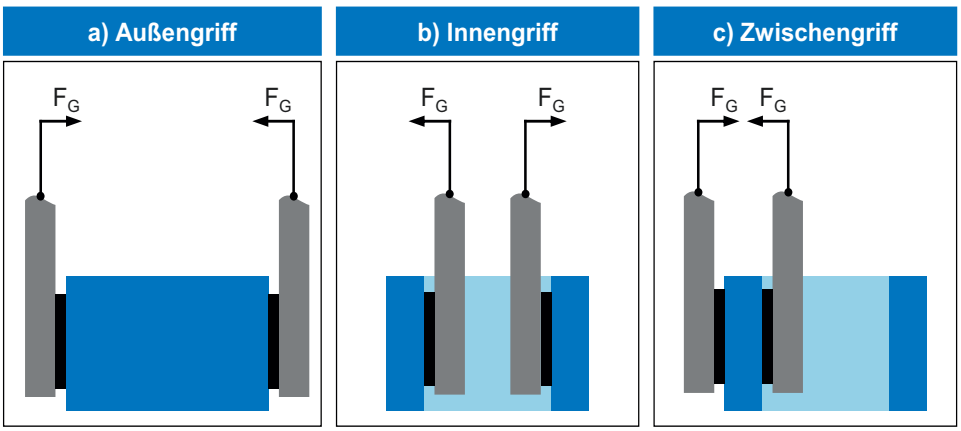


Bild 13.61 Griffvarianten bei mechanischen Greifern

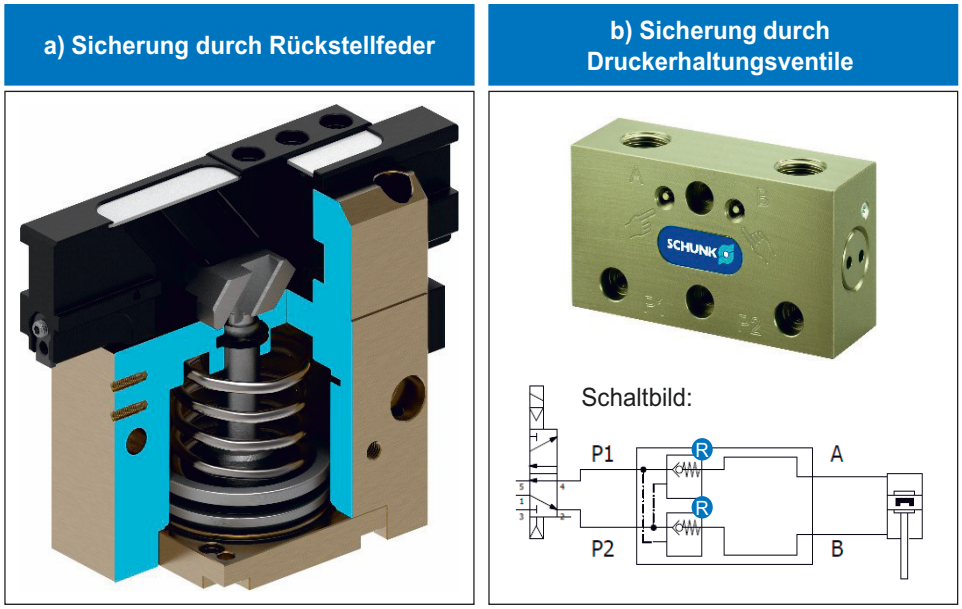


Bild 13.62 Greifkraftsicherungen für mechanische Greifer. Nach Schunk GmbH & Co. KG

schaltete Rückschlagventile gegen eine unkontrolliert abfallende Greifkraft gesichert werden, Bild 13.62 b. Das zugehörige Schaltbild der pneumatischen Greifkraftsicherung verdeutlicht, dass ein Ausströmen von Druckluft bzw. der Abbau des jeweiligen Kavitätsdruckes nur bei gleichzeitigem Anlegen eines gegenläufigen Druckpotentials möglich ist. Ist dies nicht der Fall, wird ein Bewegen der Greifbacken verhindert und der Greifer verharrt in seiner aktuellen Stellung.

Grundsysteme mechanischer Greifer können heute für Handhabungseinrichtungen mit definierten Eigenschaften zugekauft werden. Die Greiforgane, d. h. die Greifbacken, müssen jedoch meist an das jeweilige Bauteil bzw. Produkt angepasst werden. Anhand der Greiforgane ist eine weitere Unterscheidung mechanischer Greifer möglich.

Parallelbackengreifer

Parallelbackengreifer sind die am häufigsten verwendeten Greifer industrieller Robotersysteme. Sie verfügen über zwei parallel angeordnete Greifbacken, die während des Greifprozesses aufeinander zu- oder voneinander wegbewegt werden. Öffnen und Schließen erfolgen meist symmetrisch, sodass beide Greifbacken aktiv an der Bewegung beteiligt sind. Dies wird erreicht, indem die durch den Antrieb erzeugte Kraft durch ein Getriebe (Kinematik) geteilt und in die einzelnen Greiffinger geleitet wird. Die Keilhakenkinematik, Bild 13.63 ist ein Beispiel für ein derartiges Getriebe. Es zeichnet sich durch hohe erzeugbare Greifkräfte aus, die beidseitig, d. h. beim Öffnen und Schließen übertragen werden können.

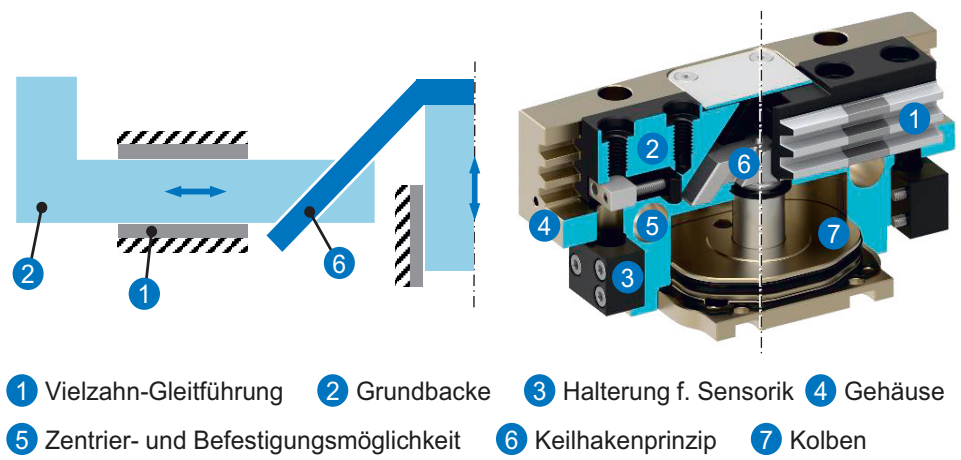


Bild 13.63 Keilhakenkinematik für mechanische Parallelbackengreifer. Nach Schunk GmbH& Co. KG

Winkelgreifer

Bei Winkelgreifern wird die Linearbewegung des Antriebs in eine rotatorische Greifbewegung transformiert. Dies geschieht durch eine geeignete Kinematik und ermöglicht so die Schwenkbewegung der Greifbacken (vgl. Bild 13.64). Wie Parallelbackengreifer sind auch Winkelgreifer für den Innen- und Außengriff geeignet. Durch Zu- und Wegschwenken können Greifobjekte aufgenommen bzw. abgelegt werden, ohne dass eine zusätzliche Hubbewegung durch das Handhabungsgerät erforderlich ist. So kann eine Kollision während der Bewegung des Handhabungsgeräts vermieden werden. Einzelne Winkelgreifer können insbesondere bei zylindrischen Bauteilen über einen großen Bereich von Bauteilabmessungen eingesetzt werden, da ihre Backenstellung über einen großen Winkelbereich gesteuert werden kann.



1 Grundbacke 2 Gehäuse
3 Antrieb 4 Hebelgetriebe

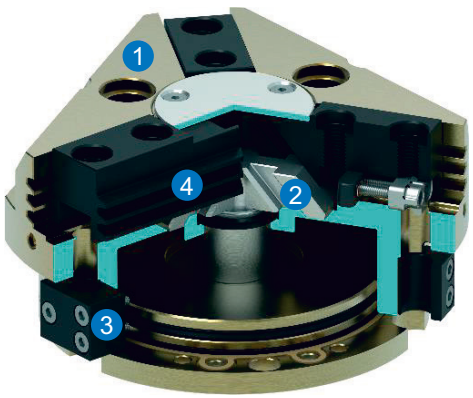
Bild 13.64 2-Finger-Winkelgreifer. Nach Schunk GmbH & Co. KG

Dreifingerzentrischgreifer

Dreifingerzentrischgreifer verfügen über ein dreigeteiltes Greiforgan. Durch eine geeignete Kinematik (z. B. Keilhakenkinematik, (Bild 13.65) werden auch hier alle Greiffinger zeitgleich bewegt und legen während des Schließvorgangs den gleichen Weg zurück. Dabei wird das Greifobjekt so lange mitbewegt, bis seine Bewegung durch die übrigen Greiffinger behindert und so zentriert wird. Die zentrierende Wirkung wird insbesondere bei Fügeprozessen zylindrischer Bauteile ausgenutzt, die hohe Anforderungen an eine definierte Bauteillage sowie an die aufbringbare Greifkraft stellen.

Greifhand

Da Greifer technische Systeme darstellen, die speziell für die jeweilige Greifaufgabe ausgelegt bzw. ausgewählt werden müssen, ist davon insbesondere die Gestaltung der Greiforgane und die Festlegung des Hubs je Greiffinger betroffen. Treten Veränderungen des dem Greifer zugeordneten Greifobjekts auf, muss die Phase der Greiferauslegung häufig erneut durchlaufen werden. Können vorhandene Greifsysteme durch Umgestalten der Greifbacken nicht an die neue Aufgabe angepasst werden, müssen sie vollständig ersetzt werden. Bei einem vielfältigen Produktprogramm und gerin-



1 Gehäuse
2 Keilhakenkinematik
3 Sensorik
4 Grundbacke



Bild 13.65 Dreifingerzentrischgreifer. Nach Schunk GmbH & Co. KG

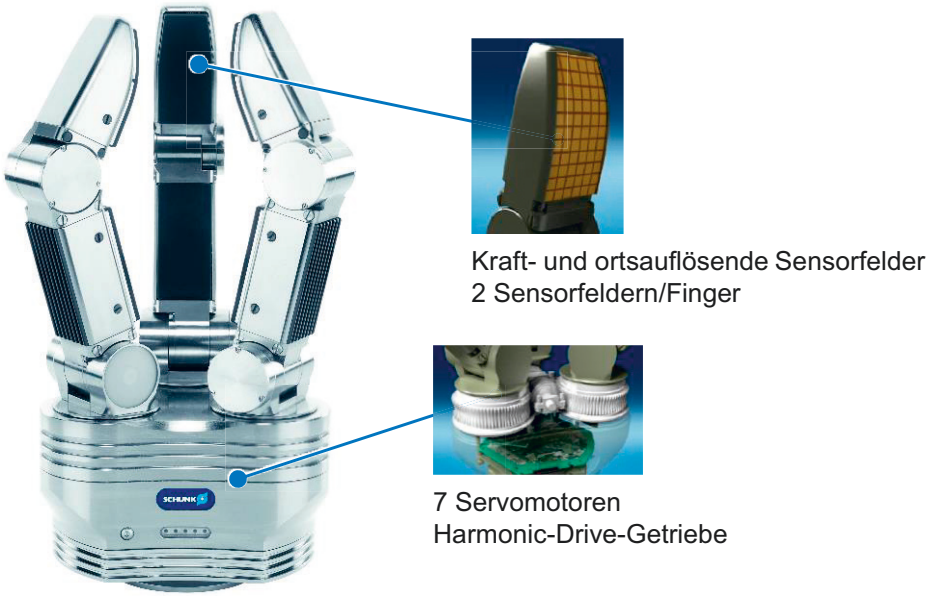


Bild 13.66 Dreifinger-Greifhand. Nach Schunk GmbH & Co. KG

gen Stückzahlen ergibt sich hieraus schnell der Wunsch nach einem universellen Greifsystem, das sich flexibel an die jeweilige Greifsituation anpassen lässt.

In Anlehnung an natürliche Vorbilder sind verschiedene bionische Greifsysteme entwickelt worden, die das Ziel verfolgen, die adaptiven Fähigkeiten evolutionär entstandener Greifmechanismen mit technischen Mitteln nachzubilden [WILS11]. Im Kern konzentrieren sich diese Nachbildungen auf die Entwicklung von *Greifhänden* mit unterschiedlicher Anzahl an Fingern und Gelenken pro Finger. Ihre Stellung kann unabhängig voneinander an die Oberflächenkontur des zu greifenden Objektes angepasst werden und ermöglicht so die gesteigerte Flexibilität bezüglich Formveränderungen.

Die in Bild 13.66 dargestellte technische Umsetzung der Greifhand verfügt über drei Finger mit je zwei rotatorischen Achsen. Zudem lassen sich zwei der drei Finger symmetrisch zueinander auf einer siebten Achse drehen, um ihre gegenseitige Orientierung und damit die Wirkrichtung der Schließkraft zu beeinflussen.

Auf den Innenseiten der Finger sind jeweils zwei Sensorfelder angebracht, um ein Flächenprofil der zwischen Greifer und Greifobjekt herrschenden Kräfte bestimmen zu können. Informationen über Ort und Betrag der entstehenden Greifkräfte können während des Betriebs zur adaptiven Regelung der einzelnen Gelenkstellungen eingesetzt werden. Im Idealfall genügt es daher, der Greifhand eine grobe Schließbewegung der Greiffinger vorzugeben und die einzelnen Gelenkstellungen, entsprechend der resultierenden Oberflächenkräfte, nachzustellen.

Neben der resultierenden Flexibilitätssteigerung erfüllt die Greifhand durch seine Gestalt und Sensorik auch Anforderungen für eine intuitive Interaktion zwischen Mensch und Handhabungsgerät. Dieser Vorteil ist vor allem in der Service-Robotik von großer Bedeutung, da hier die Interaktion mit ungeschulten Bedienern im Vordergrund steht. Technische Systeme müssen dabei zu reaktivem Handeln befähigt werden, um die notwendige Sicherheit gewährleisten zu können. Wegen des hohen steuerungstechnischen Aufwands zur Integration und Programmierung und nicht zuletzt wegen ihrer hohen Anschaffungskosten werden Greifhände jedoch kaum im operativen Betrieb automatisierter Handhabungseinrichtungen im Fertigungsumfeld eingesetzt.

13.8.3.2 Pneumatische Greifer

Unter pneumatischen Greifern werden Endeffektoren von Handhabungsgeräten zusammengefasst, die den Kontakt zum Greifobjekt mittels Druckunterschied herstellen, die jedoch nicht über ein Getriebe bzw. eine Kinematik zur Kraftwandlung verfügen [HESS04]. Weiterhin wird eine Unterscheidung in Überdruckgreifer und Unterdruckgreifer anhand der auf das Greifobjekt einwirkenden Haltekräfte getroffen. Handelt es sich dabei um Druckkräfte, d. h. Kräfte, die in Richtung des Greifobjektes zeigen, zählen diese Greifsysteme zur Gruppe der Überdruckgreifer. Greifkräfte, die vom Greifobjekt weg in Richtung des Greifers zeigen, werden durch eine gezielte Druckabsenkung erzeugt. Umgangssprachlich wird dieses Prinzip auch als Unterdruck bezeichnet, wovon sich die Bezeichnung der Gruppe der Unterdruckgreifer ableitet.

Überdruckgreifer

Den physikalisch einfachsten Aufbau eines Überdruckgreifers stellen Luftstrahlgreifer dar, Bild 13.67 Sie verfügen über eine oder mehrere Öffnungen, durch die Druckluft im geschalteten Zustand austreten kann. Über Düsen wird die

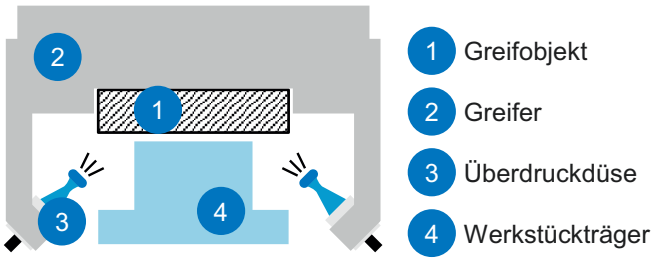


Bild 13.67 Schematisches Wirkprinzip eines Luftstrahlgreifers nach [HESS04]

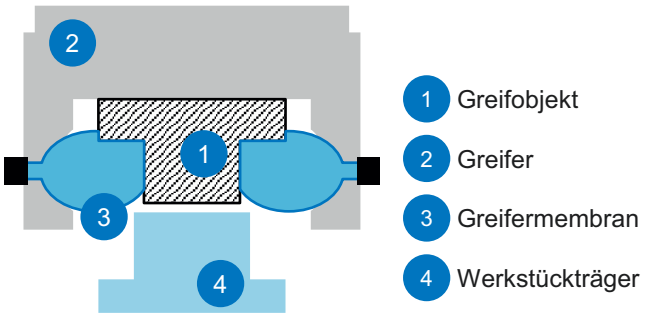


Bild 13.68 Wirkprinzip eines Membrangreifers nach [HESS04]

Form des austretenden Luftstroms so beeinflusst, dass sich ein definierter Luftstrahl ausbildet. Wird der Strahl auf die Unterseite eines zu greifenden Werkstücks gerichtet, kann dieses aufgrund des resultierenden Staudrucks angehoben und – unterstützt durch eine Gleitführung – gegriffen werden. Das Freigeben des Werkstücks erfolgt durch Schließen der Greiferventile.

Neben dieser offenen Form existieren auch Varianten von Überdruckgreifern, bei denen die Druckluft in geschlossene Kavitäten geleitet wird, die sich unter Einwirkung der inneren Druckerhöhung verformen können. Ziel der Formänderung ist es, Greifobjekte temporär festklemmen und Bewegungskräfte aufbringen zu können. Bei Absenkung des Kavitätsdruckes nimmt der Greifer seine ursprüngliche Form wieder an, um das Greifobjekt freigeben zu können. Bei den verformbaren Kavitäten handelt es sich daher meist um dünne Membranen, die sich in Greifrichtung ungehindert verformen und an die Gestalt des Greifobjekts anpassen können. Derart ausgeführte Greifer werden als Membrangreifer bezeichnet (vgl. Bild 13.68).

Überdruckgreifer zeichnen sich durch ihr vergleichsweise unempfindliches Verhalten gegenüber Form- und Lageveränderungen der Greifobjekte aus, da sie die Greifbewegung über keine starre Kinematik ausführen. Der gerichtete Luftdruckstrom ist in der Lage, sich der jeweiligen Beschaffenheit der Werkstücke anzupassen. Da zur Greifkraftaufbringung kein direkter Kontakt (Luftstrahlgreifer) bzw. nur über die relativ weiche Oberfläche der flexiblen Membran (Membrangreifer) erforderlich ist, werden Beschädigungen durch Prozessfehler wie das Verkanten mit starren Greiferbacken vermieden.

Unterdruckgreifer

Pneumatische Unterdruckgreifer nutzen den Druckunterschied zwischen Umgebungsdruck p_a und einer mit niedrigerem Druck p_u versorgten Greiferöffnung aus, um Bauteile durch Ansaugen mit dem Greifer zu verbinden, Bild 13.69. Dabei werden die zur Handhabung erforderlichen Greifkräfte flächig über ein flexibles Dichtelement auf das Greifobjekt übertragen. Aus dem Produkt der Wirkfläche und dem vorherrschenden Druckunterschied kann die Saugkraft ermittelt werden, die die Verbindung zwischen Greifer und Greifobjekt herstellt.

Zentral zu lösende Aufgabe beim Einsatz von Sauggreifern ist die Bereitstellung des erforderlichen Vakuums, das den Druckunterschied zum Umgebungsdruck erzeugt. Dies geschieht im Umfeld industrieller Handhabungstechnik hauptsächlich durch drei relevante Technologien:

- Vakuumpumpen,
- Ejektoren (nach dem Prinzip der Venturi-Düse) und
- Vakuumgebläse.

Vakuumpumpen und Vakuumgebläse nutzen meist elektrische Energie, um ein abgeschlossenes Volumen zu evakuieren oder einen Volumenstrom mit abgesenktem Innendruck zu erzeugen. Dabei wird elektrische Energie dazu verwendet, um ihre Pumpen- bzw. Rotorkinematik anzutreiben.

Demgegenüber nutzen Ejektoren einen anliegenden Überdruckluftstrom, der durch Umformung bzw. durch gezielte Querschnittsverengung zur lokalen Druckabsenkung geeignet ist. Dieses nach dem Prinzip der Venturi-Düse arbeitende Verfahren lässt sich über die Kontinuitätsgleichung

$$\dot{V}_1 = A_1 v_1 = A_2 v_2 = \dot{V}_2 \tag{13.56}$$

die besagt, dass ein Volumenstrom im stationären Zustand konstant ist, d. h. die in ein Kontrollvolumen einströmende und ausströmende Fluidmenge den gleichen Betrag aufweist und die vereinfachte Form der Bernoulli-Gleichung

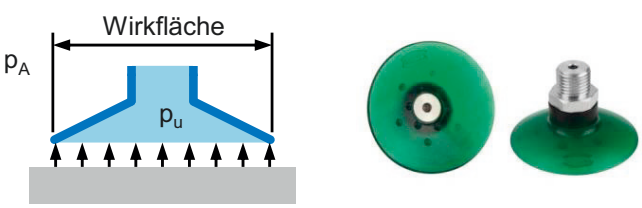


Bild 13.69 Wirkprinzip von Sauggreifern. Nach Schmalz

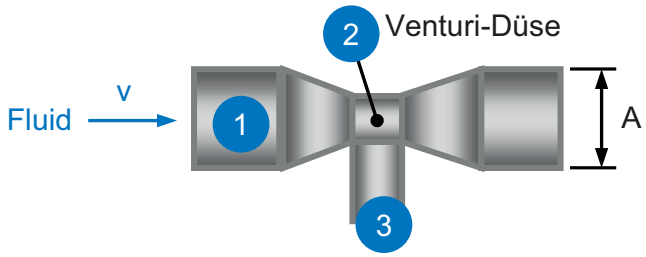


Bild 13.70 Aufbau einer Venturi-Düse

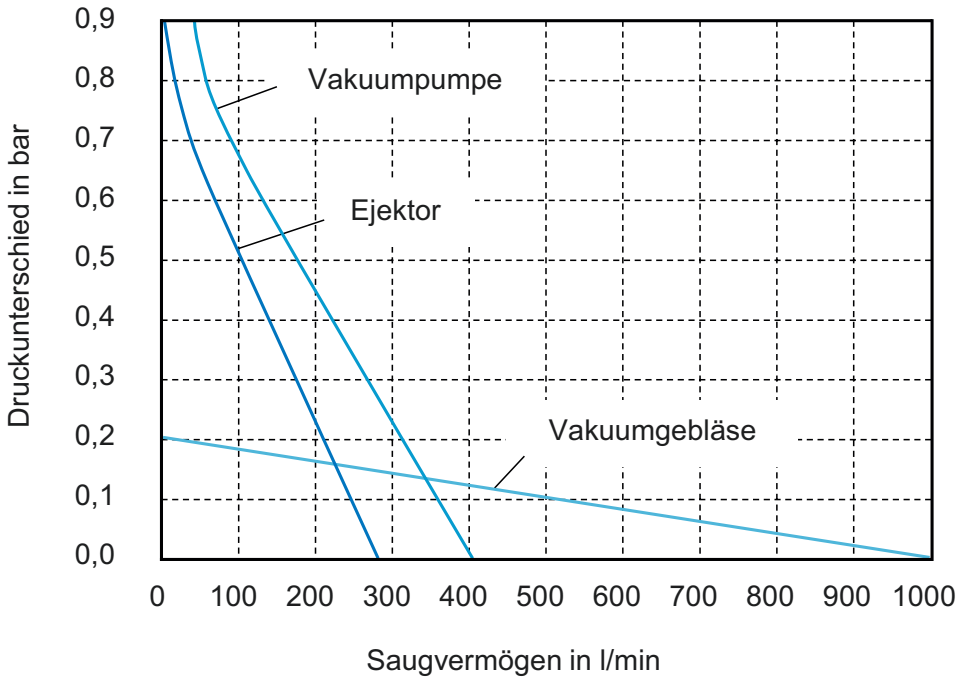


Bild 13.71 Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Vakuumerzeugung. Nach [HESS04]

$$p_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2 = konst. \qquad (13.57)$$

mathematisch beschreiben. Gemäß Bild 13.70 und Gleichung (13.56) steigt die Durchflussgeschwindigkeit eines einströmenden Fluids von Punkt 1 zu Punkt 2 mit sinkendem Querschnitt um den Faktor A_1/A_2 an. Durch Einsetzen der Geschwindigkeiten v_1 und v_2 in Gleichung (13.57) wird deutlich, dass der geschwindigkeitsabhängige Anteil in Punkt 2 mit steigendem v_2 ebenfalls zunimmt. Die Bedingung der Bernoulli-Gleichung (13.57) kann folglich nur dann erfüllt werden, wenn der statische Druckanteil p_2 um den gleichen Betrag gegenüber p_1 abnimmt, um den der dynamische Anteil $\frac{1}{2}\rho v^2$ ansteigt. Wird schließlich Punkt 2 mit einer weiteren Öffnung in Punkt 3 verbunden, kann der resultierende geringere Druck p_2 nach außen geführt und zur Vakuumerzeugung genutzt werden.

Der einfache und robuste Aufbau der Venturi-Düse und der Umstand, dass Druckluft heute meist schon durch die Gebäudeinfrastruktur verfügbar ist, machen Ejektoren zu einer attraktiven Alternative zur Vakuumerzeugung für Sauggreifer. Es werden im Gegensatz zu Vakuumpumpen und -gebläsen keine weiteren Aggregate benötigt. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen können sie direkt am Endeffektor des Handhabungsgeräts angebracht werden, wodurch Verluste durch Leckage vermieden werden. Zudem sinken durch die verkürzte Strecke das zu evakuierende Volumen und damit die Zykluszeit des Greifvorgangs.

Die verschiedenen Technologien zur temporäreren Druckabsenkung für Sauggreifer unterscheiden sich in ihrer Leistungsfähigkeit bezogen auf das absolut erreichbare Vakuum und die Luftmenge, die sie in einer bestimmten Zeit zur Aufrechterhaltung des Vakuums aufnehmen können. Letzteres ist insbesondere für das Ansaugen luftdurchlässiger Greifobjekte, wie z. B. Textilien, von Bedeutung. In diesem Fall können Ejektoren und Vakuumpumpen ungeeignet sein, wenn sie das zum Greifen nötige Saugvermögen nicht aufbringen können, Bild 13.71. Auf der anderen Seite scheiden Vakuumgebläse oft dann aus, wenn die verfügbare Greiffläche und ihr vergleichsweise geringes erzeugbares Vakuum nicht ausreichen, um das Greifobjekt sicher zu fixieren.

13.8.3.3 Sonderformen

Die bisher beschriebenen Greifertypen decken das Repertoire an Standardkomponenten der Greiftechnik und damit

die größte Menge der eingesetzten Greifsysteme ab. Daneben existiert jedoch eine Vielzahl verschiedener, oft anwendungsspezifischer Greiftechniken. Ihr Wirkprinzip und die Gestalt der jeweiligen Greifer hängen stark von der Beschaffenheit des Greifobjekts ab und können oft nur mit großem Aufwand auf andere Produktgruppen adaptiert werden.

Magnetgreifer

Mit Magnetgreifern ist es möglich, ferromagnetische Bauteile mithilfe von magnetischen Kräften am Endeffektor eines Handhabungsgeräts zu fixieren. Damit das Greifobjekt sicher gegriffen und mit definierter Position wieder abgelegt werden kann, muss es über eine ebene und glatte Oberfläche verfügen, über die die entstehenden Greifkräfte zurück in den Greifer geleitet werden können, ◘ Bild 13.72. Die Magnetkräfte werden durch Elektromagnete oder Dauermagnete erzeugt, wobei Dauermagnete den Vorteil bieten, dass sie ihre Greifkraft nicht plötzlich, z. B. bei Stromausfall verlieren. Dieser Umstand führt jedoch auch dazu, dass Dauermagnete stets eine Vorrichtung zum Lösen der gegriffenen Bauteile benötigen, die der Haltekraft der Dauermagnete entgegenwirkt. Beim Lösen der Greifverbindung wirken auf das Greifobjekt schließlich mehrere Kraftvektoren, die in Betrag und Richtung nicht eindeutig zu definieren sind und sich je nach Abstand zwischen Greifobjekt und Magnet verändern. Dadurch kann die Ablageposition des Werkstücks, je nach Ausprägung des Kraftgleichgewichts, über einen weiten Bereich streuen und das Verfahren für eine hochgenaue Positionierung nicht eingesetzt werden.

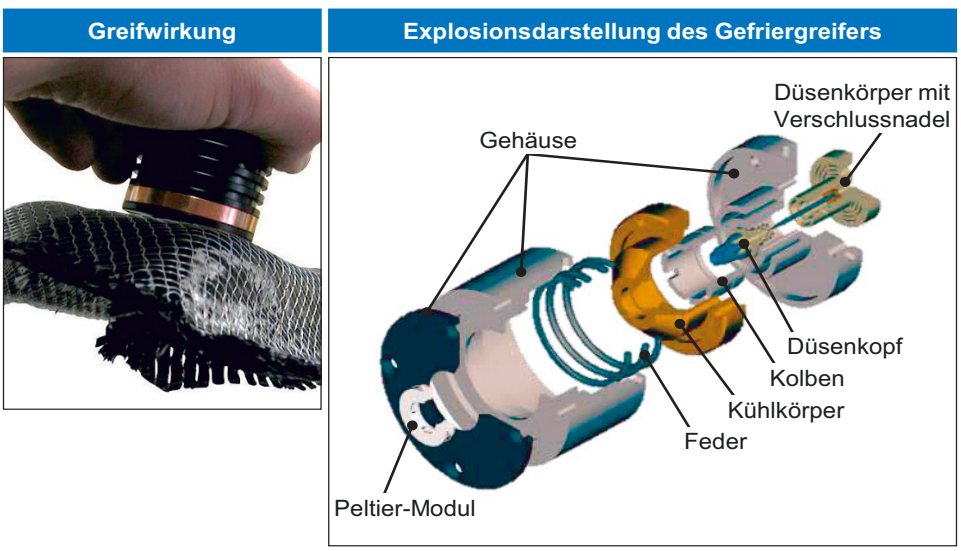
Die Verwendung von Elektromagneten bietet den Vorteil, dass auf eine Vorrichtung zum Lösen des Greifkontakts verzichtet werden kann. Jedoch bieten sie keine implizite Greifkraftsicherung, die ihrerseits wiederum die Entwicklung entsprechender Vorrichtungen notwendig macht. In der Praxis wird daher häufig eine Kombination aus Dauer- und Elektromagneten eingesetzt. Bei diesen Lösungen wird die Haltekraft durch den Dauermagneten aufgebracht. Das Lösen des Greifkontakts kann durch entgegengesetzt ausgerichtete Elektromagnete erfolgen. Derartige Greifer bieten den Vorteil, dass sie keine beweglichen Teile am Greifer benötigen und dadurch weniger fehler- bzw. wartungsanfällig sind. Ihr hohes Gewicht und die schlechte Positionier- und Wiederholgenauigkeit schränken ihre Verwendung jedoch stark ein. Zudem kann es zu unerwünschtem Auftreten von Restmagnetismus seitens der Greifobjekte kommen.



◘ **Bild 13.72** Magnetgreifer. Nach Schmalz

Gefriergreifer

Gefriergreifer stellen eine adhäsive Verbindung zwischen Greifer- und Werkstückoberfläche her. Die Verbindung entsteht, indem flüssiges Wasser in den Spalt der Kontaktzone eingebracht und seitens des Greifers abgekühlt wird, bis sich der Aggregatzustand des Wassers zu Eis verändert hat, ◘ Bild 13.73. So wird das Greifobjekt an den Greifer gebunden, bis das Wasser gezielt wieder verflüssigt wird oder die Adhäsionskräfte der Verbindung überschritten werden. Die realisierbaren Anbindungskräfte können sich je nach Be-



◘ **Bild 13.73** Gefriergreifer. Nach [JENS02]

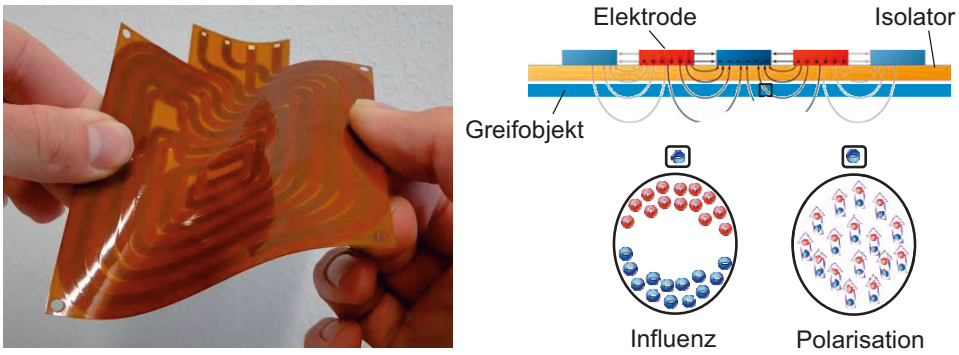


Bild 13.74 Elektrostatik-Greifer

netzbarkeit der Kontaktflächen sowie in Abhängigkeit vom verwendeten Wirkmedium verändern.

Damit ein Gefriergreifer die Adhäsionskräfte des Wirkmediums erzeugen kann, benötigt er ein Kühlaggregat. Wegen ihrer einfachen Bauform werden hier häufig Peltier-Elemente eingesetzt. Sie bestehen aus einer alternierenden Kette parallel-geschalteter Halbleiterverbindungen, die bei Stromfluss thermisch wirksam werden und eine Seite des Peltier-Elements abkühlen, während sich die andere erwärmt. Durch Umpolung kann der Effekt umgekehrt werden, um beispielsweise das Freigeben der Greifobjekte zu beschleunigen. Trotz dieser möglichen Prozessbeschleunigung führen Trägheiten der Halbleiter-Elemente und die Dauer des notwendigen Aggregatzustandswechsels des Wirkmediums zu relativ langen Prozesszeiten. Auch die Tatsache, dass das Greifobjekt in Kontakt mit einem zusätzlichen Medium gebracht wird, schränkt die Anwendbarkeit des Greifprinzips ein.

Elektrostatik-Greifer

Die automatisierte Handhabung biegeschlaffer textiler Halbzeuge stellt eine der größten Herausforderungen für die großserientaugliche und kosteneffiziente Fertigung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen dar. Zur Manipulation von luftdurchlässigen textilen Halbzeugen werden elektrostatische Greifmechanismen eingesetzt, die auf einer Verschiebung von Ladungsschwerpunkten basieren. Dabei wird eine Greifelektrode mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen beaufschlagt und bildet hierdurch ein elektrisches Feld aus. Das Greifobjekt wird bei Annäherung der Greifelektrode durch Ladungsschwerpunktverschiebung polarisiert und entsprechend des Coloumb'schen Gesetzes an die Greiferelektrode angezogen. Hierbei wirken quasiflächige Anziehungskräfte zwischen Greifer und Halbzeug. Für elektrisch leitende Materialien, wie Kohlenstofffasern oder Metalle, ergibt sich die Ladungsschwerpunktverschiebung aufgrund der elektrostatischen Influenz. Für nichtleitende Materialien, wie Glasfasern, Papier oder Kunststofffolien, wird die Ladungsschwerpunktverschiebung durch Polarisation bzw. die Ausrichtung vorhandener Dipole erzeugt, Bild 13.74 rechts.

Das E-Statik-Greifprinzip wird seit Jahrzehnten in verschiedensten Bereichen verwendet (z. B. in der Mikromontage und bei der Halbleiter-Handhabung). Für ein prozesssicheres automatisiertes Handhaben von technischen Textilien ist nicht das Greifen, sondern das definierte und prozessstabile Loslassen des Greifgutes ohne zusätzliche Wirkmechanismen (Druckluft, Auswerfer) als größte Herausforderung zu sehen. Eine schädigungsfreie Ablösestrategie basiert auf der Erzeugung eines abnehmenden Wechselfeldes. Hierfür wird die Spannung an den Elektroden wiederholt umgepolt und schrittweise reduziert.

Eine weitere Innovation stellt die Verwendung einer flexiblen Elektrode dar, Bild 13.74 links. Dadurch ist eine faltenfreie Adaption an einfach gekrümmte Ablagegeometrien möglich.

13.8.4 Greifsysteme

Die unterschiedlichen beschriebenen Greifprinzipien und Konzepte bilden einen großen Bereich der heute eingesetzten Greifertechnologien ab. An der Schnittstelle zwischen Greifer und Handhabungsgerät existieren darüber hinaus noch weitere Vorrichtungstypen, die Handhabungs- und Montageprozesse unterstützen können. Die Kombination der einzelnen, an das Handhabungsgerät angebrachten Vorrichtungen und Greifer werden auch als Greifsysteme bezeichnet. Sie umfassen neben der mechanisch wirksamen Aktorik und Führungselementen Steuerungseinrichtungen, die den Informationsfluss des Greifprozesses kontrollieren.

Am Beispiel eines mechanischen Greifsystems können im Folgenden die verschiedenen Systembestandteile beschrieben werden, Bild 13.75.

Verbindungstechnik und Medienführung

Handhabungsgeräte wie z. B. industrielle Robotersysteme stellen im Allgemeinen eine Versorgung mit Arbeitsmedien wie Druckluft und elektrischer Energie bereit. Dies kann zum einen in Form von angeflanschten Steuerungs- und Ventilinseln realisiert werden, von denen aus im Bedarfsfall zusätzliche Verbindungsleitungen zum Endeffektor des

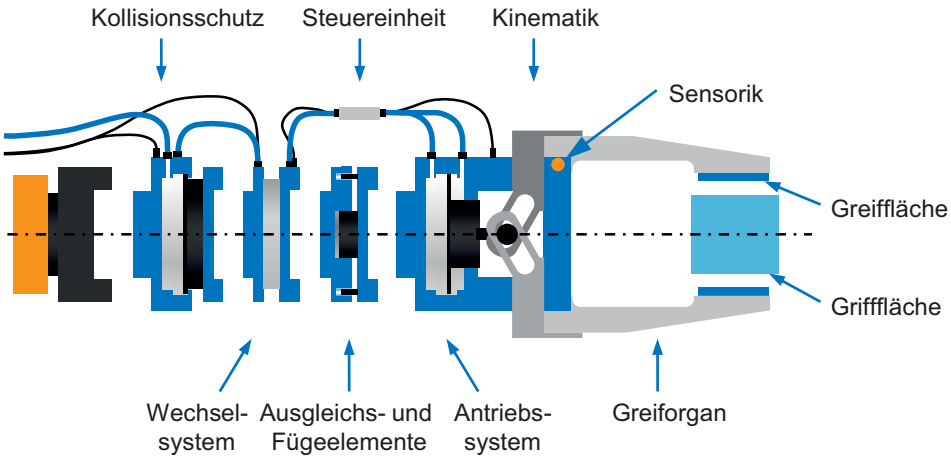


Bild 13.75 Prinzipieller Aufbau eines mechanischen Greifsystems

Handhabungsgeräts gelegt werden können. Zum anderen werden insbesondere bei kleineren, schnell taktenden Robotersystemen Ventile und Steuerungsgeräte im Inneren des Roboters untergebracht, um den Verschleiß und die Kollisionsgefahr mit Umgebungsobjekten zu minimieren, Bild 13.76.

Wechselvorrichtungen

Bei Greifern für automatisierte Handhabungseinrichtungen handelt es sich meist um produktspezifisch ausgelegte Vorrichtungen. Produktwechsel oder sich verändernde Produkteigenschaften können daher häufig nicht durch einen einzelnen Greifer aufgefangen werden. Damit dennoch eine hohe Variantenvielfalt mit einem Handhabungsgerät abgedeckt werden kann, muss das Handhabungsgerät dazu befähigt werden, seine Greiftechnik zur Laufzeit auswechseln zu können. Zweiteilige Wechselsysteme werden daher jeweils an das Handhabungsgerät und an den Greifer angebracht, um deren Verbindung gesteuert herstellen bzw. aufheben zu können, Bild 13.77.

Neben der mechanischen Verbindung stellen Wechselvorrichtungen auch eine Schnittstelle für verschiedene Arbeitsmedien bzw. Signalen bereit. Die einzelnen Durchführungen können bei der Inbetriebnahmephase des Greifersystems beliebig belegt werden. Bei der Wiederverwendung der einzelnen Module muss jedoch darauf geachtet werden, dass die jeweilige Durchführung mit dem vorhandenen Steuerungscode übereinstimmt. So treten häufig Fehlfunktionen nach erfolgtem Greiferwechsel auf, wenn Greifer über kompatible Wechselsysteme auf verschiedenen Handhabungsgeräten eingewechselt werden.

Fügemechanismen

Ein weiteres Modul für montagegerechte Handhabungseinrichtungen bilden Fügemechanismen. Sie dienen der Prozessunterstützung, indem gegenseitige Positionierfehler von Fügepartnern ausgeglichen werden können. Fügemechanismen verfügen über Freiheitsgrade, entlang derer die Ausgleichsbewegungen kraftlos ausführbar sind. Über pneumatische Aktoren können die relativ zueinander verschieb- bzw. verdrehbaren Teile fixiert werden, um eine Verriegelung des Fügemechanismus durchzuführen, Bild 13.78.

Verriegelungen sind hilfreich, da sie Schwingungen der Vorrichtung verhindern und so eine Verkürzung der

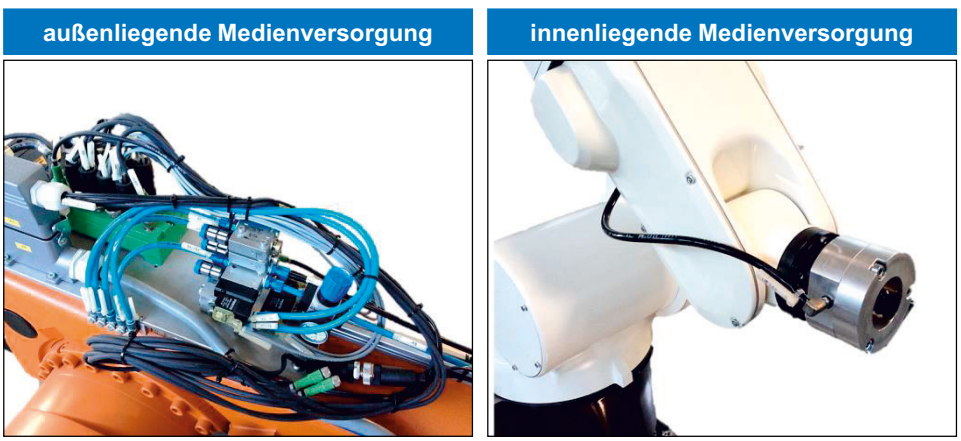


Bild 13.76 Vergleich außen- und innenliegender Medienversorgung

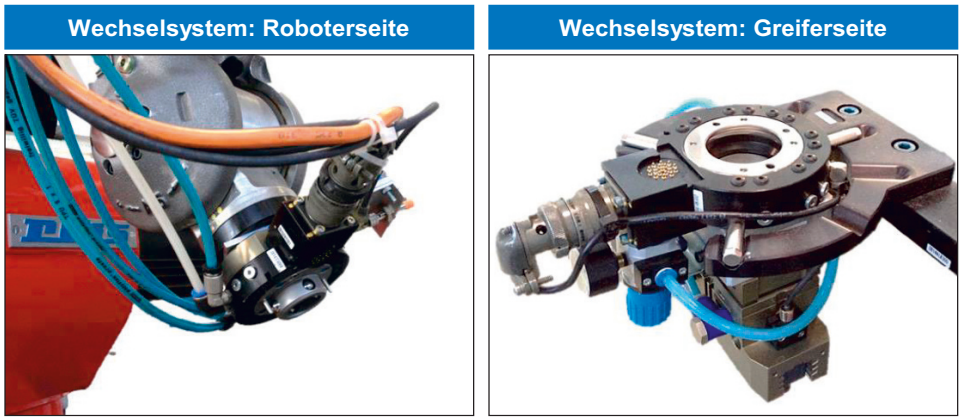


Bild 13.77 Greiferwechselvorrichtung mit Signal- und Mediendurchführung

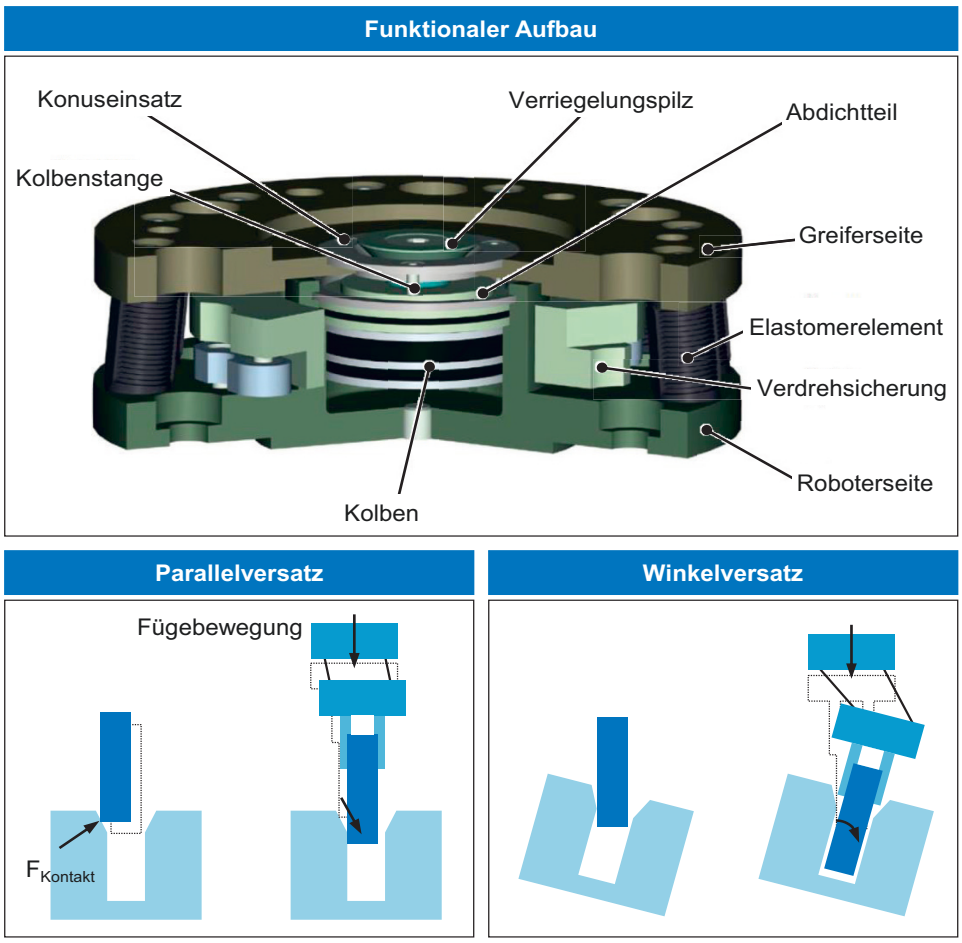


Bild 13.78 Funktionsprinzip Fügemechanismus. Nach IPR – Intelligente Peripherien für Roboter

Prozesszeiten ermöglichen. Zentrierend wirkende Verriegelungen stabilisieren den Fügeprozess zusätzlich, indem sie Greifer- und Maschinenseite in eine definierte relative Anordnung versetzen. So werden zurückbleibende Fehlorientierungen der elastischen Komponenten und damit schwankende Ausgangssituationen des Prozesses vermieden. Ein weiterer Vorteil von verriegelbaren Fügemechanismen ist, dass ihre elastische Verformbarkeit gezielt abgeschaltet werden kann und sich die Handhabungseinrichtung – bei begrenzten Belastungen – wie ein System aus starren Einzelkomponenten verhält. Dies erhöht die Wiederholgenauigkeit und vergrößert so den möglichen Einsatzbereich des Systems, ohne dass ein zusätzliches Rüsten erforderlich wird.

Kollisionsschutz und Sicherheit

Zu den schwerwiegendsten Folgen fehlerhafter Handhabungsprozesse zählen Kollisionen des Greifers mit seiner

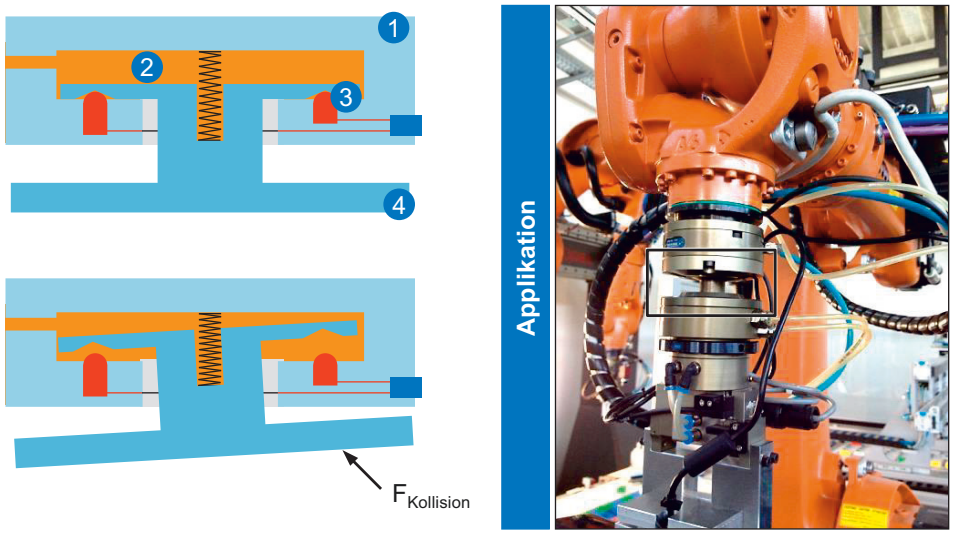


Bild 13.79 Funktionsprinzip Kollisionsschutz

Umgebung. Tritt eine Kollision auf, führt dies oft zu Beschädigungen des Greifers und der betroffenen Oberfläche des Kollisionsobjektes. In schweren Fällen können sogar Schäden an der Roboterkinematik zurückbleiben. Um mögliche Kollisionen zu vermeiden, werden Roboterprogramme vor ihrem Einsatz simulativ oder mit verringerter Verfahrgeschwindigkeit an der realen Anlage getestet. Veränderungen des Arbeitsraumes oder häufiges Umpositionieren können jedoch zu unvorhersehbaren Relativbewegungen führen. Bei derart unsicheren Handhabungsaufgaben werden häufig Schutzsysteme verwendet, die die schädigenden Auswirkungen von Kollisionen abschwächen.

Ein Kollisionsschutz gemäß Bild 13.79 ist Bestandteil der kinematischen Kette des Handhabungssystems. Wird die Kontaktplatte von Druckluft gegen das Gehäuse der Vorrichtung gepresst, kann der Kollisionsschutz die Arbeitskräfte des Greifers in das Handhabungsgerät ableiten.

Der Antrieb reicht dabei aus, um ein Abheben der Kontaktplatte im normalen Betrieb zu verhindern. Im Kollisionsfall überschreiten die aufgenommenen Kräfte jedoch den Bereich der Arbeitskräfte, sodass sich die Kontaktplatte vom roboterseitigen Gehäuseteil entfernt und eine Sensorik auslöst. Der Signalverlauf der Sensorik wird schließlich dazu verwandt, das Handhabungsgerät stillzulegen und Schäden zu verhindern.

Greifersteuerungen und Sensorik

Die Antriebe eines Greifers werden, je nach verwendetem Energieträger, über unterschiedliche Stellmöglichkeiten gesteuert. Pneumatische Greiferantriebe benötigen dazu Ventile, die häufig in Form von Ventilinseln in der Nähe des Einsatzortes angebracht werden, um Druckluftverluste zu minimieren. Die einzelnen Ventile sind über die Ausgänge der internen Robotersteuerung oder einer externen SPS schaltbar.

Elektrisch angetriebene Greifer verfügen häufig über eigene Greifersteuerungen und eine Vielzahl alternativer Hard- und Softwareschnittstellen zur Signalübertragung. Die Schnittstellen dienen sowohl der Einstellung verschiedener Parameter der Steuerung als auch der Feldintegration zur Betätigung der Greiferantriebe.

Greifprozesse werden zunehmend durch Sensorik überwacht und Messwerte zurück in den Steuerungsprozess überführt. Dies erlaubt es, Handhabungsoperationen toleranter gegenüber Fehlpositionierungen auszuführen, indem das Rückführen der Messdaten kontinuierlich erfolgt und so eine Regelungsstruktur entsteht. Die Sensorik besteht häufig aus optischen Kamerasystemen, da diese einen ausgedehnten Arbeitsbereich abdecken können. Zudem können sie schon vor dem Prozess zur Objektidentifikation und initialen Lagebestimmung eingesetzt werden. Beispiele für optisch geregelte Greifprozesse sind der „Griff in die Kiste“ oder hochtaktende Pick&Place-Operationen an Förderanlagen ohne definierte Bauteilorientierung.

13.9 Entwicklungstendenzen

Die Leistungsfähigkeit moderner Robotersteuerungen im Hinblick auf die Anzahl der zu steuernden Achsen, die Geschwindigkeit und den Interpolationstakt (< 10 ms) sowie den Funktionsumfang der Programmiersprachen hat heute einen Stand angenommen, der für die meisten industriellen Anwendungen bei Weitem ausreicht.

Neue Herausforderungen zeigen sich für den Bereich der Integration eines Robotersystems in übergeordnete sowie untergeordnete Steuerungsstrukturen. Mehr denn je bestehen die Anforderungen an eine Robotersteuerung darin, mit einem Leitsystem zu kommunizieren oder periphere Komponenten wie Sensoren oder Maschinen zu koordinieren.

Hieraus ergibt sich die generelle Anforderung der Offenheit einer Robotersteuerung. Damit ist auf der einen Seite die Erweiterbarkeit der Hardware durch standardisierte Einsteckkarten, z. B. für Bus- oder Sensorsysteme, gemeint. Auf der anderen Seite sollte über definierte Software-Schnittstellen auch der Funktionsumfang der Steuerung, z. B. zur Integration von Sensordaten, vom Anwender modifiziert werden können.

Ein großes Potenzial zur Umsetzung dieser Konzepte liegt in der Anwendung der heutigen PC-Technologie, die neben der erforderlichen Rechnerkapazität bereits einen hohen Grad an Offenheit und Netzwerkfähigkeit bietet. Die Anwendung von Standardsoftware, z. B. für das Betriebssystem oder zur Entwicklung der Benutzungsoberfläche, stellt die Basis für softwareseitige, benutzerdefinierte Anpassungen dar und ist heute im industriellen Umfeld verbreitet [BISC09].

Der Trend zu offenen, flexiblen Steuerungsstrukturen eröffnet gerade im Hinblick auf die Benutzungsschnittstellen von Robotern neue Entwicklungsperspektiven. Diese sind bisher sehr einfach gehalten und unterstützen den Anwender bei der Programmierung und Bedienung nicht in dem Maße, wie es mittlerweile möglich wäre. Hier sind umfangreiche Entwicklungen erforderlich, um effiziente, benutzerfreundliche und applikationsspezifische Programmieroberflächen und -hilfsmittel zu schaffen, die auch einen Einsatz von Robotern bei Aufgaben für kleine Serien ermöglichen [BISC09]. Generell stellt die Entwicklung von Systemen für kleinere Losgrößen nicht zuletzt aufgrund der Sättigung des Industrierobotereinsatzes in den klassischen Großserienanwendungen eine der Hauptaufgaben der Zukunft dar [ARMB06].

Im Bereich der Automatisierung der Fertigung von kleinen Losgrößen spielt die schnelle Inbetriebnahme von Robotersystemen eine wichtige Rolle. Sind hier die Aufwände für die Inbetriebnahme höher als die einer manuellen Fertigung, kann ein Robotersystem nicht gewinnbringend eingesetzt werden. Daher sind Systeme, welche eine aufwandsarme und intuitive Roboterprogrammierung gewährleisten, aktuell Gegenstand der Forschung.

Speziell in dem Bereich der schnellen und intuitiven Inbetriebnahme von Robotersystemen bietet der Ansatz des „Programmierens durch Vormachen“ einen vielversprechenden Ausgangspunkt. Solche Systeme basieren auf der Idee, dass der Bediener dem Roboter die zu erfüllende Aufgabe demonstriert und daraus automatisch der Programmcode generiert wird.

Bild 13.80 zeigt ein Robotersystem, das durch Demonstration programmiert wird [GÖBE12]. Hierzu ist der Roboter mit einem Messsystem ausgerüstet, welches in der Lage ist, die Position eines Zeigegeräts in sechs Freiheitsgraden zu vermessen.

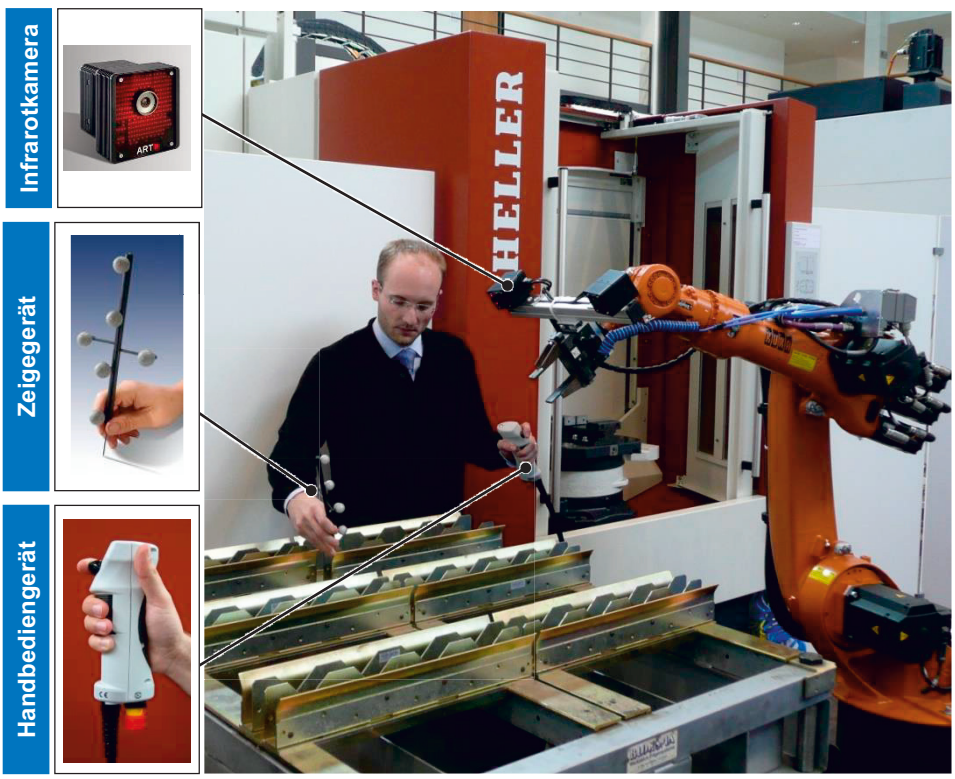


Bild 13.80 Roboterprogrammierung durch Demonstration

Bewegt der Bediener das Zeigegerät, folgt der Roboter automatisch und kontinuierlich der Bewegung, sodass das Zeigergerät zu jedem Zeitpunkt optimal im Blickfeld der Kamera-Sensorik liegt. Durch Transformation der Position des Zeigegerätes in das Basis-Koordinatensystem des Roboters kann das Zeigegerät für die Programmierung des Roboters verwendet werden. Dabei werden verschiedene, für die zu programmierende Roboterbewegung wichtige Stützpunkte vom Bediener gezeigt und abgespeichert. Aus diesen Stützpunkten wird abschließend das Roboterprogramm zusammengesetzt. Zusätzlich kann das zu fertigende Bauteil selbst mit einem Marker ausgestattet werden. Wird nun der Produktionsablauf mit dem markierten Bauteil demonstriert, kann direkt die demonstrierte Bewegungsbahn in ein Roboterprogramm übersetzt werden.

Weitere Ansätze bietet die Applizierung von Kraft-Momenten-Sensorik am Flansch des Industrieroboters [MEYE07]. Bei diesen Systemen wird der Industrieroboter unmittelbar durch manuelles Aufbringen von Kräften geführt. Die Demonstration der Aufgabe erfolgt hier meist bei gegriffenem Bauteil, wobei das Gewicht des Bauteils durch den Industrieroboter kompensiert wird. Hier ergibt sich der Vorteil, dass diese Systeme auch bei schweren, unhandlichen Bauteilen eingesetzt werden können.

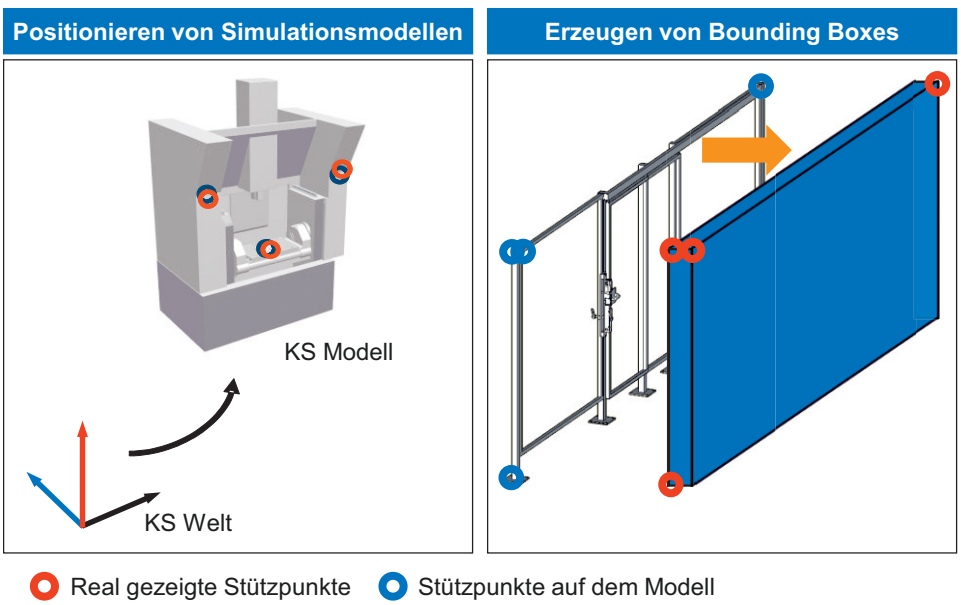
Bei der Inbetriebnahme eines Robotersystems durch unerfahrene Bediener besteht heutzutage die Herausforderung darin, die Bedienung des Industrieroboters während der Programmierung kollisionstechnisch abzusichern. Diese Absicherung erfolgt unter Zuhilfenahme von Methoden der virtuellen Inbetriebnahme (vgl. ► Kap 13.5.2), indem Bewegungen des Roboters vor der realen Ausführung zunächst auf Modellebene verifiziert werden. Voraussetzung für diesen Ansatz ist jedoch die vollständige Verfügbarkeit von Geometriemodellen der jeweiligen Betriebsmittel. Speziell bei kleinen und mittleren Unternehmen ist jedoch die Verfügbarkeit dieser Objektmodelle eingeschränkt. Um dieser Herausforderung zu begegnen, werden heutzutage zwei Ansätze verfolgt:

- Ersetzen der fehlenden Simulationsmodelle durch Bounding-Boxes [BREC09],
- Dreidimensionales Scannen der realen Produktionszelle [BREC10; SUPP08].

Beide Ansätze haben die grundlegende Idee gemein, die reale Produktionszelle sensorbasiert zu vermessen. Die beiden Ansätze werden im Weiteren detailliert.

Ersetzen der fehlenden Simulationsmodelle durch Bounding-Boxes

Die grundlegende Idee dieses Ansatzes ist es, die reale Position von Komponenten der Produktionsanlage zu nutzen, um die zugehörigen Modelle in der Simulation schnell und intuitiv zu positionieren. Dies erfolgt durch Einmessen markanter Eckpunkte von Komponenten in der realen Produktionsanlage. Zu diesem Zweck wird ein Sensorsystem eingesetzt, welches in der Lage ist, die Position eines Zeigegeräts im Anlagenumfeld zu bestimmen. Mit Hilfe dieses Messsystems werden vom Anwender Punktpaare erzeugt, welche zum einen die Punktkoordinaten eines markanten Maschineneckpunktes im Koordinatensystem des Messsystems und zum anderen die Punktkoordinaten desselben Eckpunktes im Koordinatensystem des zugehörigen Modells beinhalten. ◘ Bild 13.81 gibt einen Überblick über das Verfahren. Anlagenkomponenten, zu denen keine Simulationsmodelle verfügbar sind (beispielsweise Umzäunungen), können durch sogenannte Bounding Boxes ersetzt werden. Bounding Boxes bezeichnen die geometrische Approximation von Objekten (beispielsweise durch Quader, Zylinder etc.).



◘ **Bild 13.81** Modellierung von Produktionsanlagen mittels markanter Punkte

Um die Platzierung eines Objektes zu definieren, muss der Anwender mindestens drei markante Punkte im realen Raum identifizieren und die zugehörigen Punktpaare erzeugen. Nach der Registrierung von drei Punktpaaren ist sowohl deren Position relativ zum Koordinatensystem des Modells als auch im realen Raum bekannt. Darauf aufbauend wird eine Transformation bestimmt, welche jedes Punktpaar mit einer minimalen Abweichung aufeinander abbildet. Um die Qualität der Platzierung zu bewerten, wird der Mean Squared Error (MSE) der Punktabstände je Punktpaar zugrunde gelegt. Formal lässt sich dieses Optimierungsproblem wie folgt beschreiben:

$$\min\left(\frac{\sum_{i=0}^{n} | T \cdot P_M^i - P_W^i |^2}{n}\right) \tag{13.58}$$

Dabei ist T die gesucht Transformation, um die Punktkoordinaten im Modell P_M auf die Punktkoordinaten aus der realen Anlage P_W abzubilden. n ist die Gesamtanzahl eingemessener Punktpaare. Mit jedem zusätzlichen Punktpaar steigt die Genauigkeit der Positionierung. Auf Grund von Ungenauigkeiten lässt sich ein Punkt nicht exakt auf sein Pendant abbilden. Neben der begrenzten Genauigkeit des Messsystems sowie Ungenauigkeiten beim Einmessen der realen Punkte durch den Anwender gehört hier speziell die unzureichende Übereinstimmung von Modell und realer Maschine zu den Begrenzungen dieses Ansatzes.

Dreidimensionales Scannen der realen Produktionszelle

Bei diesem Ansatz wird die reale Geometrie der Produktionszelle in die Simulation übertragen. Dazu wird ein Tiefensensor (hier: Microsoft Kinect) verwendet, welcher in der Lage ist, ein dreidimensionales Abbild der betrachteten Szene zu liefern. Da zum einen der Sensor nur einen Teil der Produktionsanlage im Blickfeld abbilden kann und zum anderen um perspektivische Verdeckungen zu minimieren, wird der Sensor manuell durch die Produktionsanlage bewegt. Das Modell der Produktionsanlage wird parallel zur Bewegung auf einem zusätzlichen Auswertungsrechner rekonstruiert. Die Bewegung kann im Allgemeinen manuell durch den Anwender oder automatisiert durch den Industrieroboter erfolgen. Die durch den Industrieroboter automatisierte Bewegung erfordert jedoch höhere Aufwände hinsichtlich Anbringung der Sensorik am Flansch sowie zusätzliche Schnittstellen zwischen Industrieroboter und Auswertungsrechner.

Nach Abschluss des dreidimensionalen Scans liegt das Anlagemodell als statisches Geometriemodell vor. Um dieses Geometriemodell zur Kollisionsbestimmung nutzen zu können, müssen kinematisierte Maschinenmodelle (z. B. Industrieroboter) in das statische Anlagenmodell eingesetzt werden. Die Position der Maschinen geht bereits aus dem statischen, dreidimensionalen Scanmodell hervor, sodass die Maschinenmodelle direkt an die entsprechende Position manuell oder automatisch eingepasst werden können. Die zugehörigen Sensormessdaten können dann aus dem Modell gelöscht werden. Auf diese Weise entsteht ein hybrides Geometriemodell der Produktionsanlage, welches verfügbare kinematische Maschinenmodelle mit Tiefenmessdaten aus der realen Anlage kombiniert. Bild 13.82 zeigt das hybride Simulationsmodell einer roboterbasierten Produktionszelle.

Neben der Inbetriebnahme von Einzelroboter-Arbeitszellen spielt heutzutage auch die Programmierung komplexer Automatisierungsaufgaben mit mehreren, kooperierenden Robotern eine wichtige Rolle. Kooperierend meint dabei, dass mehrere Industrieroboter zusammen und gleichzeitig eine Aufgabe bearbeiten. Typische Aufgaben sind hier das gemeinsame Bewegen großer bzw. schwerer Bauteile, das gemeinsame Montieren von Bauteilen sowie das gemeinsame Prüfen von Bauteilen. Weiterhin können kooperierende Ro-

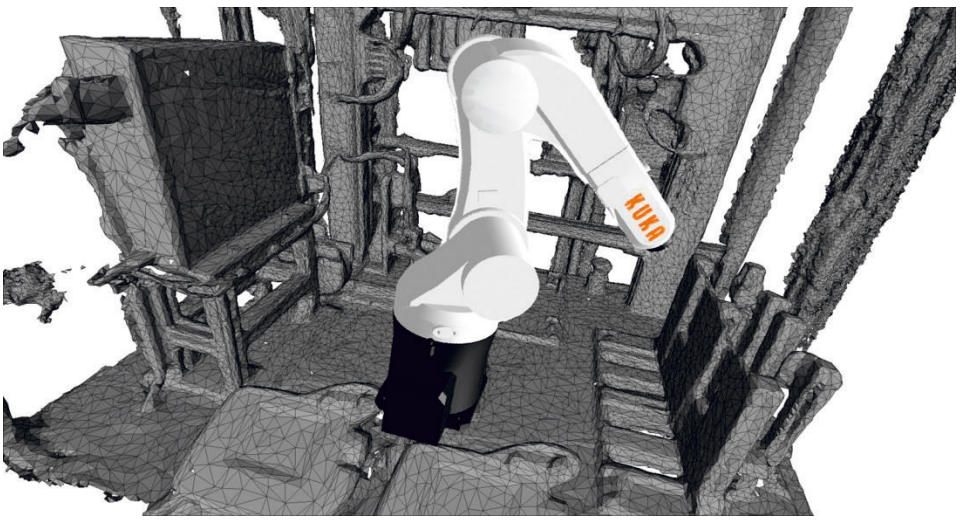


Bild 13.82 Hybrides Simulationsmodell einer industrieroboterbasierten Produktionsanlage

boter genutzt werden, um die Produktivität einer automatisierten Produktion zu erhöhen, indem während Nebenzeiten durch Hinzunahme eines Roboters weitere Bearbeitungs- oder Prüfschritte am Produkt vorgenommen werden. Somit können bisherige Nebenzeiten in Hauptzeiten überführt werden.

Speziell beim synchronisierten Bewegen von Bauteilen und der daraus resultierenden kinematischen Kopplung mehrerer Roboter bestehen hier hohe Anforderungen an die Positionier- bzw. Bewegungsgenauigkeit. Im Allgemeinen ist hier die wirtschaftlich erreichbare Genauigkeit der im Roboter integrierten Messsysteme nicht ausreichend. Daher werden aktuell Strategien entwickelt, die auf externen, zusätzlichen Messsystemen basieren und die den Roboter nachregeln. Zu diesen Messsystemen zählen positionserfassende Messsysteme sowie Kraft-Momenten-Systeme.

Bei der Positionserfassung wird die kartesische Position aller an der Kooperation beteiligten Industrieroboter in einem Koordinatensystem durch ein externes Messsystem erfasst. Weicht die Roboterbewegung durch Störkräfte (Gewichtskraft, Prozesskräfte oder Kalibrierfehler) von der vorgesehen Bahn ab, kann auf Basis der Messwerte nachgeregelt werden, sodass beinahe ideale Bewegungsabläufe erreicht werden können.

Demgegenüber arbeiten Kraft-Momenten-geregelte Systeme nach dem Prinzip des Kräftegleichgewichts [ZAID13]. Dabei führt ein Industrieroboter als „Master" die gewünschte Bewegung aus. Alle anderen beteiligten Industrieroboter arbeiten als „Slave" und werten die am Flansch auftretenden Kräfte und Momente aus, um ihre Bewegung so zu korrigieren, dass die auftretenden Kräfte und Momente kompensiert werden.

Die Programmierung solcher kooperierender Systeme ist manuell kaum beherrschbar. Heutzutage erfolgt die Programmierung durch eine virtuelle Inbetriebnahme, in der die Roboter zunächst in einem virtuellen Zellenmodell programmiert werden, um die virtuell erstellten Bewegungsprogramme abschließend auf die realen Steuerungen zu übertragen. Die Erstellung der virtuellen Bewegungspfade erfolgt hier nicht im klassischen Sinne durch Vorgabe von Bewegungspfaden der einzelnen Roboter, sondern durch Vorgabe der Greifposition jedes beteiligen Roboters am Bauteil sowie durch Vorgabe des Bewegungspfades des Bauteils selbst. Auf Basis dieser beiden Vorgaben kann auf die Bewegungsbahn jedes Roboters zurückgerechnet werden.

Die allgemeine Entwicklungstendenz besteht damit in der Minimierung des Aufwands zur Integration eines Roboters in seine Arbeitsumgebung. Die Ansätze der Offenheit der Steuerung und der Modularität von Systemkomponenten tragen mit der fortschreitenden Entwicklung der Mikroprozessor- und der Kommunikationstechnologie maßgeblich dazu bei, diese Zielstellung zu erreichen.

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CAN-Bus	Controller Area Network
DH-Matrizen	Denavit-Hartenberg-Matrizen
HMI	Human Machine Interface
IGES	International Graphics Exchange Standard
IR	Industrieroboter
IRL	Industrial Robot Language
JT	Jupiter Tesselation
Makros	Programmierautomatismen
MRK-Systeme	Mensch-Roboter-Kollaborationssysteme
MSE	Mean Squared Error
NC	Numeric Control
OPC	Open Platform Communcations
PHG	Programmierhandgerät
PTP	Point to Point
RC	Robotersteuerung
RGB	Farbraum
RRS	Realistische Roboter Simulation
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	Stereolithographie File Format
TCP	Tool-Center-Point
VDAFS	Verband der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle
WOP	Werkstattorientierte Programmiersysteme

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A_n	–	Transformationsmatrix
K_n, K_{n-1}	–	Gelenkkoordinatensysteme
P	–	Positionsmatrix
R	–	Orientierungsmatrix
S_1, S_2	–	charakteristische Kenndaten der kinematischen Kette
T	–	Transformationsmatrix
T_6	–	Transformationsgleichung
$\vec{P}$	–	3D-Positionsvektor
v_{max}	°/s	maximale Achsgeschwindigkeit
α, β, γ	°	Rotationswinkel

Literaturverzeichnis

[ARMB06] Armbruster, H.; Kirner, E.; Kinkel, S.: Neue Kundengruppen für Industrieroboter, Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung, 2006

[BISC09] Bischoff, R.; Guhl, T.: Robotic Visions to 2020 and beyond. Vortrag. Brüssel, 2009

[BISC10] Bischoff, R.; Kurth, J.; Schreiber, G.; Koeppe, R.; Albu-Schaeffer, A.; Beyer, A.; Eiberger, O.; Haddadin, S.; Stemmer, A.; Grunwald, G.; Hirzinger, G.: The KUKA-DLR Lightweight Robot arm – a new reference platform for robotics research and manufacturing. In: Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). Tagungsband zu, S. 1–8

[BLUM81] Blume, C.; Dillmann, R.: Frei programmierbare Manipulatoren. Würzburg: Vogel-Verlag, 1981

[BREC09] Brecher, C.; Göbel, M.: Modellbasierte Programmierung „by Demonstration". In: Automatisierungstechnische Praxis, 2009, Nr. 7, S. 62–68

[BREC10] Brecher, C.; Roßmann, J.; Schlette, C.; Herfs, W.; Ruf, H.; Göbel, M.: Intuitive Roboterprogrammierung in der automatisierten Montage. In: wt – Werkstattstechnik online. 100. Jg., 2010, Nr. 9, S. 684–686

[BRON84] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 1984

[DENA95] Denavit, J.; Hartenberg, R. S.: A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. In: Journal of Applied Mechanics, 1995, S. 215–221

[DIN93] DIN 66312: IRL – Industrial Robot Language. In:. Berlin: Beuth-Verlag, 1993

[DREW97] Drews, P.; Schmid, D.; Volkholz, V.: Roboter in der Werkstatt. Frankfurt am Main: Maschinenbau Verlag, 1997

[FERR05] Ferré, E.; Laumond, J.-P.; Arechavaleta, G.; Estevès, C.: Progresses in assembly path planning. In:: International Conference on Product Lifecycle Management. Tagungsband zu , S. 373–382

[GECK11] Gecks, T.: Sensorbasierte, echtzeitfähige Online-Bahnplanung für die Mensch-Roboter-Koexistenz. Dissertation, Universität Bayreuth, 2011

[GÖBE12] Göbel, M.: Verfahren zur intuitiven Programmierung von Industrierobotern durch Demonstration. (Reihe: Werkzeugmaschinen. Bd. 2012,12). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl, 2012, 2012

[GRUN09] Gruninger, R.; Kus, E.; Huppi, R.: Market study on adaptive robots for flexible manufacturing systems. In:: 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, 2009, S. 1–7

[GUIZ08] Guizzo, E.: Article Robotics Industrial Robots The Rise of the Machines. URL: http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/the-rise-of-the-machines. [Stand: 14.09.2017]

[HART56] Hartenberg, R. S.: Die Darstellung und Handhabung der niederen Elementenpaare in einer auf Matrizenrechnung gegründeten Zeichensprache. In: VDI. 12. Jg., 1956, S. 145/155

[HESS04] Hesse, S.: Robotergreifer. München: Hanser, 2004

[JACO94] Jacobi, A. N.: Realistische Simulation der Bewegungen, IPK Berlin, 1994

[JENS02] Jensen, L.; Stephan, J.: Gefriergreifer: Neue Anwendung der Peltier-Technik. In: KI. Luft-und Kältetechnik. 38. Jg., 2002, Nr. 12, S. 572–576

[KUHN09] Kuhn, S.; Henrich, D.: Multi-View Reconstruction of Unknown Objects in the Presence of Known Occlusions,Universität Bayreuth, 2009

[KUKA15] KUKA Roboter GmbH: KUKA.PLC mxA. URL: http://www.kuka-robotics.com/res/sps/a737ee03-5832-4c95-9d91-84e0de80c664_KUKA_mxAUTOMATION_DEUTSCH.pdf. [Stand: 26.01.2015]

[MACK98] MacKerrow, P. J.: Introduction to robotics. (Reihe: Electronic systems engineering series). Reprinted. Aufl. Sydney [u. a.]: Addison-Wesley, 1998

[MEYE07] Meyer, C.; Hollmann, R.; Parlitz, C.; Hägele, M.: Programmieren durch Vormachen für Assistenzsysteme – Schweiß- und Klebebahnen intuitiv programmieren (Programming by Demonstration for Assistive Systems – Intuitive Programming of Welding and Gluing Trajectories). In: it – Information Technology. 49. Jg., 2007, Nr. 4, S. 238–246

[OSTE92] Osterwinter, M.: Steuerungsorientierte Robotersimulation. Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 1992

[PAUL81] Paul, R. P.: Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control. Cambridge: MIT Press, 1981

[PRIT92] Pritschow, G.; Frager, O.: Roboterzellen Programmierung: Die Sprache IRL und der Zwischencode ICR. In: Robotersysteme, 1992, Nr. 8, S. 25–32

[RIES92] Rieseler, H.: Roboterkinematik – Grundlagen, Invertierung und symbolische Berechnung. Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 1992

[SAYL11] Sayler, S.: Universelle Manipulationsstrategien für die industrielle Montage. Karlsruhe: KIT Scientific Publ, 2011

[SCHW07] Schwarz, M. H.; Boercsoek, J.: A Survey on OLE for Process Control (OPC). In:: Proceedings of the 7th Conference on 7th WSEAS International Conference on Applied Computer Science – Volume 7. Tagungsband zu . (Reihe: ACS'07), S. 186–191

[SNYD90] Snyder, W. E.: Computergesteuerte Industrieroboter. Grundlagen und Einsatz. Weinheim: VCH-Verlagsges, 1990

[SUPP08] Suppa, M.: Autonomous robot work cell exploration using multisensory eye-in-hand systems. Dissertation, Universität Hannover, 2008

[VDI90] Richtlinie 2860 (1990). Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole

[VDI95] Richtlinie 2740 (1995). Mechanische Einrichtungen in der Automatisierungstechnik – Greifer für Handhabungsgeräte und Industrieroboter

[WARN89] Warnecke, H.-J.; Schraft, R. D.: Handbuch Handhabungs- Montage- und Industrierobotertechnik. Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie, 1989

[WARN97] Warnecke, H.-J.; Schraft, R. D.: Handbuch Handhabungs- Montage- und Industrierobotertechnik-Erweiterungsblätter. Landsberg am Lech: Verlag Moderne Industrie, 1997

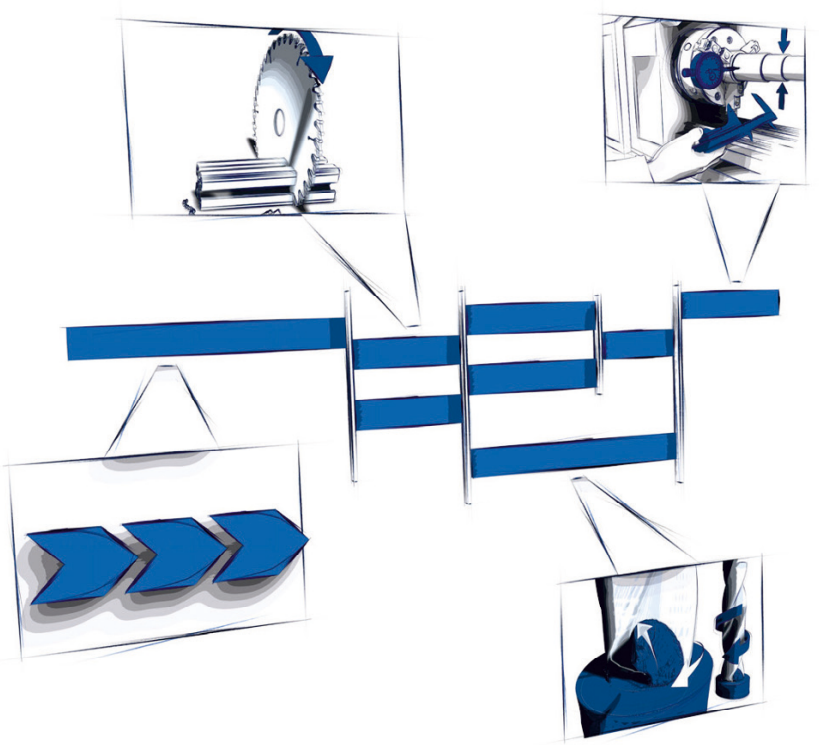
[WECK97] Weck, M.; Dammertz, R.: Graphical robot programming and generation of application specific programming interfaces. In: Annals of the WGP. 1. Jg., 1997, Nr. 4, S. 87 f.

[WIES01] Wiest, U.: Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern. (Reihe: Berichte aus der Automatisierungstechnik). Aachen: Shaker, 2001

[WILS11] Wilson, M.: Festo drives automation forwards. In: Assembly Automation. 31. Jg., 2011, Nr. 1, S. 12–16

[ZAID13] Zaidan, S.: A work-piece based approach for programming cooperating industrial robots. (Reihe: Forschungsberichte IWB. Bd. 259). München: Utz, 2013

Kapitel 14



Fertigungsleittechnik

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M.Sc., Dipl.-Inform. Adam Malik, Dr.-Ing. Simon Müller und Simon Storms M.Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

Fertigungsleittechnik



14.1 Die Unternehmensstruktur im CIM-Verbund – 636
14.1.1 CIM-Komponenten – 637
14.1.2 Automatisierte Produktion – 639
14.1.3 Ebenenmodell eines Unternehmens der Fertigungsindustrie – 640

14.2 Unternehmensebene – 641
14.2.1 ERP-Systeme – 642

14.3 Betriebsleitebene – 645
14.3.1 Manufacturing Execution Systems – 645
14.3.2 Fertigungsleitsysteme – 646
14.3.3 Kommunikation in der Leittechnik – 656

14.4 Prozessleitebene – 659
14.4.1 Elektronischer Leitstand – 659
14.4.2 Fertigungsleitrechner – 661
14.4.3 SCADA-Systeme – 662

14.5 Smart Automation Lab: Industrie 4.0-Forschungslabor – 663
14.5.1 Produktzentrierte Steuerung – 663
14.5.2 Plug & Produce – 664
14.5.3 Kognitive Montage – 665

Abkürzungsverzeichnis – 666

Literaturverzeichnis – 667

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_14

Die internationale Wettbewerbssituation hat in weiten Bereichen der Produktionstechnik einen grundsätzlichen Wandel nach sich gezogen: Immer kürzere Innovationsphasen, kleinere Losgrößen und stetig kürzer werdende Produktlebenszyklen sind der Hintergrund der Entwicklung der „Fabrik der Zukunft". Neue Formen der Ablauforganisation, neue Fertigungskonzepte und der unternehmensweite Einsatz leistungsfähiger EDV-Systeme steigern die Flexibilität der Unternehmen hinsichtlich der sich schnell ändernden Marktanforderungen.

Geschichtlich ist die industrielle Produktion durch viele Innovationen gekennzeichnet. Diese Innovationen beziehen sich aber nicht nur auf die Produkte, sondern in besonderem Maße auf die Produktionsfaktoren. Die „mikroelektronische Revolution" zeichnete sich für die Produktionsbetriebe insbesondere dadurch aus, dass neben den drei „klassischen" Produktionsfaktoren Arbeit, Betriebsmittel und Werkstoffe als vierter Faktor die „Information" trat. Die jüngste „vierte industrielle Revolution" stellt die weitergehende Vernetzung von cyber-physikalischen Systemen (engl. Cyber-Physical Systems, CPS) mit dem Internet in den Vordergrund.

Nach den Rationalisierungserfolgen in den technischen Bereichen durch Mechanisierung und Automation zielen heutige Bestrebungen auf eine klare Strukturierung der planerischen und organisatorischen Bereiche und deren Unterstützung durch effiziente EDV-Lösungen. Dabei steht die durchgängige Gewinnung, Verarbeitung und Nutzung von Informationen im Vordergrund. Diese Bestrebungen werden unter dem Begriff CIM – Computer Integrated Manufacturing – zusammengefasst. Man versteht darunter das informationstechnische Zusammenwirken aller am Produktionsprozess direkt oder indirekt beteiligten EDV-Systeme in einem Unternehmen [DANG90]. Die durch diesen Integrationsprozess verfolgten Ziele sind die Erhöhung der Produktivität, die Verkürzung von Entwicklungs- und Fertigungszeiten sowie die Verbesserung der Flexibilität eines Unternehmens bezüglich neuer Marktanforderungen.

Mit dem Beginn der CIM-Idee Mitte der achtziger Jahre im letzten Jahrhundert wurden die Entwicklungsschwerpunkte zunächst auf die Bereitstellung der benötigten Informationstechnologien sowie auf die Kopplung bereits vorhandener EDV-Systeme gelegt. Bei der Umsetzung des CIM-Gedankens traten jedoch sehr schnell erhebliche Schwierigkeiten auf. Grund dafür waren die zu diesem Zeitpunkt bereits vorhandenen Systeme, die praktisch alle Bereiche der Fertigungsplanung und -steuerung (Produktionsplanung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung) abdeckten, jedoch größtenteils eines gemeinsam hatten – sie stellten in sich geschlossene Insellösungen dar. Der Austausch von Daten zwischen diesen Systemen war und ist zwar prinzipiell möglich, aufgrund von fehlenden Schnittstellenstandards jedoch mit sehr großem Aufwand verbunden. Die Arbeiten internationaler Normungsgremien sind auf einigen Gebieten jedoch so weit fortgeschritten, dass standardisierte Schnittstellen zur Verfügung stehen. Weiterhin haben sich in vielen Bereichen De-facto-Standards herausgebildet, die heute von fast allen Softwareanbietern unterstützt werden.

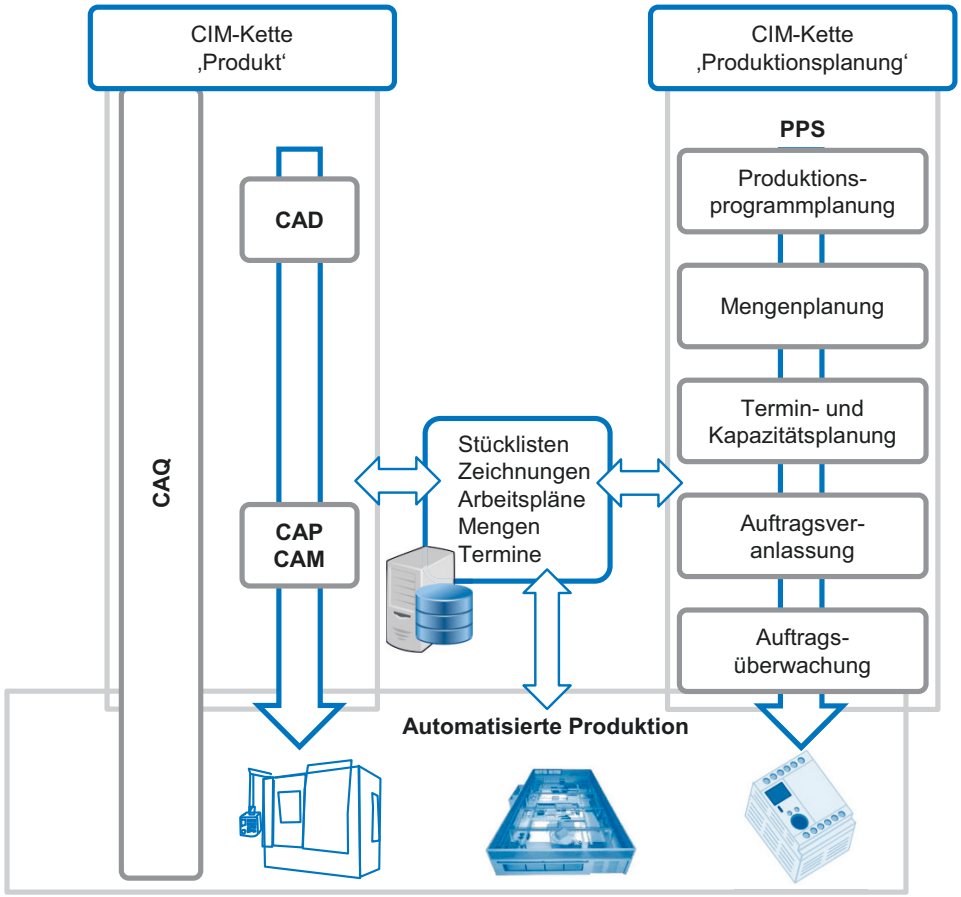
Obwohl die Umsetzung von CIM aus technischer Sicht heute in vielen Unternehmen bereits weit fortgeschritten ist, sind die anfangs verfolgten Ziele oft nicht erreicht worden. Grund dafür ist die im Allgemeinen stark technikzentrierte Umsetzung des CIM-Gedankens. Darüber hinaus sind jedoch organisatorische Maßnahmen im Sinne einer bereichsübergreifenden, funktionalen Integration erforderlich, mit der die heute noch stark arbeitsteiligen Strukturen aufgebrochen werden können. Im Mittelpunkt dieses humanzentrierten CIM-Ansatzes steht der Mensch, dessen Motivation und Arbeitsbereitschaft durch organisatorische Maßnahmen und Rechnerunterstützung gesteigert werden kann. Eine erfolgreiche CIM-Realisierung erfordert daher die gleichzeitige Berücksichtigung von Mensch, Technik und Organisation [WARN93].

Hieraus wird deutlich, dass „CIM " kein käufliches Produkt ist, sondern als mittel- bis langfristige firmenspezifische Strategie zu verstehen ist. Zur Realisierung dieser Strategie ist ein „CIM-Konzept" auf Basis eines Unternehmensmodells notwendig, das sich an den betrieblichen – in erster Linie organisatorischen – Gegebenheiten und an den technischen Möglichkeiten orientiert. Die Effizienz einer Realisierung ist dabei erst im zweiten Schritt vom technisch Machbaren abhängig. Ausgehend vom Ist-Zustand des innerbetrieblichen Zusammenwirkens muss eine klare und straffe Struktur der Aufgaben und Zuständigkeiten der einzelnen Abteilungen in Form eines Organisations- und Informationsmodells erarbeitet werden. Vor dem Hintergrund der technischen Möglichkeiten kann daraus ein unternehmensspezifisches CIM-Konzept entwickelt werden, das langfristig unter Einbeziehung der Mitarbeiter realisiert werden kann [WECK97].

14.1 Die Unternehmensstruktur im CIM-Verbund

Klammert man die administrativen Bereiche eines Unternehmens aus und betrachtet die Funktionen der Fertigung und deren vorgelagerte Bereiche, so lässt sich die im ◘ Bild 14.1 dargestellte verallgemeinerte CIM-Struktur ableiten. Die Aufgaben und Funktionen der einzelnen CIM-Bausteine sollen in den folgenden Abschnitten kurz erläutert werden [HACK86].

Bild 14.1 CIM-Modell



14.1.1 CIM-Komponenten

Der Austausch von Informationen zwischen den einzelnen Bereichen eines Unternehmens bzw. die rechtzeitige und konsistente Bereitstellung von Daten in den verschiedenen EDV-Systemen ist das Ziel sämtlicher CIM-Bestrebungen. Dazu müssen geeignete Kommunikationsmechanismen bereitgestellt und Vereinbarungen über die auszutauschenden Daten getroffen werden.

In den seltensten Fällen wird ein Unternehmen eine CIM-Lösung „aus einer Hand" realisieren, da entweder bestehende EDV-Systeme vorhanden sind oder für unterschiedliche Aufgaben Programme unterschiedlicher Hersteller zum Einsatz kommen sollen. Die Kopplung unterschiedlicher EDV-Systeme spielt daher immer eine zentrale Rolle bei einer CIM-Realisierung.

Früher war die einfachste Möglichkeit, zwei Anwendungssysteme datentechnisch miteinander zu verbinden, die Kopplung über eine Datei, die ein spezifiziertes Format aufweist. Die meisten Programmsysteme können unterschiedlichste Dateiformate erzeugen oder lesen, sodass verschiedenste Applikationen miteinander verbunden werden können. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass die Daten bei Änderung in der einen Applikation nicht automatisch auch in der Datenbasis der anderen Applikation geändert werden. Dadurch entstehen kurzfristig Dateninkonsistenzen. Eine andere Lösung sind spezielle Konvertierungsprogramme, die eine bidirektionale Konvertierung der Datenstrukturen ohne den Umweg über eine Datei vornehmen.

Eine Integration von Anwendungssystemen über ein gemeinsames Datenbanksystem ist in der Regel nur dann möglich, wenn ein unternehmensweites Datenmodell existiert und die Applikationen ihren gesamten Datenbestand oder zumindest die für andere Applikationen wichtigen Daten in der Datenbank ablegen. Die Vorteile einer derartigen Lösung sind die durch das Datenbank-Managementsystem (DBMS) gewährleistete Datenkonsistenz, die Aktualität und die gleichzeitige Verfügbarkeit der Daten für alle angeschlossenen Systeme.

Heute begrenzt sich der Datenaustausch jedoch nicht mehr auf die rein unternehmensinterne Kommunikation. Der Datenaustausch zwischen den verschiedenen operativen Einheiten eines Unternehmens oder zwischen verschiedenen Unternehmen, z. B. für die Zuliefererbindung, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Wurde dieser Datentransfer früher noch manuell durchgeführt, indem beispielsweise der Zulieferer Bestellungen manuell in sein EDV-System eingeben musste, so hat man in den letzten Jahren erkannt, dass für

einen effizienten, d. h. kostengünstigen, zeitsparenden und fehlerfreien, Datenaustausch standardisierte, automatisierte Verfahren erforderlich sind. Zunächst wurde dieser Datenaustausch mit Lösungen auf Basis von Electronic Data Interchange (EDI) durchgeführt, ergänzt um Standards wie EDIFACT (Electronic Data Interchange For Administration, Commerce and Transport). Mit der Einführung von XML (eXtensible Markup Language) steht ein weiterer Standard zur Verfügung, der unternehmensübergreifende Datenaustauschlösungen ermöglicht.

14.1.1.1 PPS

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS), im Englischen Enterprise Resource Planning (ERP) genannt, ist verantwortlich für die mengen-, termin- und kapazitätsgerechte Planung, Veranlassung und Überwachung von Produktionsabläufen [EVER90a]. Grundlage eines jeden PPS-Systems ist eine Stammdatenverwaltung zur Ablage und Pflege der für die Planung benötigten Daten. Dazu gehören beispielsweise Teilestämme, Stücklisten, Arbeitspläne sowie Informationen über vorhandene Kapazitätsgruppen und Arbeitsplätze.

Die Planungsfunktionen eines PPS-Systems gliedern sich im Wesentlichen in die Produktionsprogrammplanung, die Mengenplanung sowie die Termin- und Kapazitätsplanung. Hinzu kommen operative Funktionen zur Auftragsveranlassung und zur Auftragsüberwachung:

- Auf der Basis von Kundenaufträgen und Absatzprognosen ermittelt die Produktionsprogrammplanung das langfristige Produktionsprogramm und mögliche Liefertermine. Gleichzeitig müssen die Abteilungen Konstruktion und Arbeitsplanung mit den notwendigen auftragsabhängigen Vorlaufarbeiten beauftragt und terminlich überwacht werden.
- In der Mengenplanung werden Stücklisten aufgelöst und Bedarfe ermittelt mit dem Ziel, das Produktionsprogramm termingerecht fertigen zu können. Ergebnis dieser Planungsstufe sind Bestellaufträge für fremdbezogenes Material und das in Eigenfertigung herzustellende Fertigungsprogramm.
- In der Termin- und Kapazitätsplanung werden unter Einbeziehung der Arbeitspläne die Durchlaufzeiten der einzelnen Fertigungsaufträge ermittelt. Anschließend erfolgt die Verteilung der Fertigungsaufträge auf die einzelnen Kapazitäten (Maschinen, Personal usw.). Bei Über- oder Unterbelastung von Kapazitäten wird ein Belastungsabgleich vorgenommen, der auch zu einer Auswärtsvergabe von Aufträgen führen kann.
- Durch die Auftragsveranlassung wird nach der Freigabe der Bestellaufträge die Bestellschreibung ausgelöst und die Ware beim Lieferanten bestellt. Die Fertigungsaufträge werden nach einer Verfügbarkeitsprüfung von Material und Kapazitäten freigegeben, d. h. Auftragsbelege werden erstellt und verteilt. Gleichzeitig wird die Bereitstellung von Material und Fertigungshilfsmitteln angestoßen.
- Die Auftragsüberwachung erfasst die von der Fertigung zurückgemeldeten Informationen über Menge, Termin und Qualität der gefertigten Teile.

Da PPS-Systeme im Allgemeinen mittelfristig planen, weichen die Planungsvorgaben häufig vom aktuellen Geschehen in der Fertigung ab. Daher werden die Steuerungsfunktionen von PPS-Systemen zunehmend in werkstattnahe, dezentrale Systeme – sogenannte Leitstände – verlagert. Diese besitzen neben den Funktionen zur Auftragssteuerung auch Strategien zur Optimierung von Arbeitsgangreihenfolgen, mit denen die kurzfristige Feinplanung von Arbeitsfolgen sowie die Umplanung nach Störungen vorgenommen werden können. Dadurch werden die Planungsvorgaben der Fertigungssteuerung wesentlich genauer und die Reaktionsfähigkeit auf Unregelmäßigkeiten in der Fertigung verbessert.

Die wesentlichen Informationen, die das PPS-System den übrigen Bereichen zur Verfügung stellt, werden im Folgenden erläutert.

- PPS → Computer Aided Design (CAD)
  Auf Basis des vorliegenden Produktionsprogramms beauftragt das PPS-System den CAD-Bereich mit der Konstruktion. Das kann kommunikativ erfolgen oder über eine gemeinsame Datenbasis, d. h. der Auftrag wird in das „Auftragsbuch" des CAD-Bereiches eingetragen.
- PPS → Computer Aided Planning (CAP) und Computer Aided Manufacturing (CAM)
  Der CAP-Bereich wird vom PPS-System mit der Arbeitsplanung, d. h. mit der Aufschlüsselung in einzelne Arbeitsgänge und deren Ablauffolge, beauftragt. Dazu werden die im CAD-Bereich erzeugten Geometrie- und Technologiedaten sowie die Stücklisten benötigt. Die zunächst auftragsneutralen Arbeitspläne werden um die vom PPS-System vorgegebenen auftragsspezifischen Daten erweitert. Danach werden die für die Produktion benötigten NC-Programme im CAM-Bereich generiert.
- PPS → Automatisierte Produktion
  Vor der Auftragsübergabe überprüft das PPS-System die Fertigungs- und Montageunterlagen auf Vollständigkeit. Ist diese Bedingung erfüllt, wird der Auftrag in das „Auftragsbuch" des automatisierten Produktionssystems eingetragen. Das Produktionssystem hat über die Auftragsnummer Zugriff auf alle in den Datenbanken abgelegten und zur Produktion erforderlichen Informationen, wie z. B. Art, Menge und Termine der zu produzierenden Teile, Arbeitspläne, Fertigungshilfsmitteldaten und NC-Programme.

14.1.1.2 CAD

Wenn es sich bei den zu fertigenden Produkten nicht um Standardprodukte handelt, wird zunächst die Konstruktionsabteilung mit den notwenigen Entwicklungsarbeiten beauf-

tragt. Dort werden CAD-Systeme zur Unterstützung des Konstrukteurs eingesetzt [AUTO93].

Unter dem Begriff CAD (Computer Aided Design) versteht man die rechnerunterstützte Konstruktion und Entwicklung. Die Ergebnisse der Konstruktion – das sind neben den Geometriedaten die Technologiedaten (Material, Oberflächen usw.), Normteile, Zusammenstellungen und Stücklisten – werden zu einer gemeinsamen Datenbasis zusammengefasst. Das Ergebnis ist eine digitale Objektdarstellung, die in einer Datenbank abgelegt wird, auf die auch andere innerbetriebliche Abteilungen Zugriff haben. Das enorme Rationalisierungspotenzial von CAD-Systemen folgt aus den Möglichkeiten, die sich dem Konstrukteur bei der Varianten- und Änderungskonstruktion bieten. Durch den Zugriff auf Norm- und Wiederholteilbibliotheken und die Verwendung vordefinierter Makros können zeitraubende Routinetätigkeiten vermieden werden.

Nach Fertigmeldung der CAD-Arbeiten werden vom PPS-System auf Basis der Stücklisten, Normteile- und Zukaufteilebeschreibungen Nachfragen an das Magazin bzw. den Einkauf initiiert.

14.1.1.3 CAP und CAM

CAP (Computer Aided Planning) umfasst die EDV-unterstützte Arbeitsplanung, die auf den mit CAD erstellten Konstruktionsdaten aufbaut und Fertigungsunterlagen erzeugt, aus denen hervorgeht, woraus, wie, in welcher Reihenfolge, womit und in welcher Zeit ein Werkstück, eine Baugruppe usw. gefertigt und montiert werden soll [EVER90b]. Die computergestützte Generierung von NC-Programmen aus den CAD-Daten wird als CAM (Computer Aided Manufacturing) bezeichnet [N.N.99].

Neben der Ermittlung der erforderlichen Arbeitsvorgänge und der einzusetzenden Verfahren und Maschinen müssen auch ggf. benötigte Sonderwerkzeuge und Vorrichtungen in die Planung einbezogen werden. Handelt es sich bei den eingesetzten Maschinen um NC-Maschinen, müssen auch noch die erforderlichen NC-Programme aus den CAD-Daten abgeleitet werden.

Bei den eingesetzten CAP-Systemen muss zwischen Arbeitsplanverwaltungssystemen, die lediglich Editier- und Verwaltungsfunktionen zur Verfügung stellen, und Arbeitsplanungssystemen, die den gesamten Prozess der Arbeitsplanung unterstützen und daher wesentlich komplexer sind, unterschieden werden.

Zur Festlegung von Prüfmerkmalen und Prüfprogrammen und damit zur Komplettierung des Arbeitsplanes wird der planerische Bereich des CAQ (Computer Aided Quality Assurance) beauftragt. Für diesen Vorgang werden wiederum die Geometrie-, Technologie- und Prozessdaten benötigt.

Die vom CAP-Bereich erzeugten Arbeitspläne enthalten alle Angaben über das für die Produktion benötigte Personal, die zu verwendenden Maschinen und Fertigungshilfsmittel (Werkzeuge, Vorrichtungen usw.) sowie Informationen über die einzelnen Prozessschritte zur Durchführung der Arbeitsgänge in Form von Arbeitsanweisungen oder NC-Programmen. Diese Daten werden dem PPS-System zur Auftragszusammenstellung und zur Produktionsplanung auf Basis von Mengen-, Termin- und Kapazitätsaspekten zur Verfügung gestellt.

14.1.1.4 CAQ

Aufgabe des Bereichs CAQ (Computer Aided Quality Assurance) ist die Planung und Durchführung der Qualitätssicherung [NEIP91]. Anhand der Konstruktionsunterlagen aus dem CAD-Bereich und den Arbeitsplänen aus dem CAP-Bereich werden Prüfmerkmale festgelegt, Mess- und Prüfpläne erstellt und im Falle rechnergesteuerter Prüfeinrichtungen Prüfprogramme generiert und als Ergänzung dem Arbeitsplan zugeordnet. Die so erzeugten Prüfvorgaben werden im automatisierten Produktionssystem durchgeführt und überwacht.

Die bereichsübergreifenden Aufgaben von CAQ machen deutlich, dass es sich nicht um eine isolierte Funktion innerhalb der Unternehmensstruktur handelt, sondern dass alle Bereiche über den gesamten Produktentstehungszyklus hinweg durchdrungen werden.

14.1.2 Automatisierte Produktion

Die rechnerunterstützte Steuerung und Überwachung der Betriebsmittel im Produktionsprozess wird als automatisierte Produktion bezeichnet. Darunter fallen sowohl die Funktionen Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE/MDE), als auch die direkte Steuerung von NC-Maschinen, Lager- und Transportsystemen.

Die Ausprägung der eingesetzten EDV-Systeme hängt im Wesentlichen vom Grad der Automatisierung ab. Während vollautomatische flexible Fertigungssysteme hochkomplexe Fertigungsleitsysteme benötigen, besitzen Leitstände zur Steuerung konventioneller Werkstätten einen wesentlich geringeren Funktionsumfang.

Die zur Steuerung der Fertigung benötigten Daten bezieht das automatisierte Produktionssystem aus den vorgelagerten Bereichen PPS, CAD, CAP, CAM und CAQ. Gleichzeitig werden die während des Produktionsprozesses anfallenden Daten an diese Bereiche zurückgemeldet, um die Aktualität der Planungsprozesse sicherzustellen.

Die in der Fertigung bzw. Montage anfallenden Daten werden gesammelt, komprimiert und dann an das PPS-System gemeldet. Wichtige Daten sind z. B. die Start- und Endtermine der Fertigungsaufträge, Informationen über die Anzahl der gefertigten Werkstücke und Ausschussmengen sowie die im Rahmen der Betriebsdatenerfassung gesammelten Daten (vgl. ► Kap.14.3.2.5).

14.1.3 Ebenenmodell eines Unternehmens der Fertigungsindustrie

Um Informationen zwischen den verschiedenen Entitäten austauschen zu können, müssen die Bedürfnisse und Schnittstellen der jeweiligen Einheiten zugrunde gelegt werden. Um die Anforderungsprofile definieren zu können, ist es erforderlich, den prozess- bzw. unternehmensinternen Informationshaushalt zu untersuchen, d. h. speziell die Art und Weise

- der Informationserzeugung,
- des Informationstransports und
- der Informationsverarbeitung.

zu analysieren. Im Anforderungsprofil müssen sich Aspekte wie beispielsweise der Umfang der jeweils zu transportierenden Datenmengen, die zulässigen Lauf- oder Reaktionszeiten, die erforderliche Datendurchsatzleistung der Kommunikationseinrichtung und die maximale Anzahl der zu vernetzenden Kommunikationsteilnehmer widerspiegeln. Zur Untersuchung des unternehmens- und prozessinternen Informationshaushalts in Unternehmen der Stückgutfertigung hat sich die Orientierung an dem von der ISO im Technischen Bericht TR 10314 beschriebenen Referenzmodell sowie dessen Weiterentwicklung in ISO 62264 als zweckmäßig erwiesen. Dieses Modell gliedert Unternehmen in die fünf Ebenen:

- Ebene 5: Planungsebene,
- Ebene 4: Leitebene,
- Ebene 3: Führungsebene,
- Ebene 2: Steuerungsebene,
- Ebene 1: Aktor-/Sensorebene.

Die verschiedenen Ebenen werden aufgrund der Datenmenge der Informationen auch als Automatisierungspyramide bezeichnet (vgl. Bild 14.2). Die Datenmenge sinkt mit der Höhe des Levels. Der Zeithorizont, der auf den jeweiligen Ebenen betrachtet wird, wird nach oben größer. Während auf der Aktor-/Sensorebene Daten im Millisekundentakt eingestellt bzw. abgefragt werden, berechnet die Planungsebene zukünftige Aufträge in einem Zeithorizont von bis zu mehreren Monaten. Als Ebene 0 wird gelegentlich noch die Prozessebene im Kontext der Automatisierungspyramide mit aufgeführt.

Planungsebene

In der Planungsebene eines Unternehmens werden übergeordnete Aufgaben des Gesamtunternehmens abgedeckt. Die wesentliche Aufgabe in dieser Ebene ist das Führen des Unternehmens im Sinne der Erfüllung der gesteckten Unternehmensziele (langfristige Planung). Ein technisches System auf der Planungsebene eines Unternehmens bzw. einer Fabrik kann beispielsweise ein Unternehmens- oder Betriebsrechner sein. In der Planungsebene sind Unternehmensfunktionen wie die Produktionsplanung (z. B. PPS-Systeme) angesiedelt.

Leitebene

Aufgabe der Leitebene ist die Koordinierung der Produktion und Fertigung sowie die Überwachung und Steuerung der Auftragsbearbeitung einschließlich der Beschaffung und Reservierung der für die einzelnen Aufträge beschafften Ressourcen. Typische Aufgabengebiete, die bei einer Unternehmens-

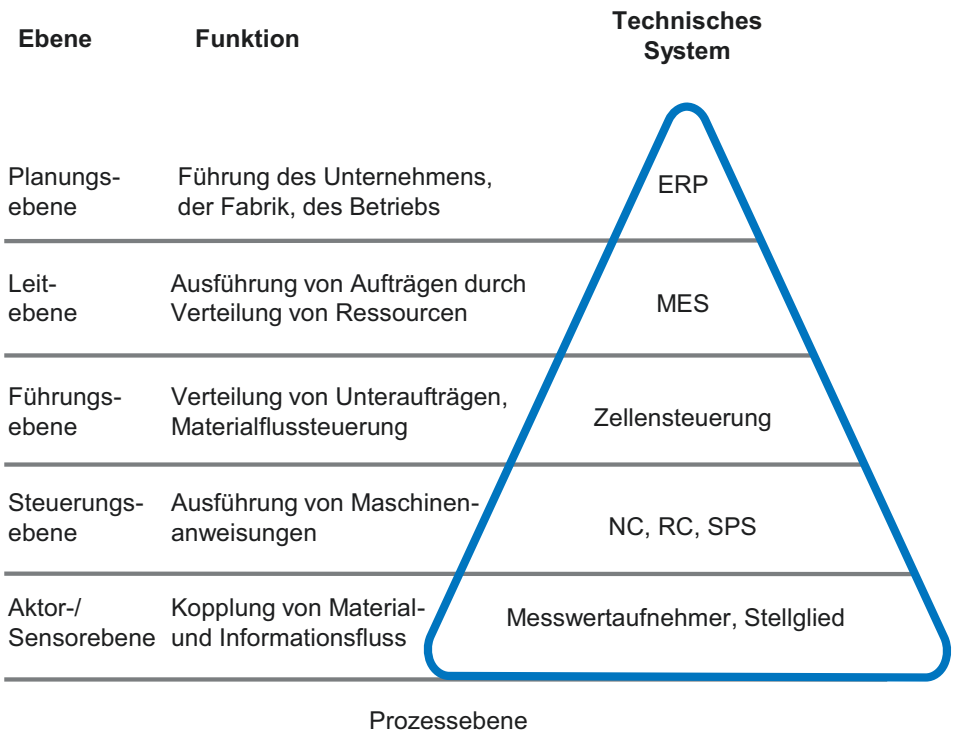


Bild 14.2 Automatisierungspyramide

strukturierung der Leitebene zufallen, sind beispielsweise Planung der Produktion, Kapazitätsplanung, Betriebsmittel- und Ressourcenplanung, Planung der Betriebsmittelwartung und das Ressourcen-Management. Ein technisches System der Leitebene ist beispielsweise der Fertigungsleitrechner. In den Bürobereichen der Planungsebene sind Unternehmensfunktionen wie die Arbeitsvorbereitung (z. B. mit CAP-Systemen) angesiedelt.

Führungsebene

Die Analyse der für einen Fertigungs- oder Messauftrag benötigten Ressourcen, deren Anforderung, das Bilden von Auftragswarteschlangen, die Verteilung von Aufträgen auf einzelne Automatisierungsgeräte, die Überwachung des Auftragsfortschritts oder das Berichten des Auftragsstatus an die Leitebene sind typische Aufgaben der Führungsebene, die der Meisterebene entspricht. Technische Realisierungen der Führungsebene, die unter dem Oberbegriff automatisierte Produktion (vgl. ▶ Kap. 14.1.2) zusammengefasst werden, sind beispielsweise Zellenrechner, integrierte DNC-/BDE-/MDE-Systeme und Fertigungsleitstände.

Steuerungsebene

Leiten, überwachen und koordinieren der Aktivitäten eines oder mehrerer Automatisierungsgeräte des Werkstattbereiches zum Zweck des Bearbeitens von Rohmaterialien, der Steuerung von Montage- oder Messaufträgen sowie des Berichtens des Gerätezustandes an ein übergeordnetes technisches System sind Aufgaben, die der Steuerungsebene zugeordnet werden. Technische Realisierungen der Steuerungsebene sind die Automatisierungsgerätesteuerungen.

Aktor-/Sensorebene

Die Interaktion zwischen Prozess und Steuerung erfolgt durch Aktoren und Sensoren. Aufgabe der Sensoren (Messwertaufnehmer) ist es, Prozessparameter in Informationen umzuwandeln. Durch Aktoren (Stellglieder) werden Informationen in physikalische Größen überführt, die den Prozess beeinflussen.

Durch die zunehmende Vernetzung technischer Komponenten im Produktionsprozess wird jedoch zukünftig eine Auflösung dieser Automatisierungspyramide erwartet (vgl. [VOGE09]) bzw. bereits heute festgestellt. Durch die wesentlich größere Menge an Informationen über jeden einzelnen Produktionsprozess kann in kürzerer Zeit auf Störungen reagiert werden. Während die Planungsebene aufgrund ihres langfristigen bis strategischen Charakters in ihrer Form weitgehend Bestand haben wird, ist von der Leitebene abwärts eine zunehmende Verschmelzung der Ebenen zu erwarten (vgl. [BREC13]). Dieser Effekt wird dabei auch als „Auflösung der Automatisierungspyramide“ [BAUE16] bezeichnet. Eine Erhöhung der Informationsmenge ergibt sich in der beschriebenen Entwicklung für jede der bisherigen Ebenen.

14.2 Unternehmensebene

Die betriebswirtschaftliche Einplanung von Unternehmensressourcen wird in produzierenden Unternehmen softwareseitig durch sogenannte ERP-Systeme unterstützt.

Der Ursprung der ERP-Systeme reicht dabei zurück bis zu den Software-Prozessoren für die Materialbedarfsrechnung (engl. Material Requirements Planning, MRP) der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts. Die Planung beschränkte sich dabei auf die Erstellung und Verwaltung von Stücklisten sowie einer bedarfs- oder verbrauchsorientierten Planung. Die Berechnungen basierten dabei auf der Annahme von festen Materialverbrauchen und Produktionszeiten, ohne beispielsweise die Verfügbarkeiten von Maschinen in Betracht zu ziehen. Zur Berücksichtigung dieser fehlenden Aspekte wurden in den 1970er und 1980er Jahren die auch als Closed-Loop-MRP oder MRP II (engl. Manufacturing Resource Planning) bezeichneten Systeme entwickelt. Diese Systeme waren dabei bereits in der Lage, neben den vorhandenen Fertigungskapazitäten auch Lagerbestände zu berücksichtigen. In vielen produzierenden Unternehmen entwickelten sie sich zur Informationsquelle für viele verschiedene Bereiche neben der Planung und Steuerung, wie beispielsweise der Kostenkalkulation oder Beschaffung.

Um die dennoch bestehende Beschränkung der Systeme auf die fertigende Industrie aufzulösen, wurden in den 1990er Jahren die ERP-Systeme entwickelt. Die Umfirmierung auf „Enterprise“ drückt dabei bereits den Einbezug der generellen geschäftlichen Aktivitäten wie Controlling oder Human Resources aus. ERP-Systeme stellen damit häufig bis heute die informationstechnische Datenbasis für gesamte Unternehmung in vielen verschiedenen Industriebereichen dar.

Eine wesentliche Weiterentwicklung der Systeme in den letzten Jahren war die Erweiterung um Funktionalitäten zur Einbeziehung von Lieferanten (engl. Supply Chain Management, SCM). Diese Entwicklung liegt dabei hauptsächlich in reduzierten Fertigungstiefen und immer größeren Abhängigkeiten von Zulieferern begründet. Durch die Verbindung von verschiedenen ERP-Systemen über SCM-Module können Planungen und Optimierungen unter Einbezug der Kapazitäten von Zulieferern durchgeführt werden.

An das ERP-System gliedern sich noch eine Reihe weiterer Systeme zur Verarbeitung von Informations- und Materialflüssen an, beispielhaft seien hier mit dem Customer Relationship Management (CRM) und dem Product Lifecycle Management (PLM) zwei der größten Bereiche genannt.

Das CRM strukturiert und verwaltet die gesamte Kommunikation mit dem Kunden. Ursprünglich häufig ein Bestandteil von anderen Systemen, wie beispielsweise dem ERP-System, entwickelten sie sich durch eine steigende Anzahl von Informationskanälen mit Kunden zu eigenen Systemen. Heutige CRM-Systeme sind dabei nicht nur in der

Lage, Kundendaten zu speichern, sondern für die Planung und Steuerung sämtlicher Aktivitäten vor und nach dem Verkauf eines Produktes verantwortlich.

Die Auflösung der Trennung zwischen realer und virtuelle Produktentstehung steht im Fokus der Entwicklung von PLM-Systemen. Einer der wichtigsten Bestandteile eines ERP-Systems ist dabei die Produktdatenverwaltung (engl. Product Data Management, PDM). Die Hauptverbindung zu ERP-Systemen besteht daher auch in der Verwaltung von Stücklisten und Stammdaten für Produkte.

Sowohl für CRM- als auch für PLM-Systeme gilt dabei, dass keine strikte Trennung vorhanden sein muss bzw. gar nicht möglich ist. Die Rechnungsstellung als einer der Gründe für die Einführung eines ERP-Systems steht in direktem Zusammenhang mit den Kunden und somit mit CRM-Systemen.

14.2.1 ERP-Systeme

Aufgrund der genannten Entwicklung von ERP-Systemen ist eine exakte Definition des Begriffs schwierig. Gemein ist jedoch allen Lösungen, dass sie als betriebswirtschaftliche Standardsoftware einer großen Anzahl an Anwendern zugänglich sein soll. ERP-Systeme müssen sämtliche operativen und administrativen Prozesse in einer gemeinsamen Datenbasis integrieren. Nur so werden die ERP-Systeme in die Lage versetzt, die betriebswirtschaftlichen und technischen Aufgaben in einem Unternehmen zu unterstützen [BOYW12].

Die Fülle an Aufgaben, die von einem ERP-System erfüllt werden müssen, spiegelt sich dabei auch in der Anzahl an verschiedenen Systemen wieder. Aktuell werden hierbei über 700 verschiedene Produkte von ca. 540 Anbietern gelistet [TROV17]. Der Markt ist jedoch sehr konsolidiert: Knapp die Hälfte aller installierten Systeme stammen dabei von SAP, gefolgt von Microsoft mit ca. 20% Marktanteil [STEG11].

In der Vergangenheit handelte es sich meist um Lösungen, die innerhalb eines Unternehmens auf dedizierten Servern installiert wurden und über das lokale Intranet zugänglich waren. Die zunehmende Verbreitung von webbasierten Lösungen führte jedoch zu einer Schnittstellenbildung für den Zugriff von außerhalb und befähigte damit auch die einfachere Integration von Kunden bzw. Zulieferern. Die neuesten Entwicklungen stellen Cloud-basierte ERP-Lösungen dar, bei denen die IT-Infrastruktur extern bereitgestellt und gewartet werden kann. Die ERP-Systeme können dabei als Dienst auf Anfrage zugänglich gemacht werden.

14.2.1.1 Funktionalitäten eines ERP-Systems

Hinsichtlich des Spezifikationsumfangs von ERP-Systemen stellt die große Varianz an verfügbaren Systemen eine Schwierigkeit in der genauen Definition dar. Bild 14.3 gliedert hierzu die Funktionalitäten in Module und verdeutlicht damit den Bezug zu den verschiedenen Entitäten innerhalb eines Unternehmens. Das Gesamtsystem umfasst dabei innerbetrieblich die Bereiche des Finanz- und Rechnungswesens, der Materialwirtschaft, Produktion, Vertrieb und Personalwirtschaft. Zur außerbetrieblichen Kommunikation existieren die Module für Lieferantenbeziehungen, Supply Chain Management, Kundenbeziehungen und elektronische Marktbeziehungen. Die grundlegenden Eigenschaften von ERP-Systemen, mit denen eine große Anzahl verschiedener Kunden adressiert werden soll, müssen dabei sehr generisch gestaltet sein. Zur Vereinfachung werden ERP-Systeme meist in Konzernsysteme und Systeme für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) eingeteilt.

Bei Konzernen steht meist als Anforderung an das ERP-System im Vordergrund, die große Fülle an bestehenden Geschäftsprozessen abzubilden. Hierzu müssen über entsprechende Programmierschnittstellen die jeweiligen Abläufe in der IT-Struktur des ERP-Systems hinterlegt werden (vgl. auch ▶ Kap. 14.1). Für die konkrete Umsetzung sei hierzu auf ▶ Kap. 14.2.1.3 verwiesen, vorweggreifend kann jedoch gesagt werden, dass die Implementierung und Anwendung dieser Prozesse mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden ist.

Die genannten Aufwände sind in der Vergangenheit oft ein Hinderungsgrund für KMU gewesen, ERP-Lösungen einzusetzen. Zwar sind die Geschäftsprozesse bei KMU oft ähnlich komplex, aufgrund einer reduzierten Anzahl an im Unternehmen tätigen Personen jedoch schneller und leichter durchführbar. Bei KMU-Systemen wird daher eine Reduktion der Komplexität und Funktionalitäten vorgenommen und somit die Hürde zur Einführung der Systeme gesenkt.

14.2.1.2 Modularität von ERP-Systemen

Aufgrund der Vielfalt an möglichen Funktionen und der Breite des Einsatzes in verschiedenen Branchen, werden ERP-Systeme üblicherweise in die Hauptelemente

- Kundenauftragsbearbeitung,
- Bestandsführung,
- Einkauf,
- Rechnungsprüfung,
- Fertigungssteuerung und
- Disposition

gegliedert [OSTE14].

Das Modul Kundenauftragsbearbeitung bezieht sich auf den Prozess von der Anfrage des Kunden bis hin zur Auslieferung des Produktes. Dazwischen findet eine Reihe von Prozessen, wie Produktentwicklung, Fertigung, Materialwirtschaft etc. statt. Die Kundenauftragsbearbeitung wird häufig durch Marketing-Prozesse, wie z. B. Werbung, ergänzt. Eine Schnittstelle zu der übergeordneten Unternehmens- und Produktplanung ergänzt die Anbindung dieses Moduls innerhalb eines Unternehmens.

Das Modul Bestandsführung ist ein Querschnittsmodul,

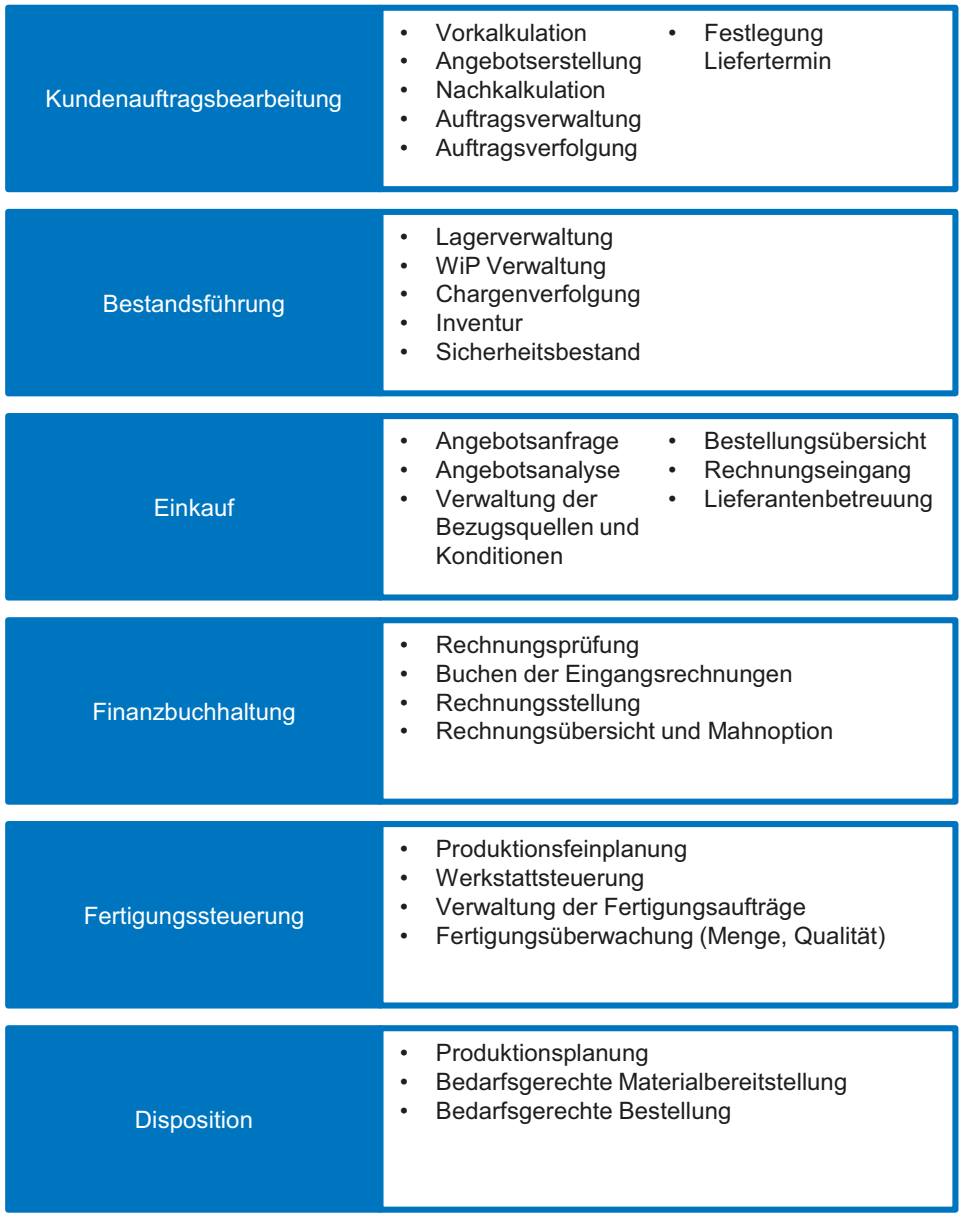


Bild 14.3 Gliederung der ERP-Funktionalität in Module

das von nahezu allen anderen Modulen verwendet wird. Die Verwaltung der Warenbewegungen, d. h. Ein- und Auslagerung, Bestandsbewertung etc. mit dem Ziel der immer korrekten Lagerbestandsausweisung stehen hier im Fokus.

Im Modul Einkauf wird der Beschaffungsprozess organisiert. Alle Lieferanten werden regelmäßig in Bezug auf ihre Qualität, ihre Termintreue und ihre Preise bewertet. Auf dieser Grundlage werden neue Rahmenverträge vereinbart und bestehende angepasst. Lieferzeiten werden in der Produktionsplanung berücksichtigt und im Rahmen der Disposition werden Bestellungen ausgelöst.

Das Modul Rechnungsprüfung prüft die inhaltliche und formale Richtigkeit der eingehenden Rechnungen für Dienstleistungen und Einkäufe. Erst nach der Freigabe können Rechnungen kontiert und gebucht werden.

Im Modul Fertigungssteuerung findet die zentrale Organisation aller Abläufe innerhalb der Fertigung statt. Der Produktionsablauf wird im Hinblick auf verschiedene Kriterien wie Durchlaufzeiten, Stillstandzeiten etc. optimiert. Maschinenzustände und Bearbeitungsstatus werden der Fertigungssteuerung zurückgemeldet, sodass diese auf ungeplante Ereignisse regieren kann und Maßnahmen ergreift, um die Produktionsziele weiterhin bestmöglich zu erfüllen.

Das Modul Disposition führt die initiale Produktionsplanung durch, welche durch die Fertigungssteuerung verfeinert und bei Komplikationen optimiert wird. Ergebnis der Disposition sind externe und interne Liefertermine für Endprodukte, Halbzeuge und Komponenten.

14.2.1.3 Einführung eines ERP-Systems

Die Einführung eines unternehmensweiten ERP-Systems gliedert sich üblicherweise in drei Phasen:

1. Basis-ERP,
2. Supply-Chain-Integration,
3. Erweiterungen und Verbesserungen zur Unterstützung der Unternehmensstrategie.

Einer der Hauptgründe für die dreiphasige Implementierung ist die Größe eines gesamten ERP-Systems. Häufig wird diese dreigeteilte Gliederung noch wesentlich weiter aufgeschlüsselt. In einer feineren Aufgliederung gibt es dabei dann häufig auch Tätigkeiten, die in mehreren der drei Phasen erfolgen, die Hauptergebnisse jeder Phase bauen jedoch aufeinander auf. Im Folgenden werden die Haupttätigkeiten in jeder Phase weiter aufgeschlüsselt.

Basis-ERP

Die Implementierung des Basis-ERP umfasst Funktionalitäten zur groben Absatz-, Produktions-, Kapazitäts- und Nachfrageplanung, dem Material Requirements Planning sowie dem Master Scheduling. Zudem werden unterstützende Funktionen zur Erhöhung der Genauigkeit im Inventar, zur Strukturierung und zur Genauigkeit von Stücklisten sowie dem Aufbau von Rückkopplungsschleifen aus der Produktion bzw. dem Einkauf integriert.

Die Implementierung eines Basis-ERP umfasst somit bei weitem nicht alle möglichen Funktionen eines ERP. Es handelt sich dennoch um ein System mit mehr Funktionen als ein reines MRP-Werkzeug und legt die organisatorischen Grundlagen.

Supply-Chain-Integration

Der Fokus der zweiten Phase liegt im Aufbau von Prozessen, die das ERP sowohl vor- als auch rückwärts in die Lieferkette integrieren. Rückwärts gerichtet bedeutet dies die Anbindung von Zulieferern beispielsweise über Business-to-Business-Portale, die vorwärts gerichteten beziehen sich auf Prozesse wie beispielsweise das Vendor Managed Inventory, bei der ein Lieferant Einfluss auf die Lagerhaltung eines Händlers ausübt.

Erweiterungen und Verbesserungen zur Unterstützung der Unternehmensstrategie -Chain-Integration

Diese Phase umfasst die Erweiterung der ERP-Funktionalitäten in der gesamten Organisation. Hierbei kann es sich um die Finalisierung von noch nicht implementierten Einheiten handeln – beispielsweise innerhalb des Rechnungswesens. Zudem werden die Verbindungen zwischen bestehenden Einheiten und anderen Applikationen innerhalb dieser hergestellt.

Innerhalb der letzten Phase werden zudem Verbesserungen der implementierten Systeme angegangen, denen in den ersten Phasen entweder eine geringere Priorität zugeordnet wurde oder deren Notwendigkeit erst in diesen Phasen erkannt wurde. Hierzu gehören klassischerweise Funktionalitäten zur Simulation, Implementierung von Kennzahlensystemen zur Bewertung von Zulieferern oder sogar die Anbindung des ERP-Systems an ein Fertigungsleitsystem.

Während vor Beginn eines Projekts zur Implementierung eines ERP-Systems die ersten beiden Phasen recht leicht abschätzbar sind, ist für diese Phase gegenteiliges der Fall. Die Strukturiertheit der Phasen ist dabei abnehmend, insbesondere aufgrund der Tatsache, dass die folgenden Phasen vom Erfolg der vorherigen abhängig sind. Es muss allerdings beachtet werden, dass selbst die Implementierung der ersten Phase eine erhebliche Verbesserung innerhalb eines Unternehmens darstellen kann.

14.2.1.4 Aktuelle Entwicklungen von ERP-Systemen

Im Zuge aktueller Industrie-4.0 Aktivitäten entstehen in Bezug auf Vernetzung, Erreichbarkeit, Integration der IT-Struktur, Usability und Flexibilität neue Anforderungen an ERP-Systeme. Die Anbieter reagieren auf diese Anforderungen mit einer Vielzahl von Weiterentwicklungen und teilweise sogar mit vollständigen Neuauflagen ihrer Systeme. Die relevantesten Trends in der Entwicklung von ERP-Systemen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Einer der wichtigsten Aspekte der Industrie-4.0 Initiative ist die vollständige Vernetzung der Produktion. Die Stammdaten eines Unternehmens sind auch heute in ERP-Systemen enthalten und ERP-Systeme bilden seit ihrer Einführung die Schnittstelle zu anderen IT-Systemen auf der Unternehmensebene, wie z. B. CRM, HRM, FiBu etc. Diese Ausgangssituation führt dazu, dass ERP-Systeme die Vernetzung zwischen interner Produktion und Logistik auf der einen Seite und externen Daten (Lieferantendaten, Marktdaten, Kundeninformationen) auf der anderen Seite bestmöglich realisieren können [BING16].

Um Daten und Dienste eines ERP-Systems global zugängig zu machen, z. B. für die Unternehmensführung und den Kundendienst, werden Teile der Software in die Cloud verlagert. Auf eigenen Cloud Plattformen der ERP-Anbieter können außerdem Dienste zentral zur Verfügung gestellt werden und die ERP-Nutzer können bei Bedarf auf die Dienste zurückgreifen. Dies führt auch zu neuen Geschäftsmodellen für ERP-Systeme: Statt festen Laufzeitverträgen für Software auf lokalen Servern können Abonnements für bestimmte Dienste und Speicherkapazitäten abgeschlossen werden und eine Abrechnung nach Funktionsaufrufen ist möglich. Die Portierung von ERP-Anwendungen in die Cloud bietet außerdem die Möglichkeit, Systeme kostengünstig und einfach in ein Unternehmen einzuführen und flexibel an neue Umgebungsbedingungen anzupassen.

Ein weiterer Schwerpunkt aktueller Bemühungen liegt in den Bedienoberflächen der ERP-Systeme. Zum einen sind

durch die historische Entwicklung der ERP-Systeme sehr unübersichtliche und verschachtelte HMIs entstanden, die es aufzulösen und durch intuitiv bedienbare Oberflächen zu ersetzen gilt, zum anderen finden mobile Endgeräte in immer mehr Lebensbereichen Anwendung und werden auch Einzug in die Produktion erhalten. Hier werden derzeit unterschiedliche Ansätze verfolgt, da webbasierte Applikationen portabel auf unterschiedlichen Endgeräten Anwendung finden können, während nur gerätespezifische Anwendungen alle Technologien, wie z. B. Bilderkennung, nutzen können.

14.3 Betriebsleitebene

Die Betriebsleitebene umfasst alle direkt mit der Fertigung zusammenhängenden Prozesse in einem produzierenden Unternehmen. Sie verbindet damit die Unternehmensleitebene mit der Prozessebene. Hier werden Informationen aus der langfristigen Unternehmensplanung verarbeitet und an die Prozessleitebene weitergegeben. Ebenso werden Informationen aus der Prozessleitebene verdichtet und an die übergeordnete Unternehmensleitebene übermittelt.

14.3.1 Manufacturing Execution Systems

Die Komplexität der Fertigungsprozesse innerhalb produzierender Unternehmen nimmt ständig zu. Die IT-gestützte Überwachung der Fertigung mittels klassischer ERP- bzw. PPS-Systeme hat den Nachteil, dass die Rückmeldungen über Störungen in der Fertigung nicht in Echtzeit weitergegeben werden können. Die Regelschleifen auf der ERP-Ebene beginnen bei der Auftragseinsteuerung und enden mit der Rückmeldung über gefertigte Stückzahlen, gescheiterte Fertigungsprozesse und Fertigungskennzahlen. Ein Eingriff in Fertigungsprozesse und -abläufe kann nicht stattfinden, da hierfür benötigte Informationen aus der Fertigung fehlen. Um Störungen in Fertigungsprozessen rechtzeitig beseitigen zu können, müssen diese bereits während der Fertigung detektiert werden. Dies erfordert den Einsatz von IT-Systemen, die Rückmeldungen aus der Fertigung sammeln und dadurch die Beseitigung von Störungen ermöglichen. Zusätzlich werden Informationen aus der Fertigung verdichtet und an die übergeordnete Ebene weitergegeben.

Während die informationstechnische Unterstützung auf der Unternehmensleitebene als Stand der Technik gilt, ist die Ausweitung der IT-Unterstützung auf die Betriebsleitebene der nächste logische Schritt [FAYZ10]. Die vertikale Integration zwischen Fertigung und Unternehmensleitebene findet mit Hilfe der eingesetzten IT-Systeme statt, für die sich der Begriff Manufacturing Execution Systems (MES) eingebürgert hat. Die MES entwickeln sich zu einer Informations- und Datendrehscheibe innerhalb produzierender Unternehmen [SAUE10]. MES beinhalten die operative Planung, Steuerung und Überwachung der Fertigung. Dabei werden Lösungen zusammengefasst, die die Prozesse von der Auftragseinsteuerung bis zur Produktfertigstellung optimieren [POSS06; MESA97]. Ein MES stellt ein softwaretechnisch integriertes Computersystem dar, das alle für die Durchführung der Produktion notwendigen informationstechnischen Methoden und Werkzeuge enthält [POSS06; MACC97].

14.3.1.1 Aufgaben eines MES

In der Vergangenheit wurde versucht, den Funktionsumfang der MES zu standardisieren. Die Definition der MESA [MESA97] und die VDI-Richtlinie 5600 [VDI16] ordnen den MES ein breites Aufgabenspektrum zu. So umfassen MES die Aufgaben Auftragsmanagement, Feinplanung und Feinsteuerung, Betriebsmittelmanagement, Materialmanagement, Personalmanagement, Datenerfassung, Leistungsanalyse, Qualitätsmanagement Informationsmanagement und Energiemanagement. In der Praxis weicht der Funktionsumfang der vorhandenen MES von den genannten Definitionen ab und es werden viele unterschiedliche Softwarelösungen unter dem Begriff MES zusammengefasst [FAYZ10; KLET06].

14.3.1.2 Ausprägungen und Systemtypen

Unter den heutzutage angebotenen Lösungen können in der Regel drei Architekturtypen von MES identifiziert werden. MES können als eine Ergänzung zu vorhandenen PPS- bzw. ERP-Systemen aufgebaut sein (Bild 14.4). Diese Systeme werden durch bekannte ERP-Softwarehäuser und kleinere Dritthersteller, die ERP-Systemerweiterungen implementieren, angeboten [FAYZ10].

Häufig wird dabei auf bestehende ERP-Informationsmodelle zurückgegriffen. Diese werden um MES-spezifische Funktionen ergänzt. Der Vorteil dieser Lösung ist die einfache Kopplung der MES-Funktionen mit den bestehenden Unternehmensdatenbeständen und Prozessen [FAYZ10]. Typische Erweiterungen sind BDE-Systeme, Personalzeiterfassungsmodule, Lagerverwaltungssysteme, Werkzeugmanagement-Systeme, Qualitätssicherungssysteme und Planungsmodule. Trotz dieser Erweiterungen ist das in den Systemen enthaltene Informationsmodell im Kern für die Anforderungen der ERP-Ebene konzipiert und erfüllt daher nicht die Echtzeitanforderungen, die im Automatisierungsbereich anzutreffen sind. Die meisten ERP-Operationen entstammen dem Office-Bereich, wo Datenaktualisierungsraten von mehreren Minuten üblich sind. Eine durchgängige ereignisbasierte Datenaktualisierung ist ebenso wenig anzutreffen. Echtzeitkritische Daten aus dem Fertigungsbereich können daher nicht im ERP-Datenmodell festgehalten werden. Insbesondere die Anbindung von Steuerungen an ein ERP-basiertes MES ist kritisch zu betrachten, da die Randbedingungen aus dem Bereich der Automatisierungstechnik in ERP-Datenmodellen nicht ausreichend abgedeckt werden.

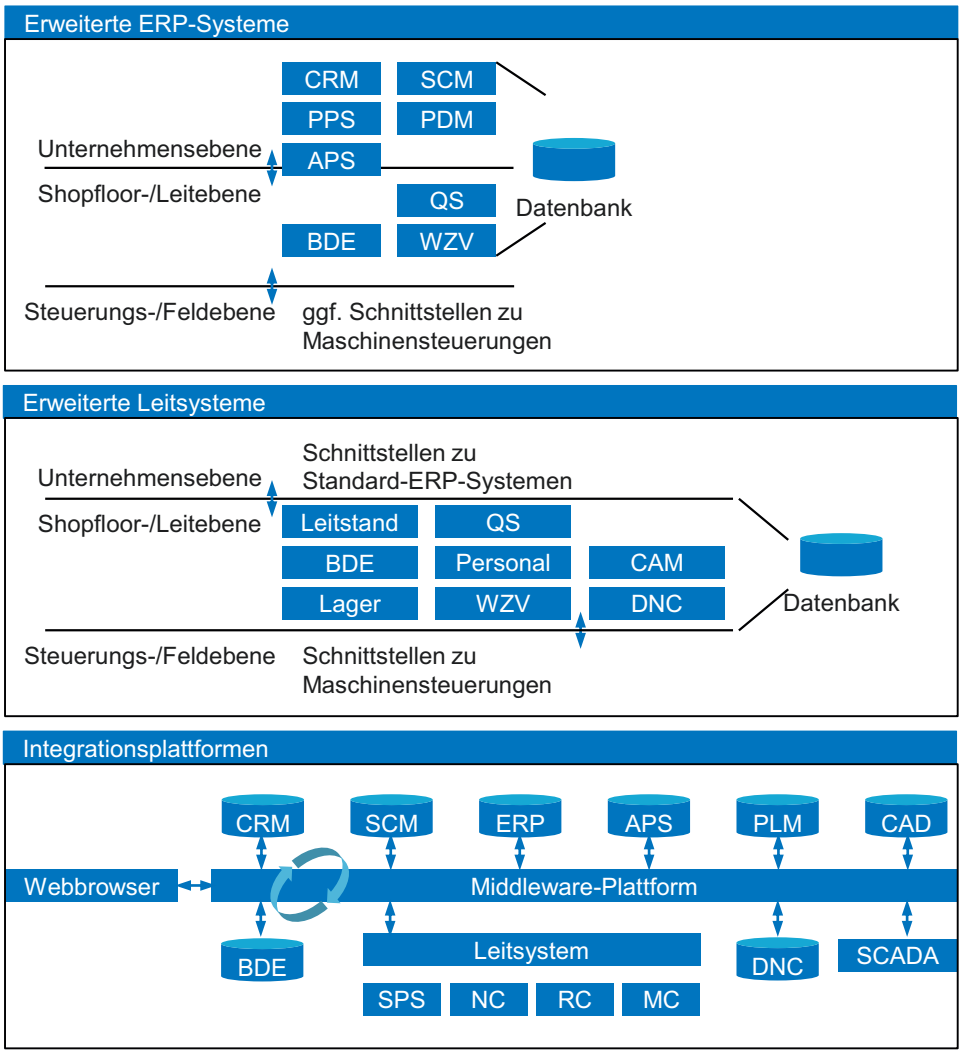


Bild 14.4 MES-Ausprägungen und Systemtypen. Nach [Weck03a]

Eine weitere Kategorie bilden MES, die aus Werkstatt-Anwendungen hervorgegangen sind. Diese Systeme haben ihren Ursprung in der Betriebs-, Maschinen-, Qualitäts- und Logistikdatenerfassung sowie Leitständen und SCADA-Systemen (kurz für Supervisory Control And Data Aquisition). Den Schwerpunkt bilden hier die maschinennahe Einbindung des MES und die Erfassung der Ist-Zustände einzelner Maschinen. Funktionen wie die Werkzeug-, Lager- und Bearbeitungsprogrammverwaltung, die mittels eigener Datenmodelle realisiert werden, bilden hier den Schwerpunkt. Diese oft proprietären Datenhaltungen erschweren die Anbindung an übergeordnete ERP-Systeme, da Schnittstellen einzeln erstellt und angepasst werden müssen. Zudem müssen Informationen aus der Werkstattebene verdichtet werden. Zu dieser Kategorie gehören auch Erweiterungen von Maschinensteuerungen, die Betriebsdatenerfassung (BDE), Maschinendatenerfassung (MDE) oder Werkzeugverwaltungsfunktionen sowie Funktionen zur Verwaltung von Bearbeitungsprogrammen sowie zur Instandhaltung anbieten.

Die letzte Systemkategorie bilden Plattformen, die die Integration heterogener maschinennaher und maschinenferner IT-Systeme zum Ziel haben. Diese Plattformen sollen den Informationsaustausch zwischen Anwendungen aus dem Werkstattbereich und der übergeordneten Anwendungssoftware vereinfachen. Den Fokus bilden hier nicht neue Funktionen, sondern die Weiterleitung von Systemereignissen, Verwaltung der Daten sowie die Synchronisierung von Datenbeständen [FAYZ10; WECK03].

14.3.2 Fertigungsleitsysteme

Laut Definition beinhalten MES auch die Funktionalität von Fertigungsleitsystemen. Im Unterschied zu MES werden diese jedoch ausschließlich in der vollautomatisierten Stückgutfertigung eingesetzt und beziehen sich nur auf einzelne Fertigungsanlagen [POSS06]. Im Bereich der flexibel automatisierten Fertigung werden Fertigungsleitsysteme auch als Ergänzung zu MES eingesetzt, da sie als

dedizierte Lösungen eine enge Integration mit der Steuerungs- und der Feldebene ermöglichen und für komplexe Steuerungsaufgaben sowie individuelle Anlagenkonzepte besser geeignet sind [FAYZ10].

Während in den fertigungsvorbereitenden Bereichen schon lange EDV-Systeme im Einsatz waren, setzte die Rechnerunterstützung im Bereich der Fertigungsleitsysteme erst sehr spät ein. Ein Grund dafür war, dass die kaufmännischen Anforderungen zunächst den Einsatz von EDV-Systemen in den planerischen Bereichen erforderten. Zur Erfassung der für die Planung und Kostenrechnung erforderlichen Daten wurden diese Systeme bis in den Bereich der Fertigung erweitert und sind heute unter dem Begriff Werkstattsteuerungssysteme bekannt. Ein anderer Grund war der Aufbau der damals eingesetzten Maschinensteuerungen, die einen direkten Anschluss an einen externen Rechner im Allgemeinen nicht vorsahen. Die Entwicklungen im Bereich der NC-Steuerungen haben jedoch dazu geführt, dass heute sogenannte flexible Fertigungssysteme (FFS) und flexible Fertigungszellen (FFZ), das sind vollautomatische, rechnergeführte Ein- oder Mehrmaschinensysteme, realisiert werden können. Die zur Steuerung eingesetzten EDV-Systeme werden als Fertigungsleitrechner bezeichnet und umfassen neben der Direktführung der angeschlossenen Maschinen auch Funktionen zum automatischen Transportieren, Handhaben und Lagern. Diese komplexe Funktionalität wird unter dem Begriff automatisierte Produktion zusammengefasst.

Da in den heutigen Unternehmen im Allgemeinen Mischformen von konventioneller und automatisierter Fertigung vorhanden sind, nähern sich die zunächst unterschiedlichen Systeme Werkstattsteuerung und Fertigungsleitrechner immer weiter an. Von modernen Fertigungsleitsystemen wird erwartet, dass der Aufbau ihrer Software eine individuelle Anpassung an unterschiedliche Fertigungsstrukturen ermöglicht.

Spricht man heute von computergestützter Produktion, ist darunter nicht nur die vollautomatisierte Steuerung flexibler Fertigungssysteme, sondern ganz allgemein die EDV-Unterstützung im Bereich der Fertigungssteuerung zu verstehen. Dies umfasst je nach Ausbaustufe die Feinplanung der vom PPS-System vorgegebenen Fertigungsaufträge, die zeitgerechte und optimierte Bereitstellung von Material, Fertigungshilfsmittel und Informationen (z. B. NC-Programme), die Erfassung von Betriebsdaten sowie die manuelle, halbautomatische oder automatische Steuerung von Fertigungs-, Handhabungs-, Transport- und Lagervorgängen.

14.3.2.1 Technische Systemkonzepte

Fertigungsleitsysteme können auf Grundlage zwei unterschiedlicher Systeme realisiert werden. Die übergeordneten Ebenen werden typischerweise PC-basiert implementiert, während die untergeordneten Ebenen SPS-basiert umgesetzt sind. Da Fertigungsleitsysteme die Schnittstelle bilden, können sie beide Systemkonzepte aufgreifen und entstehen PC- oder SPS-basiert [FAYZ10].

Der Vorteil SPS-basierter Fertigungsleitsysteme liegt in den geringen Kosten und der Echtzeitfähigkeit. Durch den robusten Aufbau, der die Systeme in der Flexibilität einschränkt, und die Echtzeitfähigkeit sind SPS-basierte Fertigungsleitsysteme das verbreitetere Konzept für sicherheitskritische Anwendungen.

Die Alternative zu SPS-basierten Fertigungsleitsystemen stellen PC-basierte Fertigungsleitsysteme dar. Sie werden als Software auf einem IPC betrieben, der mit den Feldgeräten verbunden wird. PC-basierte Systeme sind weniger robust, bieten aber eine viel höhere Flexibilität und können komplexe Prozesse besser beherrschen.

14.3.2.2 DNC (Distributed Numerical Control)

Geschichtliche Entwicklung

Auf das Ende der neunzehnhundertsechziger Jahre gehen die Ursprünge der informationstechnischen Integration numerisch gesteuerter Arbeitsmaschinen in Fertigungssystemen zurück. Arbeitsmaschinensteuerungen besaßen damals noch keine internen NC-Programmspeicher. Die NC-Programme mussten auf einem als Speichermedium dienenden Datenträger den Arbeitsmaschinensteuerungen zur Verfügung gestellt werden. Sie wurden von diesen satzweise eingelesen. In der rauen Werkstattumgebung erwiesen sich die früher als Datenträger verwendeten Papierlochstreifen jedoch immer wieder als Störungsquelle. Bei großen Teilespektren bereitete außerdem ihre Nutzung und Lagerung erhebliche organisatorische Probleme. Daher wurden Ende der neunzehnhundertsechziger Jahre in den USA, in Deutschland (z. B. von AEG, Siemens) und in Japan Fertigungssysteme erfolgreich erprobt, in denen die Datenübertragung mit dem Datenträger „Lochstreifen“ ersetzt wurde. Über elektrische Datenübertragungsmedien wurden die numerisch gesteuerten Arbeitsmaschinen direkt mit Fertigungsrechnern verbunden. Dies geschah, indem die schon vorhandene elektrische Schnittstelle zum Lochstreifenleser genutzt wurde. Es entstand die sogenannte Behind-Tape-Reader-Schnittstelle (BTR). Die Fertigungsrechner wurden als NC-Programm- und Datenspeicher genutzt. Außerdem erfolgte durch sie zeitgerecht, d. h. entsprechend dem Arbeitsfortschritt der zu versorgenden Arbeitsmaschine, die satzweise Versorgung der Arbeitsmaschinensteuerungen mit Steuerinformationen. Als Bezeichnung für die entstehenden hierarchisch strukturierten Programm- und Datenverteilsysteme bürgerte sich weltweit der Begriff DNC-System ein. Ursprünglich stand das Akronym DNC für Direct Numerical Control [DIN83; VDI72] und war mit

bestimmten Merkmalen der DNC-Systeme der ersten Generation verbunden. Der Begriff Direct Numerical Control trifft aber nicht die besondere Eigenart des Rechner-/Maschinenverbunds. Er wurde deswegen durch „Distributed Numerical Control“ ersetzt, da gerade die NC-Datenverteilung das Wesen moderner DNC-Systeme bestimmt [DIN96; NCG90; TÖNS89]. In den ersten DNC-Systemen verringerte sich einerseits durch die direkte Verbindung von Fertigungsrechnern und Arbeitsmaschinensteuerungen der hohe räumliche und organisatorische Aufwand bei der Verwaltung der NC-Programme, die im Allgemeinen in großen Lochstreifenbibliotheken abgelegt waren. Andererseits konnten die hohen Nebenzeiten, die sich bei der Lochstreifenerstellung und bei der Steuerdatenverteilung an die Arbeitsmaschinensteuerungen ergaben, reduziert werden. Letztgenanntes führte vor allem zu einer deutlichen Verringerung der Dauer des Änderungszyklus von NC-Programmen [KLEM86].

DNC-System

Moderne DNC-Systeme sind in den Informationsfluss eines Fertigungssystems integriert und verfügen über Schnittstellen zu einer heterogenen Umgebung von NC-Steuerungen und wahlweise zu einem CAM-Server sowie Fertigungsleitrechner (Bild 14.5).

Zur Datenübertragung werden primär Industrial-Ethernet- teilweise auch Wireless-LAN Netzwerke eingesetzt. Die Kompatibilität mit älteren Maschinen und Steuerungen wird durch universelle Datenkommunikationsfunktionen wie CSMA/CD- [PRIT91] oder auf Token-Passing-Bus-Basis [AEG88; SIEM91] sowie durch genormte Feldbusse, wie dem PDV-Bus nach DIN 19241 [AEG88] oder dem Profibus nach DIN 19245 und nicht genormte Feldbusse [ROBE87], abgedeckt. Der CAM-Server dient als Datenquelle und generiert aus den CAD-Daten die entsprechenden NC-Programme, inklusive ihrer Werkzeugdaten, Korrekturwerte und Nullpunkttabellen. Das DNC-System wird auf einem Standard-Industrie-PC mit Touch Screen betrieben. In Kombination mit 3D-CAD-Zeichnungen von Aufspannungen, Werkzeugen und dem zu fertigenden Werkstück wird der Maschinenbediener bei der Bedienung der DNC-Funktionalität bzw. der Administration der NC-Daten unterstützt. Hierbei werden DNC-Grundfunktionen und erweiterte Funktionen unterschieden (Bild 14.6).

Zu den Grundfunktionen gehören die NC-Programmverwaltung und die NC-Datenverteilung. Die erweiterten Funktionen ermöglichen die NC-Datenkorrektur sowie die manuelle NC-Programmerstellung. Eventuelle Modifikationen am manuell erstellten bzw. durch CAM generierten NC-Programm können entweder durch den Maschinenbediener an der Maschine getestet oder in einer Abtragssimulation (Beispiel: eM-RealNC) virtuell validiert werden. Ein integriertes Versionsmanagement überwacht dabei die Datenmodifikation und stellt eine konsistente Datenhaltung sicher. Wird ein DNC-System im Verbund eines flexiblen Fertigungssystems (FFS) eingesetzt, kann die DNC-Funktionalität über einen Fertigungsleitrechner ferngesteuert werden. Hierzu stehen Teilfunktionen der Fertigungsführung bereit, die die Übernahme von Vorgabedaten (Termin- und Arbeitsplänen), die Feindisposition sowie die

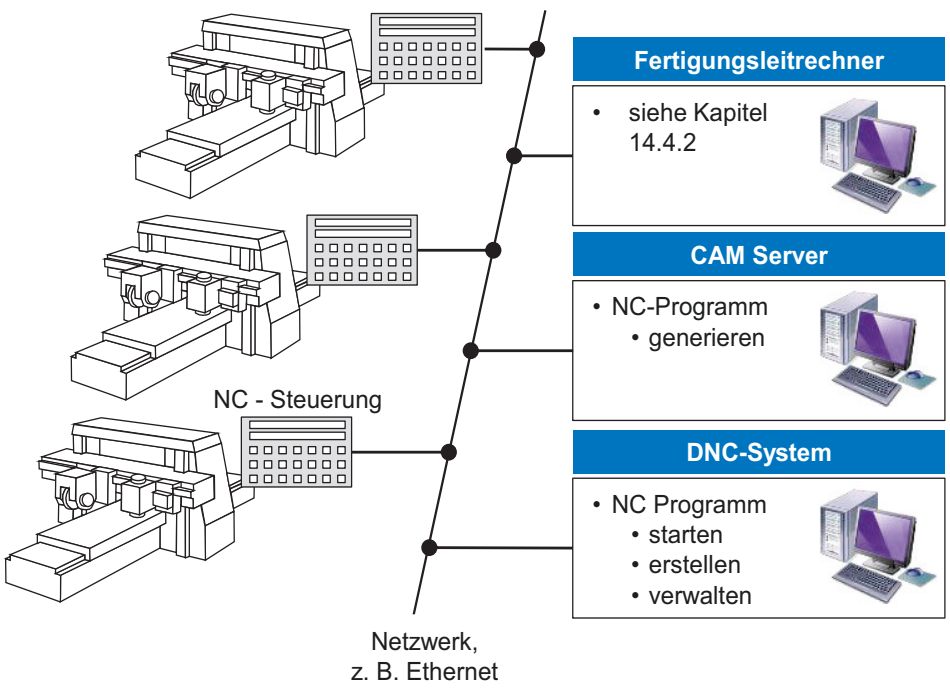


Bild 14.5 DNC-System im Fertigungsverbund

Bild 14.6 Funktionen eines DNC-Systems



Weitergabe von organisatorischen Steuerdaten ermöglicht. Weiterhin verfügen DNC-Systeme über Schnittstellen zur BDE und MDE. Technische und organisatorische Daten des Fertigungsprozesses können somit erfasst und zur Prozessüberwachung bzw. Prozesssteuerung weiterverarbeitet werden (vgl. ▶ Kap. 6).

14.3.2.3 Materialflusssteuerung

Die Materialflusssteuerung auf Werkstatt- bzw. Leitebene umfasst die Funktionen Verwalten, Lagern und Transportieren von Roh-, Halbfertig- und Fertigteilen sowie Transporthilfsmitteln (z. B. Paletten, Gitterboxen usw.). Funktional betrachtet kann die Materialflusssteuerung in die Teilfunktionen

- Disposition,
- Lagersteuerung und
- Transportsteuerung

unterteilt werden, Bild 14.7.

Von der Disposition werden alle Materialanforderungen entgegengenommen und mit den Beständen an Material und Transporthilfsmitteln abgeglichen. Nach der Festlegung des Bezugsortes werden Kommissionier- und Auslagerungsaufträge an die Kommissionierplätze und die Lagersteuerung übergeben. Für teil- oder fertigbearbeitete Werkstücke sowie Rohteile wird der Transport zur nächsten Bearbeitungsstation oder in ein Zwischenlager veranlasst. Bestandsänderungen werden an das überlagerte PPS-System gemeldet.

Die Lagersteuerung übernimmt die Ein- und Auslagerungsaufträge von der Disposition, prüft deren Plausibilität und veranlasst und überwacht die vom Lagerpersonal oder von automatisierten Lagerbediengeräten durchgeführten Ein- und Auslagerungsvorgänge. Aufgabe der Transportsteuerung ist die Organisation von Transporten zwischen Lagern, Arbeitsstationen und Puffern. Die Transportsteuerung verwaltet zu diesem Zweck Status und Standort der zugeord-

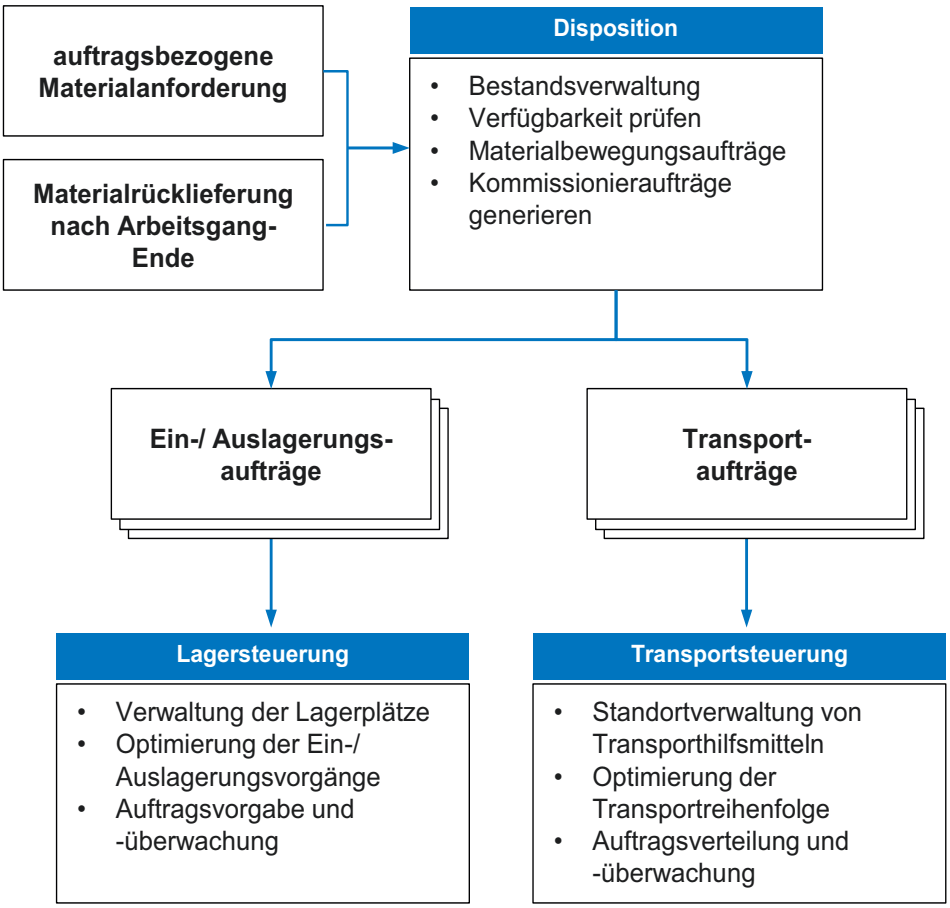


Bild 14.7 Aufgaben der Materialflusssteuerung

14

neten Transportsysteme, optimiert Transportwege, verteilt Transportaufträge und überwacht deren Durchführung.

14.3.2.4 Fertigungshilfsmittelorganisation

Die zeitgerechte Bereitstellung von Fertigungshilfsmitteln an den Arbeitsplätzen ist von zentraler Bedeutung im Bereich der Fertigung. Häufig kann ein Arbeitsgang nicht begonnen werden, da die vorbereitenden Tätigkeiten, wie z. B. Werkzeugmontage oder -voreinstellung, nicht abgeschlossen sind. Diese organisatorischen Stillstände können durch den Einsatz von IT-Systemen vermieden werden [WECK91].

Zu den Fertigungshilfsmitteln gehören neben Werkzeugen, Vorrichtungen, Greifern, usw. auch die Mess- und Prüfmittel. In den folgenden Abschnitten werden aufgrund ihrer besonderen Bedeutung lediglich Werkzeuge betrachtet. Eine Verallgemeinerung auf andere Fertigungshilfsmittel ist jedoch jederzeit möglich.

Das Werkzeugwesen kann allgemein in fünf Funktionsbereiche unterteilt werden:

- Werkzeugplanung,
- Werkzeugbewirtschaftung,
- Werkzeugdisposition,
- Werkzeugver- und -entsorgung sowie
- Werkzeugeinsatz.

Diese Bereiche sind in sich abgeschlossen und können den verschiedenen betrieblichen Ebenen zugeordnet werden, Bild 14.8.

Werkzeugplanung

Zentrale Aufgabe der Werkzeugplanung ist die Festlegung der unternehmensweit einzusetzenden Werkzeugtypen und der Aufbau eines betriebsweiten Werkzeugkatalogs. Im Rahmen der Werkzeugeinsatzplanung werden die zur Durchführung eines Arbeitsganges zu verwendenden Werkzeuge festgelegt.

Werkzeugbewirtschaftung

Die Werkzeugbewirtschaftung wird vom PPS-System durchgeführt und umfasst die Ermittlung langfristiger Werkzeugbedarfe, die Führung von Beständen und die Veranlassung der Beschaffung.

Werkzeugdisposition

Die Werkzeugdisposition ist auf Werkstattebene angesiedelt. Sie ermittelt im Rahmen eines kurz- bis mittelfristigen Planungshorizonts die auftragsbezogenen Werkzeugbedarfe

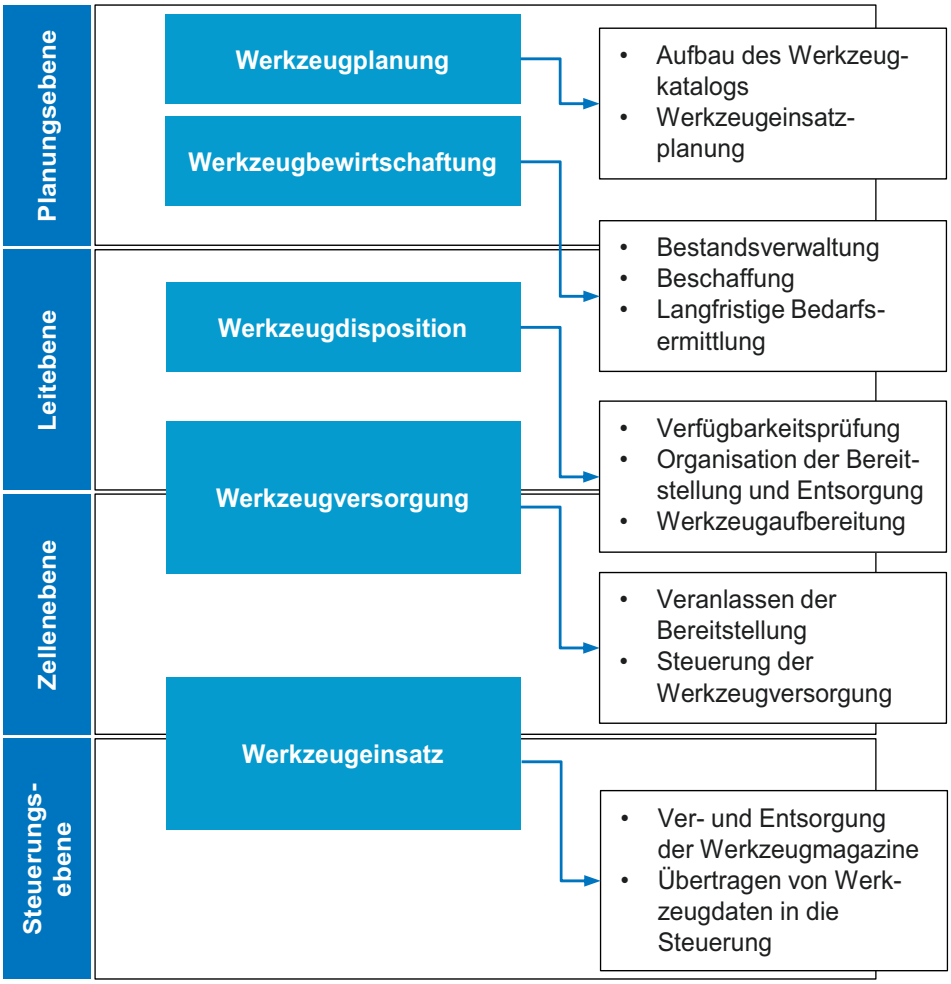


Bild 14.8 Einordnung des Werkzeugwesens in die betriebliche Ebenenstruktur

und koordiniert die zeitgerechte Bereitstellung an den Maschinen.

Anhand der vorliegenden Fertigungsaufträge werden die pro Arbeitsgang benötigten Bruttobedarfe ermittelt. Auf Basis der bereits an den Maschinen vorhandenen Werkzeuge wird der Nettobedarf berechnet. Nach der Überprüfung der Verfügbarkeit der Werkzeuge zum geplanten Einsatzzeitpunkt kann die Reservierung erfolgen. Die Koordinierung der termingerechten Werkzeugver- und -entsorgung spielt heute eine immer bedeutendere Rolle im Bereich der Fertigungssteuerung. Der im Bild 14.9 dargestellte Werkzeugkreislauf zeigt die einzelnen Stationen, die ein Werkzeug bis zum Einsatz und nach einem Einsatz zu durchlaufen hat.

Um eine termingerechte Bereitstellung der Werkzeuge zu ermöglichen, sind Bereitstellungswege unter Berücksichtigung der verfügbaren Personal- und Arbeitsplatzkapazitäten im Werkzeugbereich zu verplanen und zu optimieren. Zusätzlich müssen Störfallstrategien bereitgestellt werden, die Störungen (z. B. Werkzeugbruch) ausregeln können.

In den Anfängen unterstützten Werkzeugverwaltungssysteme im Wesentlichen die elementaren Funktionen der Werkzeugdisposition und -reservierung. Aktuelle Softwaresysteme (z. B. von TDM Systems) integrieren auch die vorausschauende Werkzeugplanung und -optimierung, während das Störfallmanagement bislang nicht Stand der Technik ist.

Werkzeugver- und -entsorgung

Die von der Werkzeugdisposition festgelegten Planungsdaten werden von der Werkzeugversorgung durchgesetzt. Dies umfasst sowohl die Veranlassung der Bereitstellung als auch die Steuerung der Werkzeugvor- und -aufbereitung. Die Aufträge können von einem Leitstand aus direkt an die Terminals der Arbeitsplätze, die im Werkzeugfluss liegen, übertragen oder in Form von Auftragslisten ausgedruckt werden.

Werkzeugeinsatz

Die Funktion Werkzeugeinsatz hat die Aufgabe, die Werkzeuge an die dafür vorgesehenen Plätze im Maschinenmaga-

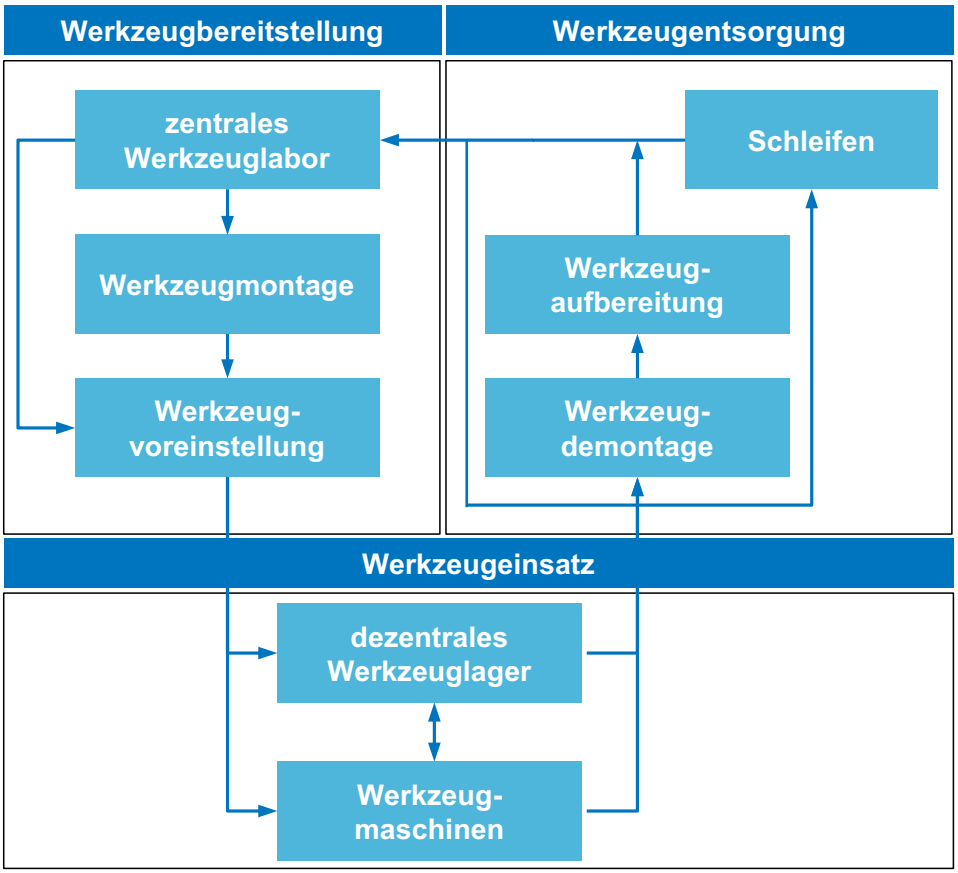


Bild 14.9 Stationen im Werkzeugkreislauf

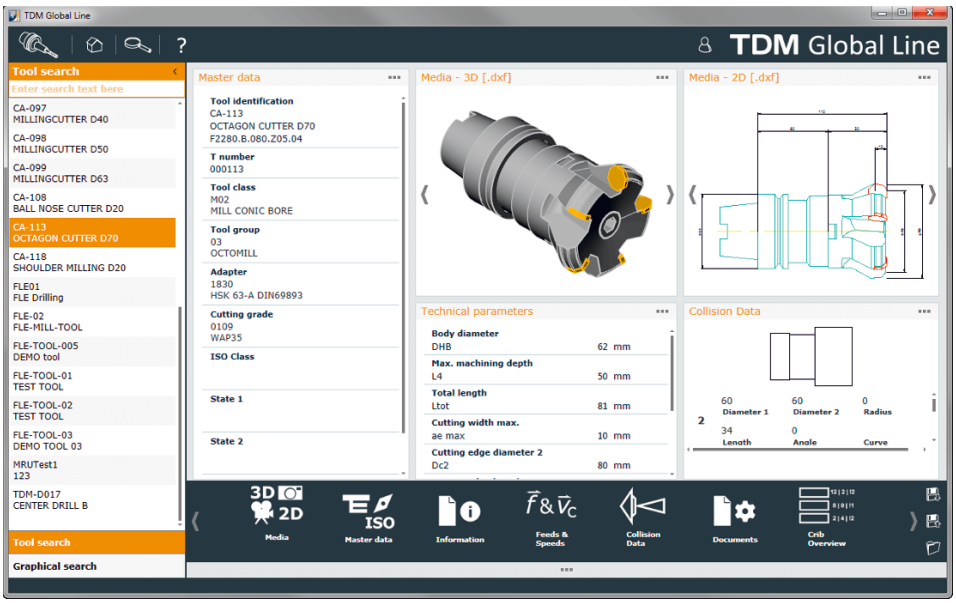


Bild 14.10 Werkzeugdatenblatt. Quelle: TDM Systems

zin zu übergeben und verschlissene Werkzeuge zu entnehmen. Zusätzlich werden werkzeugspezifische Daten in die NC-Steuerungen übertragen.

Werkzeuginformationssystem

Grundlage einer effizienten Werkzeugbewirtschaftung ist eine unternehmensweite Werkzeugdatenbank, in der die Stammdaten sämtlicher Werkzeuge bzw. Werkzeugkomponenten enthalten sind. Das Werkzeugverwaltungssystem übernimmt im Wesentlichen folgende Funktionen [ROBE88]:

- Verwaltung von Werkzeuglisten

Eine Werkzeugliste umfasst sämtliche für eine Teilebearbeitung notwendigen Komplettwerkzeuge.

- Verwaltung von Komplettwerkzeugen
  Stammdaten von Komplettwerkzeugen sind Geometriedaten, Technologiedaten und Werkzeug-Stücklisten.
- Verwaltung von Werkzeugkomponenten
  Stammdaten von Werkzeugkomponenten sind Geometrie-, Grafik- und Lieferantendaten.
- Drucken von Werkzeugblättern
- Generierung von Werkzeuggrafiken
  Aus den Grafiken der Einzelkomponenten kann automatisch eine Grafik des Komplettwerkzeugs erstellt werden.
- Erstellung von Verwendungsnachweisen
  Ein Verwendungsnachweis umfasst beispielsweise alle NC-Programme, in denen ein bestimmtes Werkzeug verwendet wird.

Zur Unterstützung des Bedieners beim Anlegen, Modifizieren oder Suchen von Werkzeugdaten stehen im Allgemeinen übersichtliche Bedienoberflächen zur Verfügung, Bild 14.10.

Betriebsdatenerfassung und -verarbeitung

Die Aufgabe der Betriebsdatenerfassung (BDE) ist es, alle erforderlichen Istdaten aus dem Fertigungsbereich zu sammeln und in verarbeitungsgerechter Form für die Produktionsplanung und -steuerung zur Ermittlung neuer Solldaten sowie für die Kostenrechnung und Materialwirtschaft als aktuelle Planungsgrundlage bereitzustellen. Darüber hinaus benötigt die Arbeitsplanung Erfahrungswerte. Für die Fertigungssteuerung und Qualitätsregelung basiert die operative Steuerung auf den Rückmeldungen der Bearbeitungsstationen, der Mess- und Prüfeinrichtungen und der Handarbeitsplätze.

Der Produktionsablauf kann bezüglich des organisatorischen Informationsflusses als ein mehrfach unterlagerter Regelkreis aufgefasst werden, der

- als Führungsgröße den Produktionsplan,
- als Regeleinrichtung die Fertigungssteuerung in den verschiedenen Ebenen,
- als Regelstrecke den Fertigungsprozess und
- als Regelgröße die Abweichung zwischen der Rückkopplung über die Betriebsdatenerfassung bzw. -verarbeitung und der Sollvorgabe

enthält, Bild 14.11.

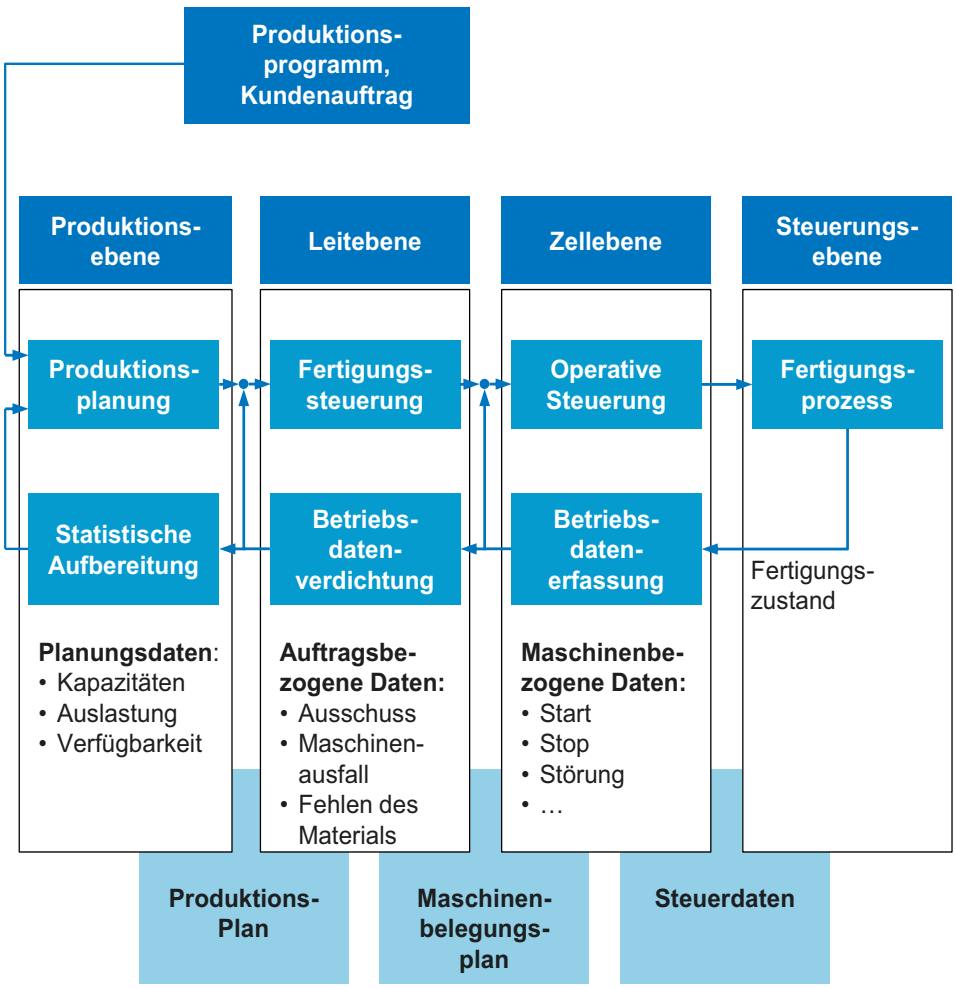


Bild 14.11 Der Fertigungsprozess als Regelkreis

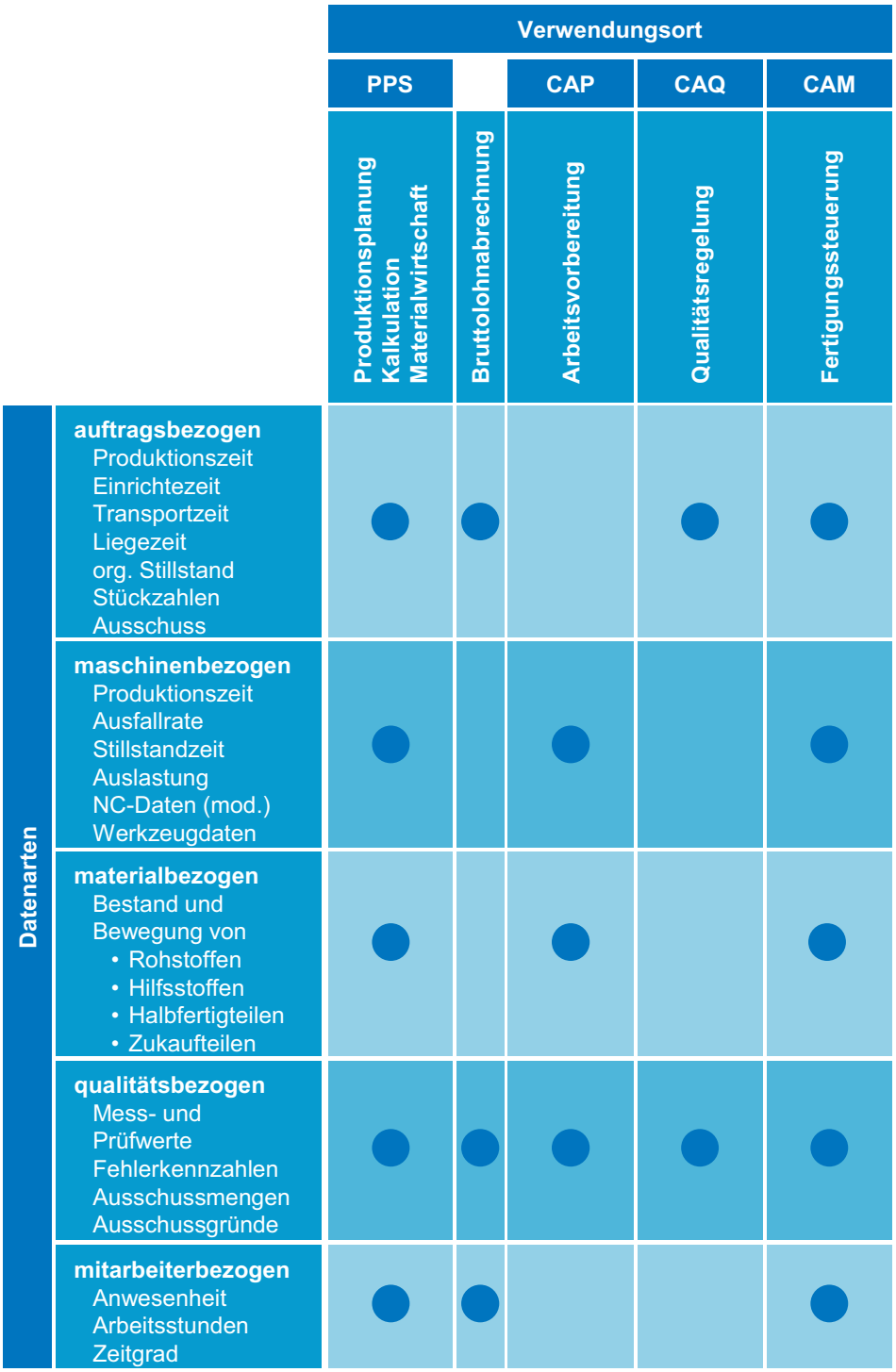


Bild 14.12 Gliederung und Verwendung von Betriebsdaten

14

Gliederung der Betriebsdaten und Begriffsdefinitionen

Betriebsdaten lassen sich, wie Bild 14.12 zeigt, nach ihrem Verwendungszweck und den anfallenden Datenarten gliedern. Unter Datenarten versteht man auftrags-, maschinen-, qualitäts- und mitarbeiterbezogene Rückmeldungen aus der Produktion. Die Erfassung der maschinenspezifischen Daten, wie z. B. Maschinenlaufzeiten, Stillstandszeiten und Störungsursachen, ist auch unter dem Begriff Maschinendatenerfassung bekannt. Die maschinen- und auftragsbezogenen Daten geben an zentraler Stelle jederzeit Aufschluss über laufende und gestörte Maschinen, den aktuellen Auftragsfortschritt und das anwesende Personal. Anhand dieser Daten können beispielsweise die Einhaltung der Auftragstermine kontrolliert, die Überlastung von Kapazitäten erkannt und eine geeignete Reaktion im Störungsfall veranlasst werden. Weiterhin werden die anfallenden Betriebsdaten zur Ermittlung von Durchlaufzeiten

und Auftragskosten sowie zur Berechnung des Arbeitslohnes herangezogen. Im Folgenden werden einige der wesentlichen Betriebsdaten aufgeführt [ECKE87]:

- Die Produktionszeit einer Bearbeitungsstation entspricht der Laufzeit des Bearbeitungsvorgangs vermindert um Stillstandszeiten.
- Unter Einrichtzeit ist der vom Leitsystem zu erfassende Zeitraum zur Abwicklung eines Einrichtauftrags zu verstehen.
- Eine Stillstandszeit ist der Zeitraum, in dem ein Fertigungssystem ganz oder teilweise nicht produziert. Maßgebend ist die Stillstandszeit der Bearbeitungsstationen, da ausschließlich sie direkt produzieren. Man unterscheidet technische Stillstandszeiten infolge einer technischen Störung und organisatorische Stillstandszeiten, die z. B. auf fehlende Fertigungshilfsmittel oder Werkstücke zurückzuführen sind.

Zur Auswertung der erfassten Zeiten muss eine Bezugszeit definiert werden. Unter der Bezugszeit versteht man die maximal für die Produktion nutzbare Zeit innerhalb einer Fertigungsperiode. Diese Zeit leitet sich ab aus:

- dem Betriebskalender, in dem die Arbeitstage, Feiertage und Ferien innerhalb eines Kalenderjahres aufgeführt werden,
- dem Schichtmodell, das für eine Kapazitätsgruppe oder eine einzelne Kapazität die Beginn- und Endzeiten der Schichten eines Arbeitstages enthält, und
- dem Pausenmodell, in dem alle Pausen innerhalb einer Schicht enthalten sind.

BDE-Terminals

Das Spektrum der käuflichen BDE-Terminals ist breit gefächert und reicht von einfachen, kompakten Terminals mit wenigen Funktionstasten bis zum industrietauglichen PC.

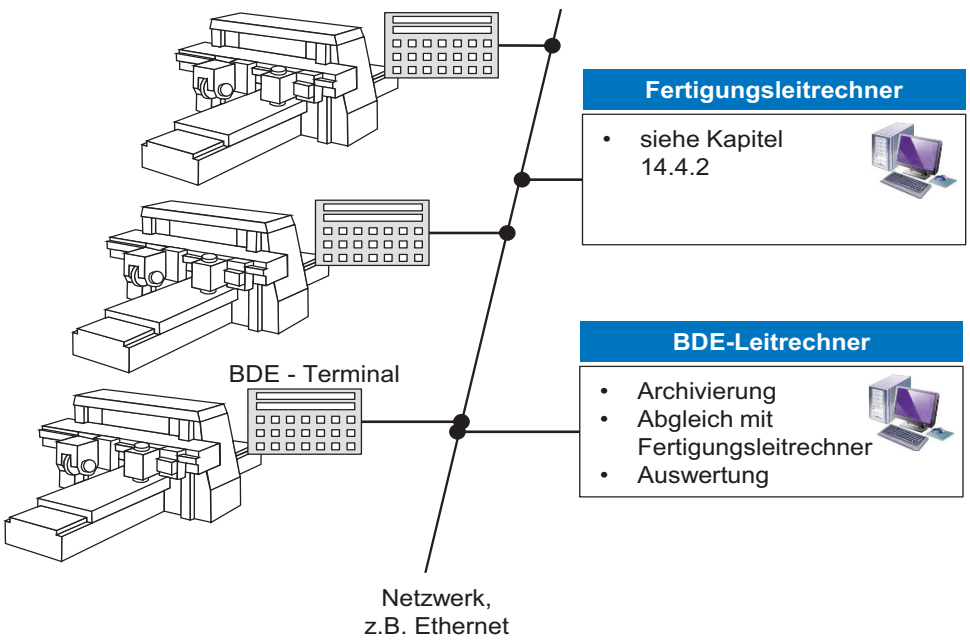


Bild 14.13 BDE-Terminal. Quelle: dormakaba Deutschland GmbH

Die Terminals können zusätzlich mit Ausweislesern für Magnet- oder Barcode sowie mit Barcode-Lesestiften für die Betriebsdatenerfassung ausgerüstet werden, Bild 14.13.

Welche Ausbaustufe eines BDE-Terminals letztendlich zum Einsatz kommt, hängt vom gewünschten Funktionsumfang ab. Viele BDE-Terminals bieten neben der eigentlichen

Bild 14.14 Integrierte BDE-Lösung



Betriebsdatenerfassung zusätzliche DNC-Funktionalitäten an. Bei diesen Geräten handelt es sich dann meist um PC-basierte Terminals (vgl. ► Kap. 11.2).

BDE-Terminals arbeiten im Verbund und sind an einen zentralen BDE-Rechner angeschlossen, der als Datenkonzentrator arbeitet und Auswertungsfunktionen zur Verfügung stellt, oder sie kommunizieren direkt mit einem übergeordneten Fertigungsleitrechner, ◘ Bild 14.14. Von den Terminal-Anbietern werden daher zahlreiche Schnittstellen von RS 232 bis hin zu Ethernet angeboten.

Funktionen der Betriebsdatenverarbeitung

Für den normalen Betrieb von BDE-Terminals müssen einige grundlegende Funktionen der Betriebsdatenverarbeitung vorhanden sein, die in der Regel automatisch ablaufen sollten. Hierzu zählen:

- Übernahme der Betriebsdaten aus dem Fertigungssystem und Archivierung,
- Aktualisierung der Betriebsdaten bei Ausfall und Wiederanlauf durch Abgleich mit dem übergeordneten Rechner,
- Verdichtung der Betriebsdatenbestände abgelaufener Fertigungsperioden (Schicht, Tag, Woche, Monat) in die Daten der nächstlängeren Periode und
- Übertragung der chronologisch sortierten Betriebsdaten an übergeordnete Rechner.

Eine übersichtliche Beurteilung des Systemgeschehens bieten grafisch darstellbare Statistiken. Hierzu gehört das Gantt- oder auch Laufzeitdiagramm, welches die Bearbeitungszeiten über der Zeitachse darstellt und im Rückblick Störungen und Engpässe aufzeigen kann.

◘ Bild 14.15 zeigt den Nutzungsreport einer Maschine, der einen Überblick über die Dauer verschiedener Tätigkeiten oder Störungen gibt. Weitere Auswertungsgrafiken sind z. B.:

- Auslastungsstatistik
  Die Auslastungsstatistik zeigt die Auslastung einer Einzelmaschine oder einer Kapazitätsgruppe auf einen bestimmten Zeitraum bezogen an.
- Fehlerstatistik
  Die Fehlerstatistik beruht auf der Fehlerzählung, getrennt nach Fehlerursachen, wobei auch die jeweilige Stillstandszeit der einzelnen Bearbeitungsstationen festgehalten wird.
- Fehlerhäufigkeitsverteilung
  Die Fehlerhäufigkeitsverteilung zeigt ein Histogramm, sortiert nach der Häufigkeit bestimmter Fehler innerhalb einer Periode. Zusammen mit einem Diagramm über die Aufteilung der technischen Stillstandszeit können signifikante Fehlerursachen ermittelt werden, deren Beseitigung den größten Effekt hinsichtlich der Erhöhung der Verfügbarkeit erzielen. Durch den Vergleich der Diagramme vor und nach einer Fehlerbehebungsmaßnahme kann deren Wirksamkeit überprüft werden.

14.3.3 Kommunikation in der Leittechnik

Die letzten dreißig Jahre waren geprägt von einer rasanten Entwicklung in der Computertechnologie. Die Automatisierungsgeräte und Rechner in der Fertigung und Qualitätssicherung verfügen deshalb heute in der Regel über eine vor wenigen Jahren noch kaum vorstellbare hohe Datenverarbeitungsleistung und Speicherkapazität und sind dennoch so kostengünstig wie noch nie zuvor. Das hat eine Dezentralisierung der Aufgabenbearbeitung bewirkt. Daten können und werden heute nach Möglichkeit prozessnah verarbeitet, d. h., sie werden dort verarbeitet, wo sie entstehen. Über geeignete Kommunikationseinrichtungen werden die „lokal" aufbereite-



◘ **Bild 14.15** Nutzungsreport einer Maschine. Quelle: MPDV

ten Daten zur Weiterverarbeitung an „Partner“ übermittelt. In den so entstehenden verteilten Datenverarbeitungssystemen kommt der Vernetzung der einzelnen Automatisierungsgeräte, Messgeräte und Rechner mittels serieller Bussysteme (lokale Netzwerke, Feldbusse) eine Schlüsselfunktion zu.

Bereits seit dem Beginn der achtziger Jahre werden zur informationstechnischen Verknüpfung von Komponenten in verteilten Datenverarbeitungssystemen Netzwerkkonzepte entwickelt. Aufgrund von unterschiedlichen technischen Anforderungen, aber auch wegen unternehmerischer Interessen der Hersteller ist aus diesen Netzwerkkonzepten mittlerweile eine unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht zu vertretende große Anzahl verschiedener serieller Bussysteme entstanden, die eine jeweils mehr oder weniger große Verbreitung gefunden haben. So enthält eine im April 1993 vom Zentralverband der elektrotechnischen Industrie e.V. (ZVEI) veröffentlichte Liste zirka 90 verschiedene Buskonzepte bzw. Bussysteme, die in der Bundesrepublik eingesetzt werden. Heutzutage entwickeln sich Bussysteme auf Ethernet-Basis zunehmend zum Stand der Technik.

14.3.3.1 Kommunikationssegmente des Fertigungsbereichs

Der Vergleich der vertikalen und horizontalen Informationsflüsse in den verschiedenen Ebenen eines Unternehmens zeigt unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der geforderten Datendurchsatzleistung, der zu übertragenden Datenmenge und des Übertragungs- bzw. Reaktionszeiterhaltens in den einzelnen Ebenen, ◘ Bild 14.16. Daher haben sich in den Unternehmen der Stückgut-Industrie in einem Evolutionsprozess vier unterschiedliche Kommunikationssegmente gebildet [FRIE93b; FRIE94]:

Für die Kommunikation auf der Aktor-/Sensor-Ebene, d. h. dem Datenaustausch zwischen Aktoren, Sensoren und Gerätesteuerungen, werden sogenannte Aktor-/Sensor-Feldbusse verwendet.

Die informationstechnische Verkettung der Automatisierungsgerätesteuerungen mit hierarchisch übergeordneten technischen Systemen der Leitebene erfolgt durch die sogenannten lokalen Zellennetzwerke bzw. System-Feldbusse.

Die Integration der verschiedenen Betriebsteile (Fertigungshallen, Bürogebäude) und deren Kommunikationseinrichtungen erfolgt auf der Leitebene über lokale Backbone-Netzwerke. Zur Vernetzung der technischen und administrativen Bürobereiche der Planungs- und Leitebene werden heute Büro-Netzwerke auf der Basis von lokalen Netzwerken verwendet.

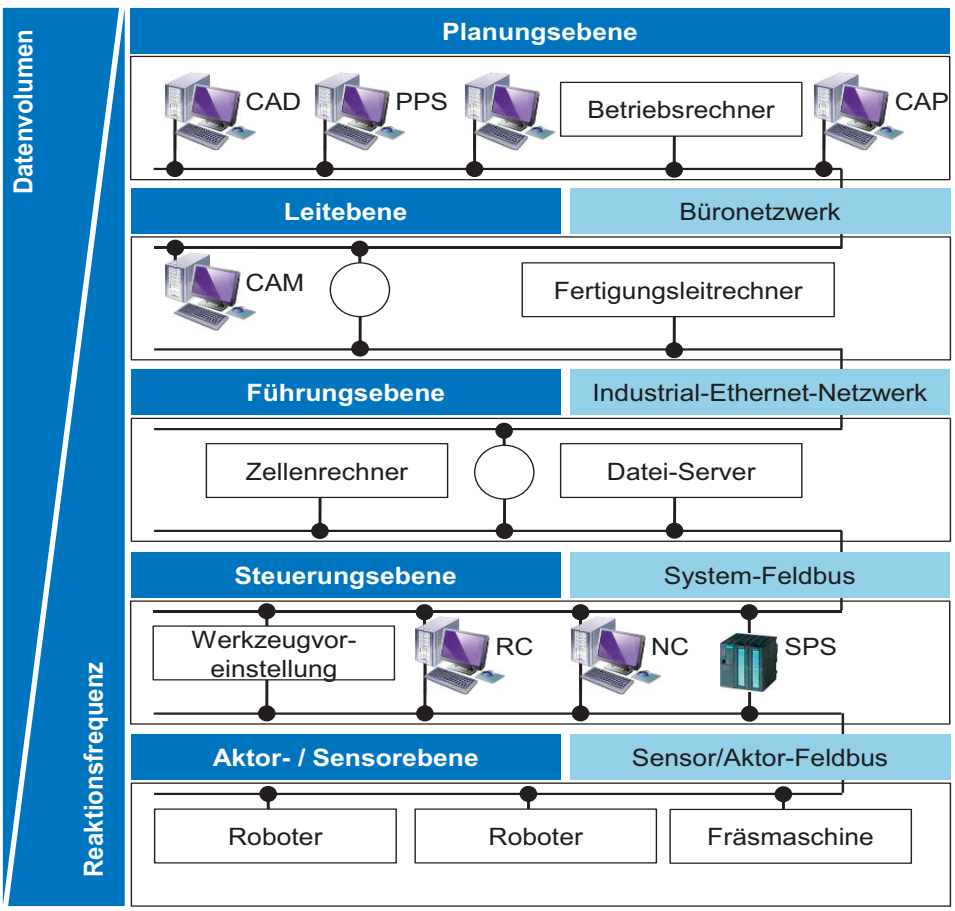


Bild 14.16 Kommunikationssysteme des Fertigungsbereichs

Aktor-/Sensor-Feldbusse (Abtastbusse)
Sind auf der Sensor-/Aktor-Ebene die verschiedenen Stellglieder und Messwertaufnehmer in zeitdiskrete Regelkreise eingebunden, so müssen die Daten zwischen ihnen und der jeweiligen Gerätesteuerung zyklisch übertragen werden. Hierbei müssen die Zykluszeiten wesentlich kleiner sein, als die für den Regelprozess charakteristischen Zeitkonstanten. Daher sind auf der Aktor-/Sensor-Ebene kurze Nachrichten mit einer Länge von nur wenigen Bit (ca. 10 bis 50 Bit) in einer Zeit von einigen Millisekunden (typisch <10 ms) zu übertragen und zu verarbeiten. Als Kommunikationseinrichtungen haben sich in den letzten Jahren in der Aktor-/Sensor-Ebene spezielle Feldbusse etabliert, die als Aktor-/Sensor-Busse bezeichnet werden. In der Literatur wird manchmal aufgrund der regelungs- bzw. messtechnischen Funktion dieser Busse die Bezeichnung „Abtastbusse" verwendet.

Ein typischer Vertreter aus der Gruppe der Aktor-/Sensor-Busse ist der genormte SERCOS-Bus, der zur Kommunikation zwischen Steuerungen und Antrieben in numerisch gesteuerten Maschinen konzipiert wurde. In deutschen Automobilen kommen ABUS, LIN, CAN-Bus und FlexRay zur Vernetzung der Aktoren und Sensoren zum Einsatz. Der Einsatz dieser Bussysteme erfolgt mittlerweile auch im industriellen Bereich bzw. ist für den Einsatz propagiert. Ein weiterer Vertreter ist der INTERBUS-S, der im Bereich der Vernetzung von Steuerungen, Antrieben und der Sensorik/Aktorik im Prozessdatenbereich eingesetzt wird (vgl. ► Kap. 5.3.5). Auf Basis des Echtzeit-Ethernet entstanden Bussysteme wie z. B. PROFINET oder EtherCAT (Firma Beckhoff, herstellerspezifisch).

Zellennetzwerke/System-Feldbusse
Auf der Steuerungsebene werden Nachrichten, wie beispielsweise Kommandos und Alarme, von einer Länge, die in der Regel um 100 bis 500 Byte beträgt, zwischen den verschiedenen Kommunikationsteilnehmern ausgetauscht. In der Regel werden keine hohen Anforderungen an das Übertragungszeitverhalten der Kommunikationseinrichtung gestellt, da aufgrund der Intelligenz der Gerätesteuerungen zeitkritische oder sicherheitsrelevante Operationen lokal ausgeführt werden. So wartet beispielsweise eine NC-Maschine bei einer erkannten und an den Zellenrechner gemeldeten Kollision nicht auf einen Abschaltbefehl, sondern schaltet selbsttätig ab. Daher braucht die Alarmübertragung nicht in wenigen Millisekunden zu erfolgen, sondern darf im Bereich mehrerer Zehntelsekunden bzw. Sekunden liegen.

Für die Dateiübertragung zwischen NC-Maschinensteuerung und Zellenrechner sind aus technologischer Sicht in der Steuerungsebene Netto-Übertragungsraten in der Größe bis maximal 40.000 Bit/s erforderlich [FRIE93a]. Beim Aufbau neuer Zellennetzwerke wird heute fast ausschließlich Ethernet benutzt, es existieren in vielen Fällen aber auch noch Lösungen, wie beispielsweise der SINEC-H1-Bus von Siemens bzw. System-Feldbusse wie der DIN-Messbus (DIN 66348), der Profibus (DIN 19245), der französische FIP-Bus oder der japanische FAIS-Bus.

Industrial-Ethernet-Netzwerke
Mit dem Einsatz der klassischen Ethernet-Technologie in der Produktion wird die Idee verfolgt, eine standardisierte Kommunikationsinfrastruktur einzuführen, die eine unternehmensweite Kommunikation sowie Automatisierung vom Büro bis zur Maschine bzw. Sensor ermöglicht. Damit können die Prozess- und Fertigungsdaten zukünftig nicht nur auf der Feldebene (Maschinenebene), sondern auch in bereichsübergreifenden Systemen verarbeitet werden. Zur Anbindung der unterschiedlichen Feldbusse an das übergeordnete Netzwerk sind busspezifische Infrastrukturkomponenten notwendig (Gateways, Router, Bridges).

Büro-Netzwerke
In den Bürobereichen der höheren Unternehmensebenen ist der Informationsaustausch in der Regel nicht telegrammorientiert wie in der Aktor-/Sensor- und in der Steuerungsebene, sondern besteht vornehmlich aus der Dateiübertragung, dem Versenden von E-Mails sowie großen Datenmengen, wie z. B. CAD-Zeichnungen. Daher nehmen die horizontalen und vertikalen Datenströme in diesen Ebenen an Breite, d. h. an Umfang, zu. Die Anforderungen an das Reaktionszeitverhalten des Datenübertragungssystems nehmen im Gegensatz dazu deutlich ab.

Als Büro-Netzwerke kommen Produkte wie Fast Ethernet (100 MBit/s), Gigabit Ethernet (1000 MBit/s) oder WLAN (bis 1300 Mbit/s) zum Einsatz. Gigabit-Adapter gehören inzwischen zur Standardausrüstung moderner Computer. WLAN Adapter sind Stand der Technik bei mobilen Computern, Desktop-Systeme können für unter 5 Euro mit WLAN Adaptern ausgerüstet werden.

Software-Schnittstellen
Die informationstechnische Vernetzung in der Leittechnik erfordert nicht nur den Einsatz geeigneter Protokolle, sondern auch standardisierter Software-Schnittstellen, die anwendungsübergreifend verwendet werden können. Für die einheitliche Anbindung von Treibern heterogener Automatisierungskomponenten hat sich der OPC-Standard (Open Platform Communications, früher OLE for Process Control) etabliert. OPC basiert auf der Microsoft COM/DCOM-Technologie, die durch die Einbindung von COM-Objekten in den Programmcode einen Datenaustausch zwischen PC-Anwendungen und Gerätesteuerungen nach dem Client-Server-Prinzip ermöglicht. Dabei kapselt der Server die herstellerspezifische Kommunikation mit einer Gerätesteuerung, sodass der Client über den OPC-Standard auf Informationen zugreifen kann ohne die herstellerspezifischen

Treiber ansprechen zu müssen. Die Nutzung von COM/DCOM hat OPC zu einer großen Verbreitung verholfen, jedoch auch zu Nachteilen geführt. Die DCOM-Technologie ist an Microsoft Windows gebunden, zudem treten häufig Kommunikationsprobleme auf. Das Fehlen konfigurierbarer Timeouts, unzureichende Kommunikationssicherheit sowie der Blackbox-Charakter von COM/DCOM haben zur Entwicklung eines neuen Standards durch die OPC Foundation geführt.

Die erste Version von OPC UA (Unified Architecture) [DIN10] wurde 2006 veröffentlicht. Die Motivation der OPC Foundation war zunächst die Migration der OPC AE (Alarms and Events), OPC DA (Data Access) und OPC HDA (Historical Data Access) Spezifikationen zu Web Services, um den Zugriff auf eine einheitliche Art und Weise zu ermöglichen. Durch diesen Versuch der Vereinheitlichung der Kommunikation ist der Begriff OPC UA entstanden. An der Vereinheitlichung haben sich Mitarbeiter aus bis zu 30 Unternehmen beteiligt.

Neben dem reinen Kommunikationsprotokoll stellt OPC-UA auch ein Informationsmodell für die semantische Beschreibung der verfügbaren Daten bereit. Der Transport von Daten kann wahlweise über ein optimiertes binäres TCP-Protokoll stattfinden oder es kann auf die Verwendung von Standards wie Web Services, XML und HTTP, die eine Firewall-freundliche Kommunikation über das Internet erlauben, zurückgegriffen werden. Die Kommunikation ist nicht auf die genannten Protokolle beschränkt und kann in Zukunft um weitere Protokolle ergänzt werden.

14.4 Prozessleitebene

14.4.1 Elektronischer Leitstand

14.4.1.1 Aufgaben von Werkstattsteuerungssystemen

Aufgabe der Werkstattsteuerung ist die Durchsetzung und Überwachung der von der Produktionsplanung und -steuerung vorgegebenen Aufträge. Während im PPS-System Arbeitsgänge auf Kapazitätsgruppen verplant werden, ist auf Werkstattebene eine detaillierte Maschinenbelegungsplanung notwendig. Der Werkstattmeister oder der Arbeitsverteiler wählt zu diesem Zweck aus dem vorhandenen Arbeitsvorrat die nächsten zu bearbeitenden Arbeitsgänge aus und weist sie den Einzelarbeitsplätzen zu. Ergebnis dieser Auftragsfeinplanung ist ein Maschinenbelegungsplan, in dem die Start- und Endtermine der Arbeitsgänge und ihre Reihenfolge an den jeweiligen Arbeitsplätzen festgelegt sind.

Im Rahmen dieser Feinplanung sind jedoch zahlreiche Randbedingungen zu berücksichtigen, wie z. B. die Verfügbarkeit von Personal, Maschinen, Werkzeugen, NC-Programmen und Material zum geplanten Starttermin der Arbeitsgänge. Eine Nichtbeachtung dieser Randbedingungen kann zu ungewollten Maschinenstillstandszeiten und zur Verzögerung von Lieferterminen führen.

Weiterhin müssen bestimmte unternehmensspezifische Ziele, wie z. B. hohe Auslastung der Maschinen, kurze Durchlaufzeiten oder geringe Bestände, eingehalten werden. Um diese Ziele unter Berücksichtigung der zahlreichen Restriktionen zu erreichen, sind Hilfsmittel erforderlich, die nicht nur den Planungsvorgang an sich erleichtern, sondern auch alternative Planungsläufe zulassen und eine Beurteilung hinsichtlich der Planungsergebnisse ermöglichen.

Nach Abschluss der Maschinenbelegungsplanung werden die Arbeitsplätze mit der Auftragsdurchführung beauftragt. Eine weitere Aufgabe neben der Arbeitsverteilung ist die Überwachung des Arbeitsfortschritts. Dies geschieht durch den Vergleich der geplanten Fertigstellungstermine mit der aktuellen Situation in der Werkstatt. Im Falle größerer Abweichungen, die durch Maschinenausfall, Überlastung der Werkstatt, fehlerhafte Produktion oder organisatorische Fehler entstehen können, müssen geeignete Um- oder Neuplanungen im Sinne einer „Fertigungsregelung“ vorgenommen werden.

14.4.1.2 Funktionsumfang elektronischer Leitstände

Heutzutage gibt es zahlreiche Hilfsmittel zur Unterstützung der Werkstattsteuerung. Unter den nicht rechnergestützten Systemen ist insbesondere die Plantafel zu nennen, bei der die Auftragsverfolgung über Steckkarten auf einer Wandtafel erfolgt. Auf der y-Achse dieser Wandtafel sind die vorhandenen Maschinen eingetragen, während die x-Achse die Zeit repräsentiert. Die einem Arbeitsplatz zugeteilten Arbeitsgänge werden entsprechend ihrer Reihenfolge hintereinander gesteckt. Auf diese Weise kann die Auslastung der einzelnen Maschinen und der Arbeitsfortschritt kontrolliert werden.

Einfache rechnergestützte Werkstattsteuerungssysteme beschränken sich auf die alphanumerische Darstellung von Auftragsdaten auf Terminals und ermöglichen die Zuteilung von Aufträgen zu den Maschinen. Zur Beurteilung der Auswirkungen dieses Planungsschritts werden verschiedene grafische Darstellungen angeboten. Der Bediener hat die Möglichkeit, die Maschinenbelegung so lange zu optimieren, bis ein von ihm gewünschtes Zielkriterium erreicht ist.

Elektronische Leitstände ersetzen die klassische Plantafel durch eine fensterorientierte, vollgrafische Darstellung, die alle Möglichkeiten zur interaktiven Ein- und Umplanung über Mausbedienung ermöglicht [KÖHL90]. ◘ Bild 14.17 zeigt eine typische Bedienoberfläche eines Leitstands. Der Maschinenbelegungsplan zeigt die zeitliche Reihenfolge der Arbeitsgänge an den Maschinen. Durch Skalierung des dar-

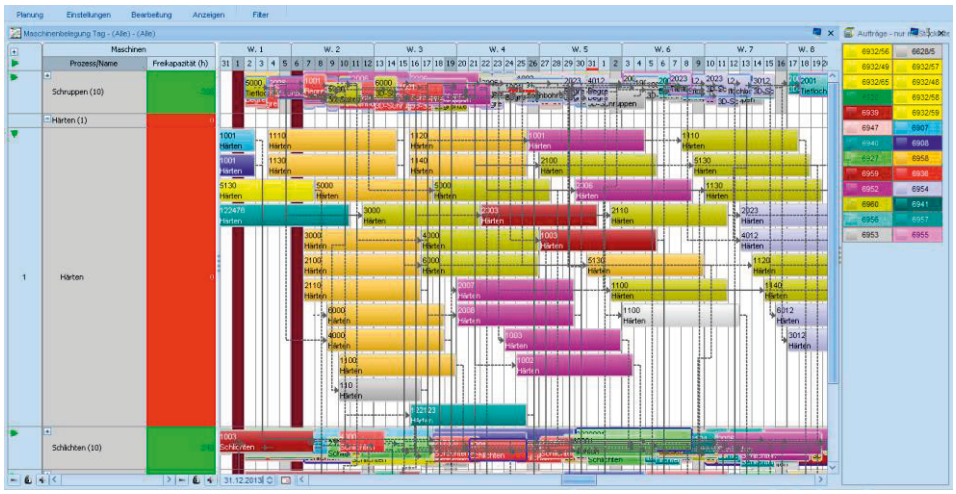


Bild 14.17 Grafischer Leitstand. Quelle: Armin Hoffmann, IT-Handelsvertretung

zustellenden Zeitraumes kann eine beliebig detaillierte Sicht erreicht werden.

Im Arbeitsvorrat sind die Aufträge enthalten, deren Arbeitsgänge noch nicht eingeplant wurden. Diese Arbeitsgänge lassen sich mit der Maus an eine geeignete Stelle im Maschinenbelegungsplan verschieben und sind damit einer Maschine zugeteilt. Der Leitstand nimmt bei dieser Vorgehensweise zahlreiche Plausibilitätsprüfungen vor. Beispielsweise darf ein Arbeitsgang nicht so eingeplant werden, dass sein Beginn vor dem Ende des Vorgängerarbeitsganges liegt.

Die heute angebotenen Systeme bieten darüber hinaus die Möglichkeit der automatischen Reihenfolgeplanung. Der Bediener kann dabei zwischen unterschiedlichen, nach verschiedenen Zielkriterien optimierenden Algorithmen auswählen. Die in mehrfachen Simulationsläufen ermittelten Maschinenbelegungspläne können anschließend unter Zuhilfenahme grafischer Auswertungsdiagramme bewertet werden. Ein Balkendiagramm zur Maschinenauslastung ermöglicht beispielsweise die Beurteilung des Planungsergebnisses hinsichtlich des Zielkriteriums „maximale Auslastung".

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Verarbeitung der Rückmeldungen aus der Fertigung. Die Farbgrafikdarstellung der Plantafel ermöglicht eine Einfärbung der Arbeitsgänge analog zu ihrem aktuellen Status. So können zugeteilte, gestartete, beendete, gestörte oder verspätete Arbeitsgänge leicht erkennbar gekennzeichnet werden. Damit wird die Übersichtlichkeit der Plantafel erheblich verbessert.

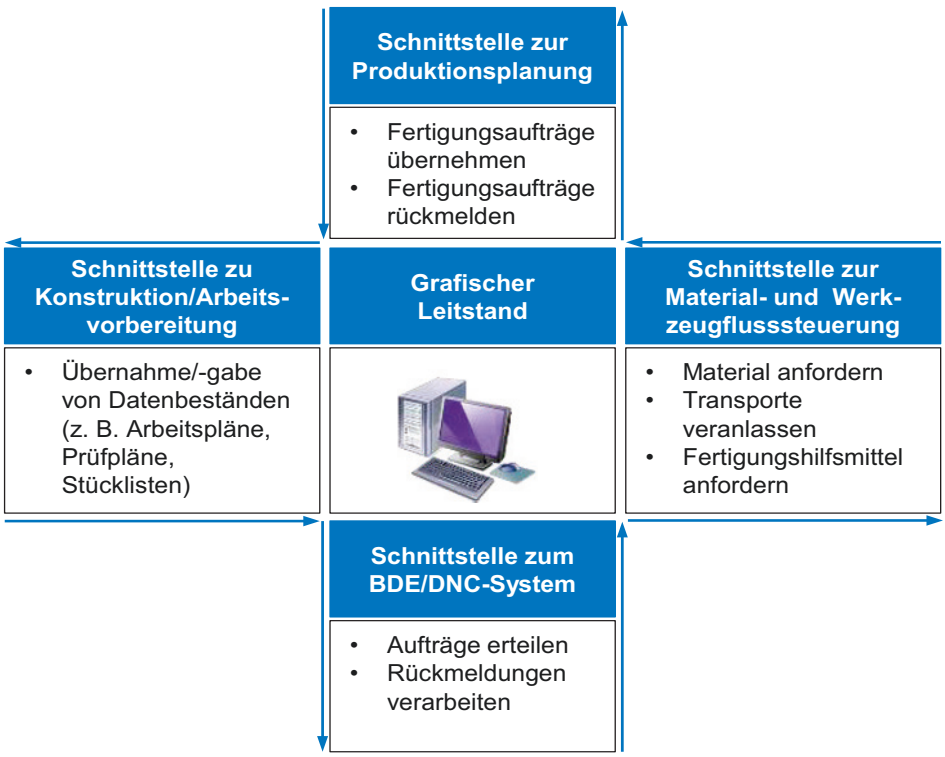


Bild 14.18 Schnittstellen eines Leitstandes

Leitstände bieten zahlreiche Schnittstellen zur Integration in das betriebliche Umfeld, wie in Bild 14.18 dargestellt wird. Fertigungsaufträge können per Filetransfer von der Produktionsplanung und -steuerung in die lokale Datenbasis übernommen werden. Auch Rückmeldungen aus der Fertigung können über diese Schnittstellen an das PPS-System weitergemeldet werden. Die Verteilung der Aufträge an die Arbeitsplätze kann durch das Drucken von Auftragspapieren oder im Sinne der papierlosen Fertigung durch Anschluss von BDE-Terminals erfolgen. Auch die direkte Ansteuerung der Maschinen über eine DNC-Kopplung ist möglich. Da die beschriebenen Schnittstellen heute noch nicht genormt sind, erfordern derartige Kopplungen meist kundenspezifische Anpassungen.

Neben der reinen Plantafelfunktionalität sind heutige Leitstände um zahlreiche Funktionen, wie z. B.:

- BDE,
- DNC,
- NC-Programmverwaltung,
- Fertigungshilfsmittelverwaltung und
- Materialflusssteuerung

erweitert worden. Damit verschwimmt die Grenze zwischen Leitständen für die Werkstattsteuerung und Fertigungsleitrechnern, die im ▶ Kap. 14.3 behandelt werden, zunehmend.

14.4.2 Fertigungsleitrechner

Fertigungsleitrechner stellen die höchste Stufe der rechnerintegrierten Fertigungssteuerung dar. Neben den in den vorhergehenden Abschnitten bereits vorgestellten Verwaltungs- und Planungsfunktionen ist auch eine direkte Steuerung der Maschinen, Handhabungs- und Transportsysteme möglich. Ihr Einsatzschwerpunkt liegt bei der Steuerung flexibler Fertigungssysteme (FFS).

14.4.2.1 Funktionsumfang von Fertigungsleitrechnern

Fertigungsleitrechner müssen aufgrund ihrer komplexen Steuerungsaufgabe eine Vielzahl von Funktionen bereitstellen [WECK90]. Die nachfolgend beschriebenen Funktionen sind in unterschiedlich ausgeprägter Form in fast allen Fertigungsleitrechnern vorhanden.

- Auftragsverwaltung
  Die Auftragsverwaltung übernimmt Fertigungsaufträge von übergeordneten Systemen, wie z. B. Produktionsplanung und -steuerung oder einem Bereichsrechner, und überträgt Fertigmeldungen an diese Systeme.
- Feinplanung
  Die Feinplanung generiert einen detaillierten Belegungsplan für die Maschinen, die Rüst- und Spannplätze.
- Ablaufsteuerung
  Die Ablaufsteuerung steuert die FFS-internen Abläufe, die zur Durchsetzung der Feinplanungsergebnisse erforderlich sind. Dies umfasst die Verteilung der Arbeitsgänge sowie die Beauftragung der Materialflusssteuerung mit der Bereitstellung der Werkstücke an den Arbeitsstationen.
- Materialflusssteuerung
  Die Materialflusssteuerung ist verantwortlich für die Bereitstellung von Material und dessen Transport zwischen Lagern, Puffern und Arbeitsstationen.
- Werkzeugmanagement
  DasWerkzeugmanagement muss neben der Werkzeugdatenverwaltung und -übertragung die Werkzeugbedarfe berechnen, eine Einsatzplanung vornehmen, benötigte Werkzeuge reservieren und die Werkzeugzuführung und -aufbereitung steuern.
- Zellenauftragskoordination
  Bei der Bearbeitung innerhalb einer Zelle müssen die notwendigen Bearbeitungsschritte koordiniert werden. Hierzu müssen z. B. verschiedene NC-Programme nacheinander gestartet oder das Zusammenspiel von Roboter und Maschine koordiniert werden.
- Kommunikation mit den unterlagerten Gerätesteuerungen (DNC)
  Zur Kommunikation mit den unterlagerten Gerätesteuerungen werden spezielle Treiberbausteine benötigt, die eine Umsetzung der Steuerbefehle in die steuerungsspezifischen Kommunikationsprotokolle vornehmen. Über diese DNC Anschaltung werden NC-Programme, Werkzeugdaten und andere Parameter übertragen, Befehle zum Programmstart erteilt sowie Statusmeldungen entgegengenommen.
- Prozessvisualisierung
  Die Prozessvisualisierung verfolgt zwei Ziele. Sie muss zunächst den Benutzer über den aktuellen Zustand des Systems informieren und ihm dann Möglichkeiten bieten, den Zustand des Systems zu beeinflussen. Dazu werden dem Benutzer beispielsweise in einem Leitstand die vorhandenen Aufträge mit ihren geplanten Terminen und deren aktueller Bearbeitungszustand angezeigt. Hier kann der Benutzer bei Bedarf dringende Aufträge vorziehen oder die Bearbeitung anderer Aufträge zurückstellen. Außerdem sollte dem Benutzer ein Überblick über das gesamte System gegeben werden, aus dem beispielsweise die Belegung der Palettenplätze sowie die aktuellen Transport- und Bearbeitungsvorgänge hervorgehen und ob an irgendeiner Stelle Störungen anliegen. An dieser Stelle muss er aktiv ins Systemgeschehen eingreifen können, um im Hand- oder Halbautomatikbetrieb die Anlage zu steuern oder um Fehlerzustände zu beheben.
- Maschinen- und Betriebsdatenerfassung (MDE, BDE)
  Die Erfassung der Maschinen- und Betriebsdaten ist Voraussetzung für die automatisierte Steuerung flexibler Fertigungssysteme. Aufgrund von Ereignissen

werden Entscheidungen getroffen und weitere Bearbeitungsschritte veranlasst. Zahlreiche Statistiken geben Auskunft über den Fertigungsverlauf innerhalb einer Fertigungsperiode.

- Qualitätssicherung
  Die Qualitätssicherung im Bereich der Fertigung beinhaltet den Aufbau von Qualitätsregelkreisen. Dies umfasst beispielsweise die Überwachung vorgegebener Prüfmerkmale an speziellen Prüfplätzen oder die Vermessung der Werkstücke direkt in der Maschine. Die Prüfergebnisse ermöglichen Rückschlüsse auf Mängel im Fertigungsprozess, die durch qualitätsregelnde Maßnahmen behoben werden müssen.
- Instandhaltung, Diagnose
  Gerade bei automatisierten Systemen kommt der Instandhaltung eine besondere Bedeutung zu, da durch eine vorbeugende Instandhaltung viele Störungen bereits im Vorfeld vermieden werden können. Zur Behebung von Störungen, die während des Betriebs einer Anlage auftreten, werden Diagnosesysteme eingesetzt, die ein schnelles Erkennen und Beseitigen der Fehlerursachen ermöglichen.

14.4.3 SCADA-Systeme

Mit SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) werden Systeme bezeichnet, die das Bedienen und Beobachten technischer Anlagen ermöglichen. SCADA können für die Überwachung einzelner Sensoren, das Monitoring von einzelnen Speicherprogrammierbaren Steuerungen, bis hin zur Überwachung von ganzen Anlagen eingesetzt werden. Meistens verfügen SCADA über ein HMI (Human-Machine Interface), das zur Visualisierung des überwachten Anlagenzustands verwendet wird.

14.4.3.1 Aufgaben

Die Aufgabe von SCADA-Systemen ist das Bedienen und Beobachten von technischen Systemen. Dies beinhaltet die Abfrage von Daten, ihre Verwaltung, Archivierung und Visualisierung. Die technischen Systeme können sich dabei auf Anlagenteile beschränken oder die standortübergreifende Beobachtung und Bedienung von Anlagen realisieren. SCADA-Systeme sind oft sehr technologiebezogen und verfügen über sehr feingranulare Fertigungsdaten, die in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden. Durch den Einsatz von SCADA-Systemen werden vorgegebene Abläufe kontrolliert und ihre Durchführung sichergestellt.

Die Visualisierung in SCADA-Systemen verfolgt zwei Ziele. Sie muss zunächst den Benutzer über den aktuellen Zustand des Systems informieren und ihm dann Möglichkeiten bieten, den Zustand des Systems zu beeinflussen. Dazu werden dem Benutzer beispielsweise in einer grafischen Übersicht die aktuelle Maschinenauslastung, vorhandene Aufträge mit ihren geplanten Terminen und deren aktueller Bearbeitungszustand in Echtzeit angezeigt. Hier kann der Benutzer bei Bedarf, z. B. im Fehlerfall, eine Maschine stoppen oder einen Auftrag starten. Eine weitere typische Funktion eines SCADA-Systems ist die Verfügbarkeit einer Auftragshistorie, um die Rückverfolgbarkeit des Prozesses zu gewährleisten.

14.4.3.2 Konzepte

Eine oft verwendete Architektur von SCADA-Systemen ist ein Client-Server-Aufbau. Der Server sammelt dabei Daten von untergeordneten Geräten und speichert diese in einem Datenbanksystem. Die untergeordneten Geräte werden über die RS232-Schnittstellen, Feldbusse oder ein Netzwerksystem angeschlossen. Auf der Client-Seite können Benutzer über eine Netzwerkverbindung auf die Server-Daten zugreifen.

Für die Kommunikation in SCADA-Systemen werden zunehmend TCP/IP-basierte Kommunikationsprotokolle verwendet. Die Ausführung von SCADA-Systemen bedient sich oft der PC-Technik. Für die Anbindung von Geräten werden standardisierte Protokolle wie beispielsweise OPC UA, MQTT oder DDS verwendet.

Die heutigen SCADA-Konzepte richten sich nach Anforderungen, wie Effizienz im Engineering, einfache Skalierbarkeit und Offenheit aus. Die Effizienz im Engineering bezieht sich dabei auf die Vorbereitung eines SCADA-Systems auf seinen Einsatz im Unternehmen. Dies erfordert zunächst die Herstellung der Kommunikation zwischen dem Server-System und den zu beobachtenden Anlagen(-teilen). Weiterhin muss die Anlagenstruktur im SCADA abgebildet werden. Hierzu gehören die Anlagenkomponenten mit ihren beobachtbaren Daten. Für die visuelle Darstellung werden häufig Bibliotheken mit grafischen Elementen zur Verfügung gestellt, die Standardelemente von Fertigungsanlagen abbilden. Die Anforderung an die Skalierbarkeit bezieht sich auf die Möglichkeit der Erweiterung des SCADA-Systems um weitere zu beobachtende Systemkomponenten, Server und Clients. Mit der Anforderung Offenheit wird die Verwendung von dokumentierten Schnittstellen beschrieben, die Systemerweiterungen und die Ankopplung verschiedener Komponenten auf Basis unterschiedlicher Protokolle ermöglicht.

Im SCADA-Bereich werden zunehmend mobile Lösungen angeboten, die auf Smartphone- bzw. Tablet-Hardware eingesetzt werden können. In diesem Fall greift die Visualisierung auf Daten eines stationären Servers im Netzwerk oder auf ein übergeordnetes System in der Cloud zu.

Da SCADA-Systeme über detaillierte Prozessdaten verfügen ist die Extraktion dieser Daten durch ein MES eine Funktion, die in kommerziellen Lösungen meist zu finden ist. Im

Sinne der vertikalen Integration findet dann ein Datenaustausch zwischen SCADA und MES entlang der Automatisierungspyramide statt.

14.5 Smart Automation Lab: Industrie 4.0-Forschungslabor

Die Aktivitäten im Bereich der Aachener Produktionsforschung, insbesondere bezogen auf grundlagenorientierte Themenkomplexe, werden in Deutschland seit dem Jahr 2006 stark unterstützt und gelenkt durch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder. Der Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ und sein Nachfolger „Internet of Production“ repräsentierten dabei eine übergreifende Organisationsform für mehr als 20 angeschlossene Forschungsinstitute der RWTH Aachen [o.V.11]. Im Bereich der Entwicklung und Evaluation neuer Steuerungstechnologien und -konzepte werden hier sowohl einzelne Werkzeugmaschinen bis hin zu verkettet automatisierten Produktionsanlagen adressiert.

Diese und weitere aktuelle Forschungsvorhaben aus dem Umfeld der IT-unterstützten Fertigung werden mit dem *Smart Automation Lab* am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen gebündelt vorgestellt und synergetisch miteinander verknüpft [BREC15]. Dabei fokussieren die verschiedenen Einzelprojekte jeweils unterschiedliche Aspekte, die bei der Umsetzung der Konzepte von Industrie 4.0 zu berücksichtigen sind und sich aus dem steigenden Grad der Anlagenvernetzung und zunehmendem vertikalen Informationsaustausch ergeben [BREC14], ◘ Bild 14.19. Das Smart Automation Lab umschließt hier die vollständige Automatisierungspyramide eines modernen Produktionssystems von der Unternehmens- bis zur Feldebene und ermöglicht dadurch die übergreifende Validierung sowohl der angegliederten Engineering- als auch der verfolgten Steuerungskonzepte.

14.5.1 Produktzentrierte Steuerung

Im *Smart Automation Lab* erhält der Besucher die Möglichkeit, ein exemplarisch ausgewähltes Produkt in Auftrag zu geben und anhand von Merkmalen zu individualisieren. Die Fertigung des über die Planungsebene eingesteuerten Auftrags realisiert eine verkettet automatisierte Anlage, die aus unterschiedlichen Stationen besteht, welche die einzelnen Fertigungsschritte in Abhängigkeit von den zentral verwalteten Auftragsdaten anpassen, ◘ Bild 14.20.

So sieht das realisierte Szenario zur Herstellung kundenspezifisch bedruckter Montagebaugruppen aus einzelnen Hubelino®-Spielsteinen vor, dass die geometrischen Grundkörper zunächst als Standardteile in einem Spritzgießprozess mit Stammform hergestellt werden, ◘ Bild 14.20. Anschließend werden die Einzelteile als Schüttgut über ein Wendelfördersystem einer Bearbeitungsstation zugeführt, in der eine Nachbearbeitung (automatisierte Angussentfernung) und Einbringung von RFID-Transpondern erfolgt, ◘ Bild 14.20. Die RFID-Transponder ermöglichen die Verknüpfung von Einzelteilen mit den jeweiligen Auftragsdaten der Planungsebene über eine eindeutige Kennung. Nachfolgende Stationen können diese Kennung auslesen und die jeweils benötigten Auftragsinformationen aus dem zugrunde liegenden Produktdatenmodell extrahieren.

Im dritten Schritt werden beliebige Bauteile durch Vorpalettieren zu Losen zusammengefasst und einem Farbdrucker durch einen Roboter mit spezieller Greiferkinematik zugeführt, ◘ Bild 14.20. Die Greiferkinematik ermöglicht hier ein schnelles Greifen und Umorientieren der Bauteile, sodass diese von mehreren Seiten bedruckt werden können und die Kapazität des Druckers bestmöglich ausgenutzt wird. Nach dem Druckvorgang können die Einzelteile – je nach Auftrag – in zwei unterschiedlichen Montagestationen zusammengesetzt werden:



◘ **Bild 14.19** Themenfelder des Smart Automation Lab

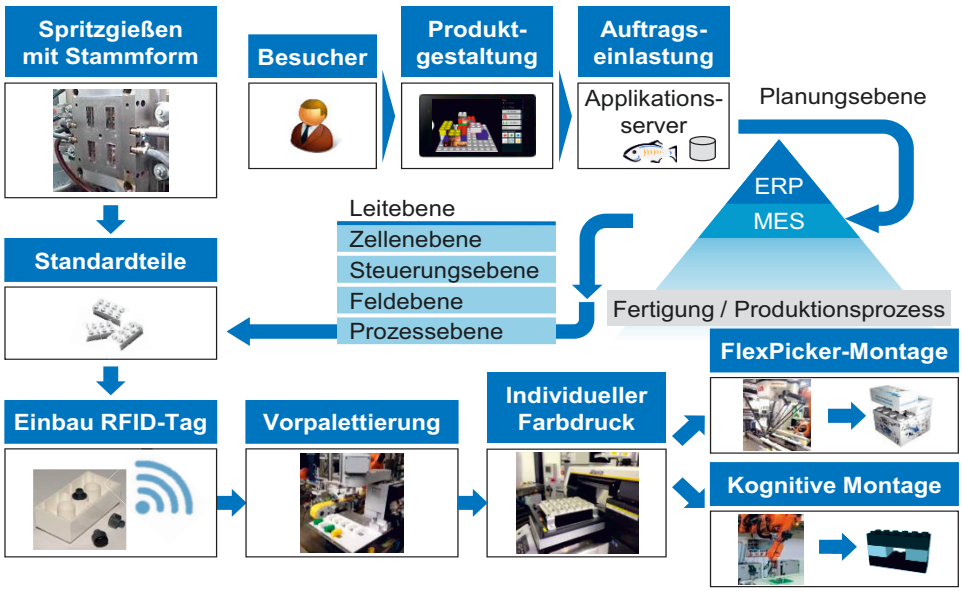


Bild 14.20 Struktur des Produktionssystems zur Herstellung individualisierter Produkte

- Handelt es sich bei dem Produkt um einen Würfel aus sechs Einzelteilen, werden die Bauteile einer FlexPicker-Station zugeführt und montiert, Bild 14.20.
- Handelt es sich um eine von der Würfelform abweichende Montagebaugruppe, werden die benötigten Bauteile in die kognitive Montagezelle gefördert, Bild 14.20. Hier erfolgt die automatisierte Montageplanung und -ausführung auf Grundlage des CAD-Modells der fertigen Montagebaugruppe und ohne manuellen Eingriff.

Im Rahmen dieses Aufbaus, wurden die erforderlichen Betriebsmittel und Vorrichtungen grundsätzlich dazu befähigt, rüstfrei Einzelteile herzustellen, die sich von Auftrag zu Auftrag unterscheiden. Kern der Realisierung ist eine flexible Produktionssteuerung (vgl. Manufacturing Execution System – MES, ▶ Kap. 14.3.1), die die verschiedenen Anlagenbereiche in die Auftragsbearbeitung einbezieht, indem sie Anlagenfunktionen auslöst und dabei zur Produktion benötigte Informationen auftragsspezifisch bereitstellt. Zu diesen Informationen zählen z. B. Bilddateien, die innerhalb der Druckstation zur Individualisierung von Einzelteilen benötigt werden oder CAD-Modelle als Sollzustand für die kognitive Montagezelle.

Während der Auftragseinlastung auf Ebene der Einzelstationen wird parallel zu den real benötigten Objekten auch das auftragsspezifische Produktmodell durch das MES an die Station übergeben, sodass diese die relevanten Informationen selbstständig aus dem Produktmodell ableiten kann. Auf diese Weise sinkt die Steuerungskomplexität, da Stationen – nach Festlegung einer einheitlichen Produktmodellstruktur – direkt auf Produktmerkmale zugreifen können, um ihr Verhalten anzupassen. Aufgrund der hohen Bedeutung der Produktmodellierung und den daraus erwachsenen Implikationen für die Fertigungssteuerung wird häufig auch von produktzentrierter Steuerung gesprochen [BREC14].

14.5.2 Plug & Produce

Um kurzfristig Produktionskapazitäten zu erhöhen oder in Wartung befindliche Anlagenteile zu ersetzen, gewinnt die flexible und bedarfsgerechte Automatisierung zunehmend an Bedeutung. Im *Smart Automation Lab* werden Roboter mit integrierten Sicherheitsfunktionen genutzt, um mobile Betriebsmittel durch Plug&Produce-Ansätze flexibel und aufwandsarm in den Anlagenverbund zu integrieren, Bild 14.21. Das Robotersystem verfügt hierzu über Sensorik zur Selbstreferenzierung bzw. Lokalisation mithilfe von an der Anlage angebrachten Markern. Zudem können Bauteile optisch identifiziert und flexibel gegriffen werden, sodass ein wiederkehrendes Teachen entfällt. Durch eine Sensorhaut kann der dargestellte Apas-Roboter der Firma Bosch Berührungen erkennen und ermöglicht dadurch eine Kollaboration zwischen Mensch und Roboter (vgl. Kollaborative Roboterbauformen, ▶ Kap. 13.2.6.3).

Die Schnittstellen zwischen Betriebsmitteln und MES verwenden mit OPC Unified Architecture (OPC UA) offene Kommunikationsprotokolle, die es ermöglichen, Anlagenfunktionalitäten in Form von Diensten für das MES sichtbar darzustellen. Ein Vorteil dieses Ansatzes besteht in der dynamischen Verknüpfbarkeit der Dienste durch das MES. So können Anlagenteile zur Laufzeit aus dem Gesamtsystem entfernt oder hinzugefügt werden, ohne die Kommunikation zu anderen Stationen zu beeinflussen. Funktionen werden Event-basiert ausgelöst und führen seitens des Leitsystems nicht zu Wartezeiten, da es keine direkte Fertigmeldung des ausgelösten Prozesses erwartet. Im Rahmen des *Smart Automation Lab* resultiert die Kommunikationsform in einem „Push"-Mechanismus, bei dem das Leitsystem Montageobjekte durch das Fertigungssystem bewegt, Einzelprozesse anstößt und die Ob-



Bild 14.21 Mobiler Industrieroboter mit integrierter Sicherheits- und Visiontechnik. Quelle: Bosch, WZL

jekte nach einer Fertigmeldung der nachfolgenden Station übergibt.

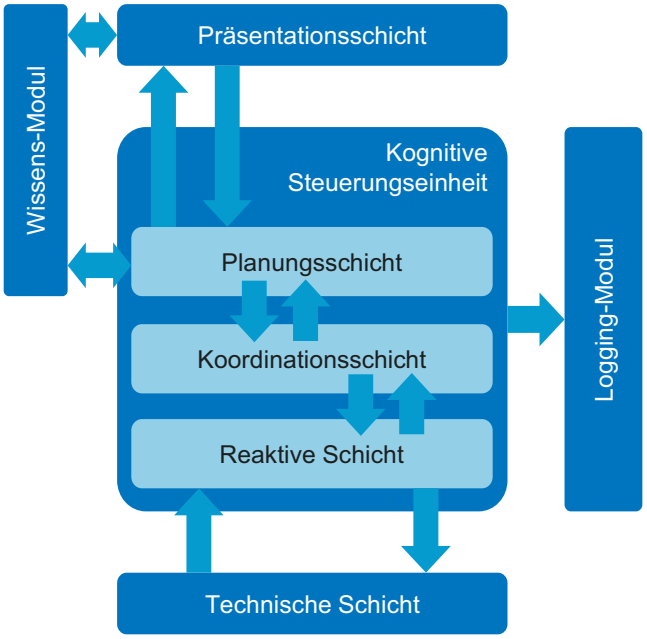


Bild 14.22 Konzept der kognitiven Architektur

14.5.3 Kognitive Montage

Die kognitiven Montagezelle des *Smart Automation Lab* nutzt zur Planung und Koordination von montagebezogenen Abläufen als Basis ebenfalls virtuelle Produktmodelle. Das durch den Besucher konfigurierte und zur Realisierung übertragene CAD-Modell einer Baugruppe entspricht dem Zielzustand des Produktes und ist die einzige manuelle Eingabe für die Montage. Anhand dieser Eingabe plant eine kognitive Steuerung (Cognitive Control Unit – CCU) die für eine erfolgreiche Montage notwendigen Schritte und koordiniert die Abläufe unter Kenntnis der aktuellen Anlagensituation [BREC12]. Die Steuerung setzt sich aus verschiedenen Schichten zusammen, die jeweils Funktionen mit unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich Ausführungszeit bzw. -geschwindigkeit und Umfang der bei der Ausführung berücksichtigten Informationsmenge umfassen, Bild 14.22.

Die Präsentationsschicht beinhaltet eine Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie eine Schnittstelle zur Veränderung einer Wissensbasis (Wissens-Modul), die ein domänenspezifisches (hier: Montage) Planungsregelwerk enthält. Innerhalb der Planungsschicht erfolgt eine Abwägung von Handlungsalternativen sowie die eigentliche Planung der nächsten Handlung für den aktuellen Montageablauf. Zur Ausführung von Montagehandlungen nutzt die Planungsschicht unterschiedliche Dienste, die durch die Koordinationsschicht angeboten werden. Zweck der Koordinationsschicht ist die Abstraktion und Vereinheitlichung der an der Montage beteiligten Betriebsmittel bezogen auf deren spezifische Steuerungsschnittstellen. Unterhalb der Koordinationsschicht enthält die Architektur mit der Reaktionsschicht ein Modul, das Aufgaben mit Echtzeitanforderungen wie beispielsweise die optische Positionsregelung des Industrieroboters oder Sicherheitsfunktionen der Zelle mittels der enthaltenen technischen Systeme (technische Schicht) realisiert, Bild 14.23.

Im realisierten Szenario werden die Bauteile des *Smart Automation Lab* über ein Palettenfördersystem der kognitiven Montagezelle zugeführt. Anschließend setzt ein Greifportal einzelne Bauteile auf ein umlaufendes Förderband, das die zur Montage zur Verfügung stehende Objektmenge bildet. Aus diesen Objekten wählt das Robotersystem jeweils die zur Realisierung des Auftrags benötigten Bauteile aus, synchronisiert sich zur Bandgeschwindigkeit und greift die entsprechenden Objekte. Je nach Montagefortschritt können Bauteile direkt montiert oder zunächst in einem Puffer zwischengespeichert werden. Über eine zweite Schnittstelle können dem System bereits vormontierte Baugruppen übergeben werden, die innerhalb der Montagefläche zur Vervollständigung von Arbeitsaufträgen genutzt werden. Abschließend werden fertige Baugruppen durch ein Übergabefenster aus der Zelle ausgeleitet.

Wichtige Randbedingungen für die Planung der Abläufe erhält das System durch die kontinuierliche Evaluation des aktuellen Montagefortschritts, Bild 14.24. Komplexe Baugruppen können meist durch eine Vielzahl äquivalenter Schrittreihenfolgen erstellt werden, die zum selben Zielzustand führen. Es gibt jedoch Einschränkungen hinsichtlich der Montierbarkeit einzelner Zwischenzustände, die sich z. B. aus der Störkontur der Greiforgane des Roboters ergeben und nicht durchlaufen werden dürfen.

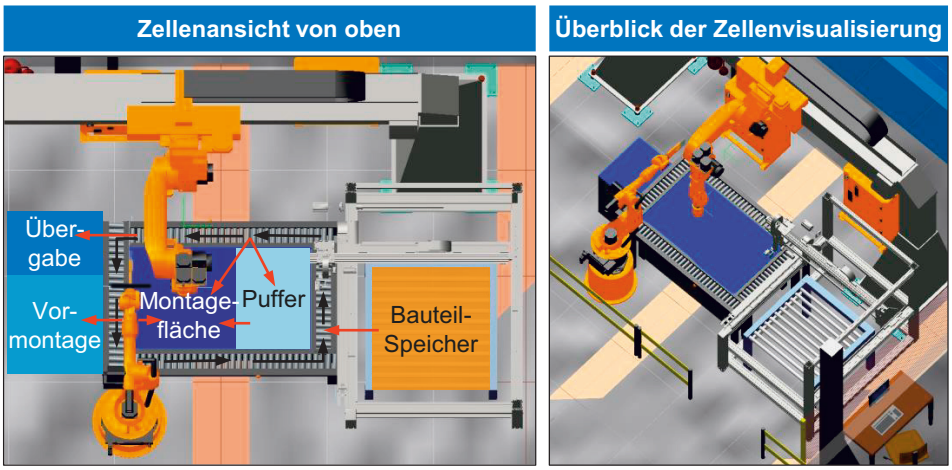


Bild 14.23 Aufbau der Montagezelle

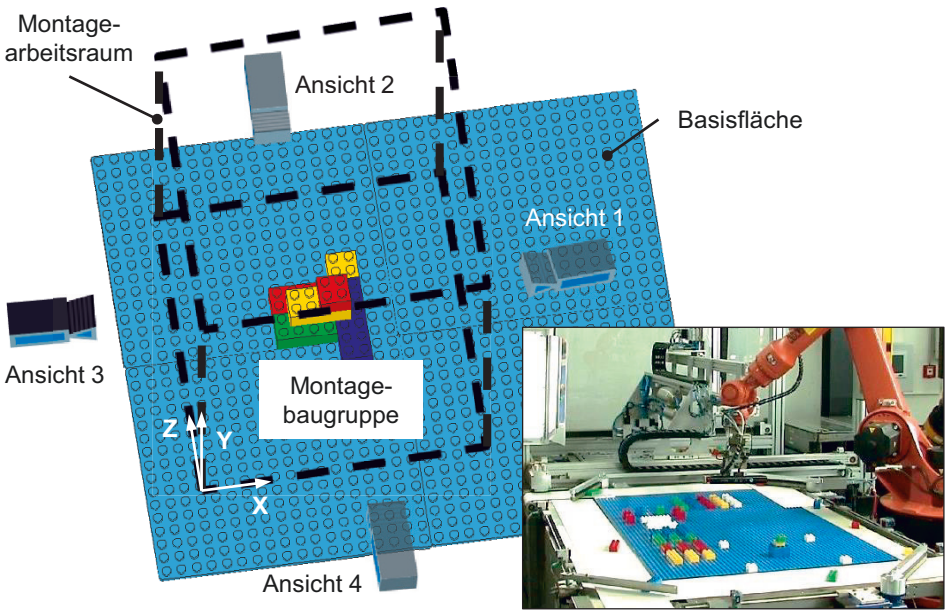


Bild 14.24 Sensorische Erfassung des Montagezustands

Zudem werden dem umlaufenden Förderband Bauteile in chaotischer Reihenfolge zugeführt, die mittels Bildverarbeitung hinsichtlich ihrer Abmessungen und Farbe klassifiziert werden. Aus dieser (extern beeinflussten) Zustandsveränderung resultiert die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Anpassung der Montageplanung und -optimierung, die den Umfang und die Flexibilität heutiger industrieller Steuerungskonzepte übersteigt, hier aber bereits demonstriert werden kann.

Abkürzungsverzeichnis

AE	Alarm und Events
APS	Advanced Planning & Scheduling
BDE	Betriebsdatenerfassung
BTR	Behind-Tape-Reader
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP	Computer Aided Planning
CAQ	Computer Aided Quality Assurance
CCU	Cognitive Control Unit
CIM	Computer Integrated Manufacturing
COM	Component Object Model
CPS	Cyber-Physical Systems

CRM	Customer Relationship Management
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, dt. Mehrfachzugriff mit Trägerkennung und Kollisionserkennung
DA	Data Access
DBMS	Datenbank Managementsystem
DCOM	Distributed Component Object Model
DNC	Direct Numerical Control
EDI	Electronic Data Interchange
EDIFACT	Electronic Data Interchange For Administration, Commerce and Transport
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ERP	Enterprise Resource Planning
FFS	Flexible Fertigungssysteme
FFZ	Flexible Fertigungszellen
FiBu	Finanzbuchhaltung
HDA	Historical Data Access
HMI	Human Machine Interface
HRM	Human Resource Management
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IT	Informationstechnik
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
LAN	Local Area Network
MC	Motion Control
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution Systems
MESA	Manufacturing Enterprise Solutions Accociation
MRP (14.2)	Manufacturing Resource Planning, Material Requirements Planning
NC	Numerical Control
OLE	Object Linking and Embedding
OPC	Open Platform Communications
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
QS	Qualitätssicherung
RC	Robot Control, dt. Robotersteuerung
SCADA	Supervisory Control and Data Access
SCM	Supply Chain Management
SOA	Service-Oriented Architecture
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Tool Data Management, dt. Werkzeugverwaltung
UA	Unified Architecture
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WZL	Werkzeugmaschinenlabor
WZV	Werkzeugverwaltung
XML	eXtensible Markuo Manguage
ZVEI	Zentralverband der elektronischen Industrie e.V.

Literaturverzeichnis

[AEG88] AEG Aktiengesellschaft: Produktionsleittechnik MCP, 1988. Firmenschrift

[AUTO93] Autorenkollektiv: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. (Reihe: Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993

[BAUE16] Bauernhansl, T.; Krüger, J.; Reinhart, G.; Schuh, G.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0: Abele, E. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V., 2016

[BING16] Bingler, D.; Sontow, K.: Die Zukunft von ERP im Kontext von Industrie 4.0. Berlin, 2016

[BOYW12] Boywitt, J.: Referenzstrategien zur ERP-Einführung im mittelständischen Maschinen- und Anlagenbau. (Reihe: Edition Wissenschaft). Aachen: Apprimus, 2012

[BREC11] Brecher, C. (Hrsg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. (Reihe: VDI-Buch). 1. Aufl. Berlin: Springer, 2011

[BREC12] Brecher, C.; Breitbach, T.; Müller, S.; Mayer, M. P.; Odenthal, B.; Schlick, C. M.; Herfs, W.: 3D Assembly Group Analysis for Cognitive Automation. In: Journal of Robotics, 2012, Nr. 9, S. 1–18

[BREC13] Brecher, C.; Müller, S.; Breitbach, T.; Lohse, W.: Viable System Model for Manufacturing Execution Systems. In: Procedia CIRP. 7. Jg., 2013, S. 461–466

[BREC14] Brecher, C.; Herfs, W.; Lohse, W.; Obdenbusch, M.: Vorsprung durch Wissenseinsatz: Industrie 4.0. In: Infoline. 17. Jg., 2014, Nr. 3, S. 6–10

[BREC15] Brecher, C.: Smart Automation Lab. URL: http://www.smartautomationlab.de. [Stand: 05.03.2015]

[DANG90] Dangelmaier, W.: Die C-Techniken – von CAx zu CIM. In: Zeitschrift für Logistik, 1990

[DIN10] Norm DIN 62541 (2010). OPC Unified Architecture

[DIN83] Norm DIN 66257 (1983). Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Begriffe

[DIN96] Norm DIN ISO 2806 (1996). Industrielle Automatisierungssysteme – Numerische Steuerung von Maschinen – Begriffe

[ECKE87] Eckelmann Industrieautomation: Betriebsdaten-Workstation für flexible Fertigungssysteme: Systembeschreibung. Wiesbaden, 1987. Firmenschrift

[EVER90a] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 1: Grundlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990

[EVER90b] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 3: Arbeitsvorbereitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990

[FAYZ10] Fayzullin, K.: Autonome Planung und Entscheidungsoptimierung in der Ablaufsteuerung flexibel automatisierter Fertigungssysteme. (Reihe: Ergebnisse aus der Produktionstechnik Werkzeugmaschinen. Bd. 2010,25). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl, 2010

[FRIE93a] Friedrich, A.: Offenes DNC-Kommunikationssystem für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. (Reihe: Fortschritt-Bericht VDI, Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993

[FRIE93b] Friedrich, A.; Friedrich, J.: Netzwerkkonzepte – Mit Feldbus und LAN zum integrierten Informationsverbundsystem. In: Workshops V: Automatisierung in der Qualitätssicherung durchgängige Lösungen für die Messtechnik, 7. Kongressmesse für industrielle Messtechnik MessCompü'93: Network GmbH (Veranst.)

[FRIE94] Friedrich, A.; Friedrich, J.: Datenübertragung in der NC-Verfahrenskette. In: NC-Verfahrenskette. Berlin: Beuth-Verlag, 1994, S. 105

[HACK86] Hackstein, R.: Klare Definition der C-Techniken. In: Markt & Technik, 1986, Nr. 36

[KLEM86] Klemmer, J.: Erfahrungen aus einer 10-jährigen DNC-Praxis im Flugzeugbau. In: ZwF. 81. Jg., 1986, Nr. 2

[KLET06] Kletti, J.: MES – Manufacturing Execution System. Moderne Informationstechnologie zur Prozessfahigkeit der Wertschopfung. Berlin: Springer, 2006

[KÖHL90] Köhler, C.: Der elektronische Leitstand Befehlsempfänger der PPS oder Partner der Werkstatt? In: VDI-Z. 132. Jg., 1990, Nr. 3

[MACC97] MacClellan, M.: Applying manufacturing execution systems. (Reihe: The St. Lucie Press/APICS series on resource management). Boca Raton, Fla., Falls Church, Va.: St. Lucie Press; APICS, 1997

[MESA97] MESA: MES Explained: A High Level Vision. White Paper No. 6. Pittsburgh, 1997

[N.N.99] N.N.: CAD/CAM. In: Computer@Produktion, 1999, Nr. 4

[NCG90] NC-Gesellschaft Arbeitskreis DNC: DNC im technologischen Umfeld, 1990

[NEIP91] Neipp, G.; Stracke, H.-J.: Einführung in die CIM-Praxis. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991

[OSTE14] Osterhage, W. W.: ERP-Kompendium. Eine Evaluierung von Enterprise Resource Planning Systemen. (Reihe: Xpert.press). Berlin: Springer Vieweg, 2014

[POSS06] Possel-Dölken, F.: Projektierbares Multiagentensystem für die Ablaufsteuerung in der flexibel automatisierten Fertigung. (Reihe: Berichte aus der Produktionstechnik. Bd. 2006,10). Aachen: Shaker, 2006

[PRIT91] Pritschow, G.; Spur, G.; Weck, M.: Leit- und Steuerungstechnik in flexiblen Produktionsanlagen. München: Hanser-Verlag, 1991

[ROBE87] Robert Bosch GmbH: CC 200/300 BABNET Kommunikationsverfahren. Erbach, 1987. Firmenschrift

[ROBE88] Robert Bosch GmbH: Tool-Management-System TOMS, 1988. Firmenschrift

[SAUE10] Sauer, O.: Trends in Manufacturing Execution Systems. In: Kacprzyk, J.; Huang, G. Q.; Mak, K. L.; Maropoulos, P. G. (Hrsg.) Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology. (Reihe: Advances in Intelligent and Soft Computing). Berlin: Springer, 2010, S. 685–693

[SIEM91] Siemens; Brill, M.: Offene Netze für die industrielle Kommunikation, 1991. Firmenschrift

[STEG11] Stegemann, A.: Konradin ERP-Studie 2011: Einsatz von ERP-Lösungen in der Industrie. Leinfelden-Echterdingen, 2011. Firmenschrift

[TÖNS89] Tönshoff, H. K.; Martens; Menzel: DNC – Entwicklung, Konzepte, Funktionen, Tendenzen. Vom Direct Numerical Control zum Distributed Numerical Control. In: VDI-Z. 131. Jg., 1989, Nr. 9

[TROV17] Trovarit AG: Alle ERP-Lösungen. URL: http://www.erp-matchmaker.com/alle-softwareloesungen.html. [Stand: 29.05.2017]

[VDI16] Richtlinie VDI 5600 (2016). Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems – MES)

[VDI72] Richtlinie VDI 3424 (1972). Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen – Direktsteuerung mit Hilfe von Digitalrechnern

[VOGE09] Vogel-Heuser, B.; Kegel, G.; Bender, K.; Wucherer, K.: Global Information Architecture for Industrial Automation. In: Automatisierungstechnische Praxis (atp). 51. Jg., 2009, Nr. 1, S. 108–115

[WARN93] Warnecke, H.-J.: Hat CIM noch eine Zukunft? In: CIM-Management, 1993, Nr. 2, S. 31

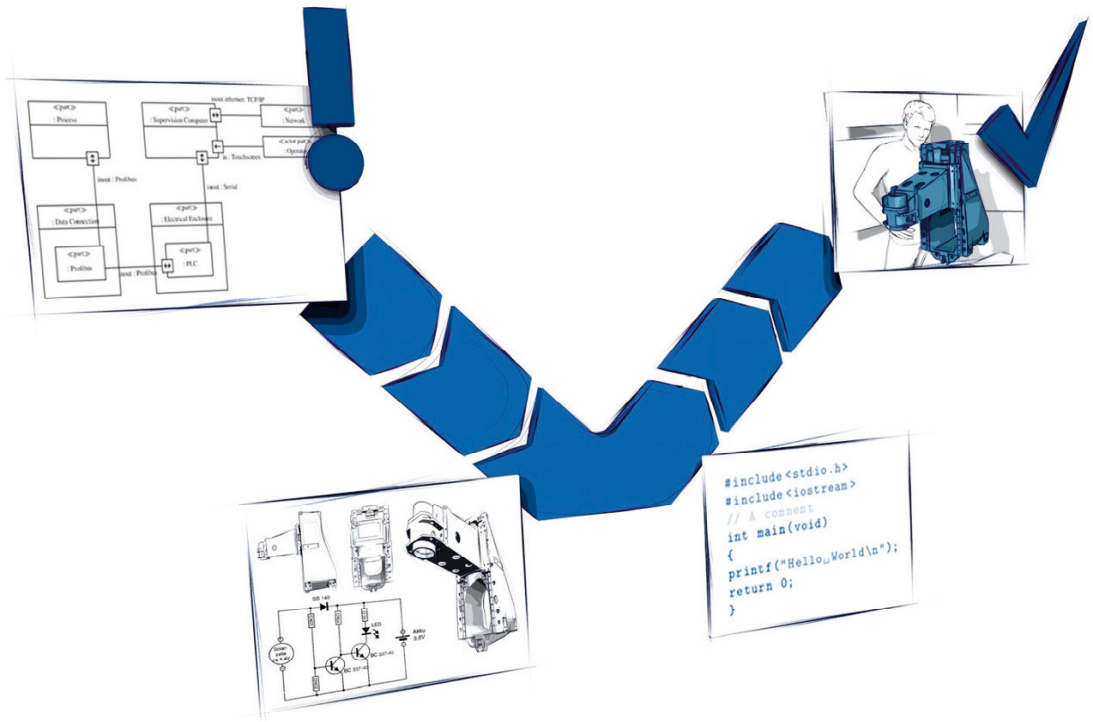
[WECK03] Weck, M.; Possel-Dölken, F.: Vertikale Integration. In: wt Werkstattechnik online. 5. Jg., 2003, Nr. 93, S. 366–373

[WECK90] Weck, M.; et al: Wege zur Verkürzung der Inbetriebnahme- und Stillstandszeiten komplexer Produktionsanlagen. In: Weck, M.; Eversheim, W.; König, W.; Pfeifer, T. (Hrsg.) Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: VDI-Verlag, 1990

[WECK91] Weck, M.; Lange, N.; Pauls, A.: Ablaufsteuerung und Werkzeugfluss koordinieren. In: Industrie-Anzeiger, 1991, Nr. 49/50, S. 18–20

[WECK97] Weck, M.: Benutzerorientierte Software sichert Anwendern Wettbewerbsvorteile. In: Industrie Anzeiger, 1997, Nr. 9

Kapitel 15



Engineering

Ich danke meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. Christian Ecker, Christian Fimmers M. Sc., Jerome Flender M. Sc., Christoph Pallasch M. Sc. und Simon Storms M. Sc. für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

Engineering



15.1 Softwareentwicklung – 672
15.1.1 Entwicklungsmodelle – 672
15.1.2 Entwicklungsphasen – 675
15.1.3 Modellgetriebene Softwareentwicklung – 679

15.2 Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen – 680
15.2.1 Einführung – 680
15.2.2 Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen – 681
15.2.3 Zusammenwirken zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion – 684
15.2.4 Komponenten und Verfahren der Elektrokonstruktion – 686
15.2.5 Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen – 696

Literaturverzeichnis – 708

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_15

Die Anforderungen in der Automatisierungstechnik hinsichtlich einer zuverlässigen und aus Sicht der Unternehmen, beherrschbaren Prozessausführung sind geprägt von langfristigen Entwicklungsprozessen, einer zunehmenden Interdisziplinarität sowie der kontinuierlichen Funktionserweiterung unter gleichzeitiger Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Aspekte. In diesem Zusammenhang muss auch das Engineering, d. h. die Planungs- und Entwicklungsaufgabe für automatisierungstechnische Systeme, diesen Anforderungen nachkommen und in Form einer geeigneten Methodik umgesetzt werden. Wichtige Bestandteile betreffen die Methodik des Engineerings, die Architekturmodellierung, das Systems Engineering, das Design, die Auslegung, die Implementierung und die Prüfung.

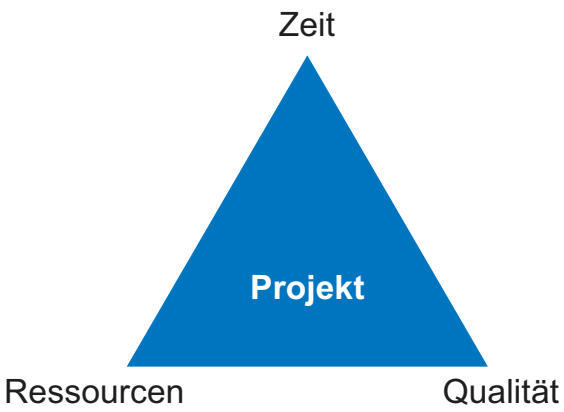
15.1 Softwareentwicklung

Die Entwicklung von Software ist eine zentrale Herausforderung in der Automatisierungstechnik, da sowohl mechatronische Produkte als auch automatisierte Produktionsanlagen, neben elektrischen und mechanischen Komponenten, Software für den Betrieb benötigen. Die Entwicklung von Software macht einen großen Anteil des Gesamtentwicklungsaufwands bei mechatronischen Systemen aus und beeinflusst die Qualität und Funktionalität der Automatisierungslösung entscheidend [STET04]. Angelehnt an die Entwicklung reiner Softwareprodukte wird Software auch in der Automatisierungstechnik systematisch entwickelt, um folgenden, sich widersprechenden Zielen gerecht zu werden, vgl. ◘ Bild 15.1:

- das Einhalten von geplanten Terminen,
- das Sicherstellen einer möglichst hohen Qualität der Software und
- die optimale Verwendung zur Verfügung stehender Ressourcen.

Durch die zunehmende Integration von Soft- und Hardware automatisierungstechnischer Komponenten sind die Ziele Termintreue und Software-Qualität von besonderer Bedeutung. Oft findet ein großer Teil der Softwareentwicklung in Interaktion mit der Hardwareentwicklung statt oder ist davon abhängig. Die zeitliche Koordination der Softwareentwicklung mit der Hardwareentwicklung ist für die Termintreue und für die optimale Nutzung der Entwicklungsressourcen der Hardwareentwicklung entscheidend. Fehler in der Steuerungssoftware einer Maschine führen nicht nur zu mangelnder Funktionalität, sie können auch mechanische Schäden verursachen. Bei der mechatronischen, d. h. interdisziplinären Entwicklung haben Verzögerungen in einem Fachbereich Auswirkungen auf die anderen beteiligten Disziplinen.

Neben den Softwareentwicklern sind in der Automatisierungstechnik auch Werkzeuge und Maschinen Ressourcen, die für die Entwicklung koordiniert werden müssen. In diesem Zusammenhang ist es schwierig, die richtige Anzahl an Entwicklern für ein Projekt zu bestimmen, die sich während eines Entwicklungsprozesses auch ändern bzw. schwanken kann. So sind zur Konzeptionierung und zur Festlegung einer Software-Architektur weniger Entwickler nötig, als zur Implementierung. Spätestens bei der Integration und Inbetriebnahme von Steuerungssoftware wird zudem auch die zu steuernde Maschine oder Prototypen des Produkts als Ressourcen benötigt. Um nicht mit anderen Disziplinen in Konflikt zu geraten, ist daher die Koordination des Zugriffs auf die Maschinenressource erforderlich.



◘ **Bild 15.1** Magisches Dreieck. Nach [HEIN15]

15.1.1 Entwicklungsmodelle

In der Softwareentwicklung haben sich zwei Ansätze etabliert, die mit verschiedenen Ansichten bezüglich eines idealen Verlaufs von Entwicklungsprojekten einhergehen. Die Idee des „klassischen" Ansatzes basiert auf dem Konzept, die gesamte zu entwickelnde Software zu Beginn des Entwicklungsprozesses zu planen, die Pläne zu verfeinern und dann zu realisieren. In manchen Entwicklungsmodellen wird die Existenz von Fehlern in der Planung und Realisierung durch zusätzliche Iterationen berücksichtigt, in anderen Modellen, die streng sequenziell ablaufen, führen Fehler zu Störungen im Entwicklungsprozess. Klassische Entwicklungsprozesse sind formal bis ins Detail geregelt und erzeugen neben dem eigentlichen Entwicklungs- auch Verwaltungsaufwand.

Gegenüber den etablierten Verfahren (▶ Kap. 15.1.1.1, 15.1.1.2) wird bei der agilen Softwareentwicklung (▶ Kap. 15.1.1.3) ein schlanker, flexibler Entwicklungsprozess verfolgt, der auch die soziale Interaktion innerhalb der Entwicklungsteams berücksichtigt und Änderungen der Anforderungen an die zu entwickelnde Software während der Entwicklung ermöglicht [GREC10].

15.1.1.1 Wasserfall-Modell

Das Wasserfall-Modell ist ein lineares Vorgehensmodell, das die Softwareentwicklung in aufeinander folgende Phasen strukturiert. Am Ende jeder Phase fließen die Ergebnisse in die nächste Phase zur Weiterbearbeitung ein.

Jede Phase endet mit einem Meilenstein und einem Projektergebnis, wie in Bild 15.2 dargestellt. Im Gegensatz zum iterativen Vorgehen, hat das Wasserfall-Modell den Nachteil, dass entstandene Fehler in einer Phase einen Rückschritt in die vorhergehende Phase verursachen, da keine Rückführung von Zwischenergebnissen vorgesehen ist. Ein Rückschritt verursacht wiederrum eine Verzögerung aller nachfolgenden Phasen und hemmt somit die Gesamtentwicklung des Projektes. Insbesondere bei großen bzw. komplexen Projekten hat dieser Umstand hohe negative Auswirkungen auf das Ergebnis und die Dauer des Projektes.

15.1.1.2 V-Modell

Das V-Modell ist als Weiterentwicklung des Wasserfall-Modells entstanden, um dessen Nachteile in einer monolithischen Integration von Entwicklung und Test sowie bei fehlender Granularität des Systementwurfes auszugleichen [BRAN15]. Analog zum Wasserfall-Modell ist das V-Modell in Phasen unterteilt. Ergebnisse werden von Phase zu Phase weitergegeben. Zusätzlich definiert das V-Modell das Vorgehen zur Qualitätssicherung ebenfalls phasenweise.

Zunächst wird mit einer funktionalen Spezifikation begonnen, die schrittweise weiter ausdetailliert wird, wie in Bild 15.3 dargestellt. Die letzte Phase der Detaillierung bildet die eigentliche Softwareentwicklung bzw. Implementierung. Die Qualitätssicherung beginnt im Anschluss mit einer zunächst sehr feinen Granularität. Das System wird in seinen einzelnen Modulen getestet, um frühzeitig Implementierungsfehler offenzulegen. Von Phase zu Phase nimmt

Bild 15.2 Wasserfall-Modell. Nach [HARW12]

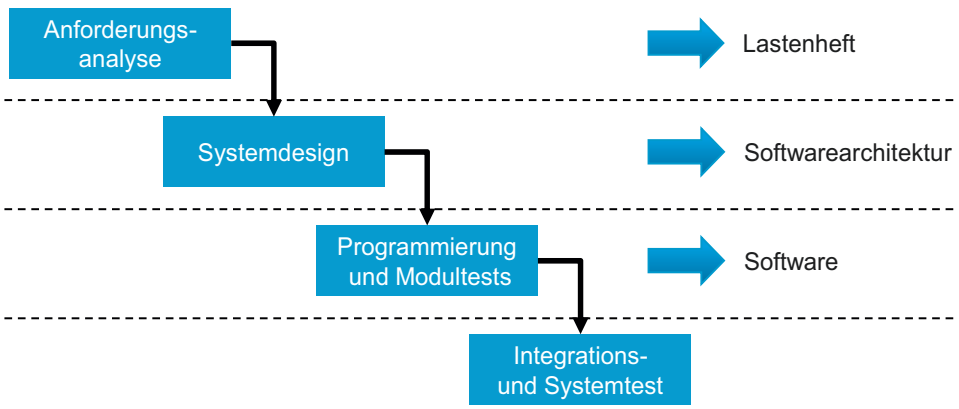
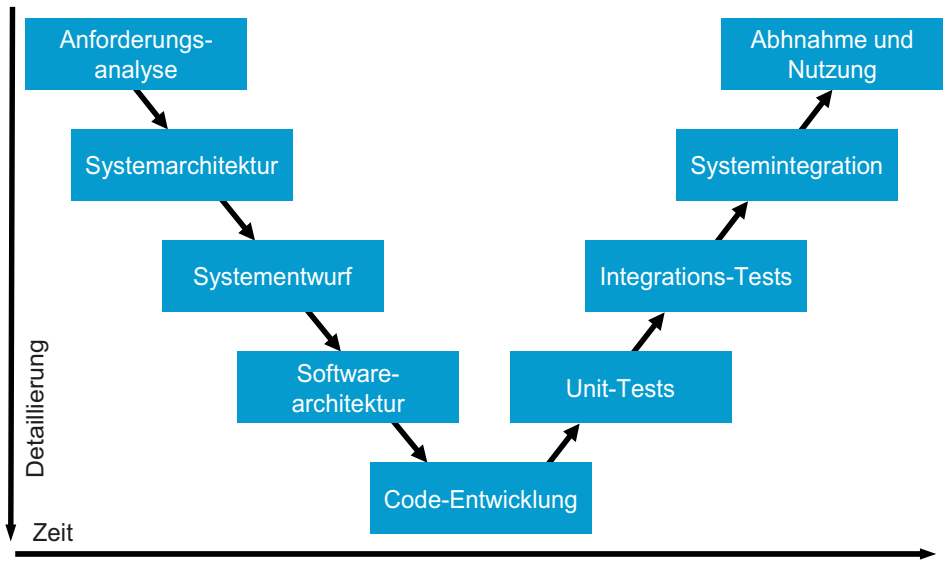


Bild 15.3 V-Modell. Nach [BRAN15]

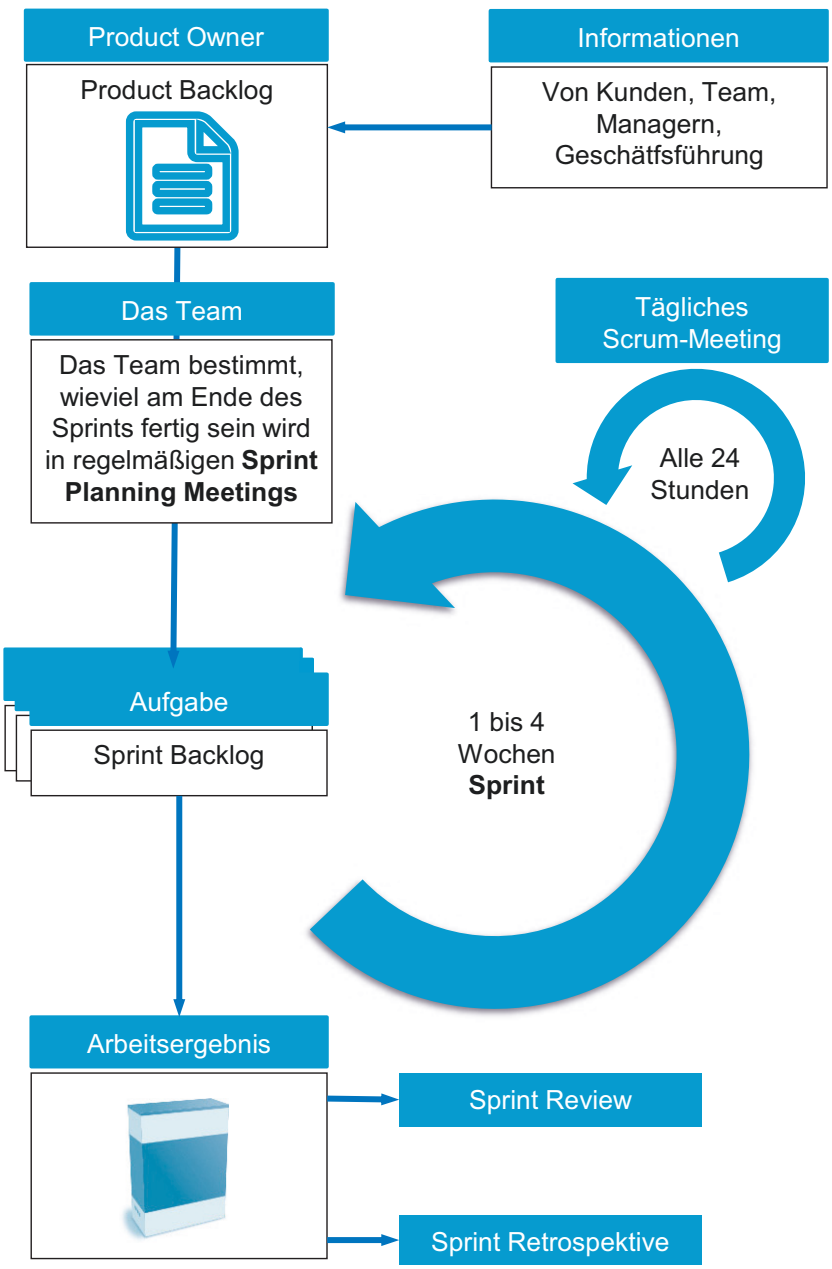


die Granularität ab, um schließlich das System als Gesamtheit testen zu können. Die letzte Phase der Qualitätssicherung ist die Abnahme und die Nutzung der Software.

Jedem Schritt auf dem Weg zur Code-Entwicklung steht ein Schritt zur Verifizierung und Validierung gegenüber. Wird ein Fehler beim Ablauf der Qualitätssicherung festgestellt, muss die Schleife über den entsprechenden Spezifizierungs-/Implementierungsschritt erneut durchlaufen werden.

15.1.1.3 Agile Softwareentwicklung

Durch die Steuerung des Entwicklungsprozesses und der damit verbundenen Verwaltung wird ein Teil der Entwicklungsressourcen nicht wertschöpfend eingesetzt. Der hohe Anteil nicht-wertschöpfender Tätigkeiten bei den klassischen Entwicklungsmodellen hat zur Ausbildung agiler Softwareentwicklungsmethoden geführt. Diese zeichnen sich durch weniger Verwaltungsaufwand und hohen Wertschöpfungsgrad aus, da die Entwicklung durch die Entwickler selbst bedarfsgetrieben gesteuert wird. Im Gegenzug ist der Entwicklungsprozess weniger detailliert geplant. [HARW12] Ein Beispiel eines agilen Vorgehensmodells ist SCRUM, das sich als Referenzmodell in der agilen Softwareentwicklung etabliert hat. Das Vorgehensmodell von SCRUM kann aber auch für Aufgaben in anderen Bereichen, wie beispielsweise dem Management, eingesetzt werden. Der Entwicklungsprozess in SCRUM wird zyklisch in sogenannten „Sprints“ durchgeführt, die typischerweise zwischen 2 und 7 Wochen dauern, ◘ Bild 15.4. In einem Projekt ändert sich die Sprint-



◘ **Bild 15.4** Vorgehensmodell von SCRUM. Nach [HARW12]

dauer grundsätzlich nicht. Ein Sprint kann insbesondere nicht verlängert werden. Am Anfang des Sprints wird geplant, welche Features innerhalb des Sprints realisiert werden sollen. Das Entwicklungsteam bestimmt in diesem Schritt selbst, wieviel realisiert werden kann. Im Vorfeld der Entwicklung nimmt ein „Product Owner" die Informationen über das zu entwickelnde Produkt entgegen und bestimmt die Reihenfolge der Abarbeitung von Features. Nach jedem Sprint werden die realisierten, fertigen Features dem Product Owner demonstriert. Mögliche Abweichungen von der geforderten Funktionalität, wie beispielsweise durch ein fehlerhaftes Verständnis der zu steuernden mechanischen Komponenten, kann durch den Product Owner am Ende jedes Sprints festgestellt werden [HANS10].

Die Idee hinter dem iterativen Vorgehen basiert auf der Erfahrung, dass eine frühe ausführliche Planung der Entwicklung den Projekterfolg beeinträchtigt. Gründe hierfür sind vor allem eine schlechte Einschätzung der Produktentwicklungsdauer, abweichende Kalkulationen von Kosten und im Abschluss die Entwicklung eines Produktes, das den Kundenbedarf nicht erfüllt. Zur kontinuierlichen Verbesserung des Entwicklungsprozesses werden nach jedem Sprint Hindernisse bei der Entwicklung durch das Entwicklungsteam genannt, die für die folgenden Sprints behoben werden sollen.

Als agiles Vorgehensmodell fördert SCRUM die Transparenz des Entwicklungsfortschritts. Während bei konventionellen Verfahren Verzögerungen häufig erst zum geplanten Ende des Entwicklungsprozesses gegenüber dem Projektmanagement kommuniziert werden, kann der Entwicklungsfortschritt beim Einsatz von SCRUM zum Ende jedes Sprints nachvollzogen werden. Im Bereich der Automatisierungstechnik muss die Besonderheit berücksichtigt werden, dass der Product Owner interdisziplinär arbeiten muss. Insbesondere die Vermittlung zwischen mechanischer/elektrischer Entwicklung und der eigentlichen Softwareentwicklung stellt eine Kernherausforderung der Aufgaben des Product Owners dar.

15.1.2 Entwicklungsphasen

In Folgenden werden die Phasen eines Softwareentwicklungsprojekts gemäß dem V-Modell und wesentliche Unterschiede zum agilen Vorgehen dargestellt. Die Namen der Entwicklungsphasen können zwischen verschiedenen Entwicklungsprozessmodellen variieren.

15.1.2.1 Planungsphase

Zu Beginn des Softwareentwicklungsprozesses wird die Planungsphase durchlaufen, in der die Durchführbarkeit des Softwareprojektes untersucht wird. Sie stellt somit eine Voruntersuchung bzw. Durchführbarkeitsstudie dar. Als Ergebnisse dieser Phase werden die Anforderungen des Auftraggebers an das zu entwickelnde Softwareprodukt in Form eines Lastenheftes festgelegt. Darüber hinaus werden in dieser Phase eine erste Kostenkalkulation sowie ein erster Projektplan erstellt. Das Lastenheft bildet die Grundlage für die Erstellung eines Pflichtenheftes in der hierauf folgenden Definitionsphase.

In agilen Softwareprojekten wird davon ausgegangen, dass sich die Anforderungen des Auftraggebers im Verlauf des Projekts ändern können. Die Kostenkalkulation ist daher potenziell mit einer großen Ungenauigkeit behaftet.

15.1.2.2 Definitionsphase

Die Definitionsphase nimmt eine entscheidende Rolle im Softwareentwicklungsprozess ein, da in dieser Phase die Anforderungen an das Softwareprodukt in Zusammenarbeit mit dem Endanwender definiert werden. Die Anforderungen an das zu entwickelnde System werden in einem Pflichtenheft festgelegt, welches im weiteren Verlauf der Softwareentwicklung schrittweise detailliert wird. Das vollständige Ergebnis der Definitionsphase wird als die Produktdefinition bezeichnet, welche vier Teildokumente umfasst:

- Pflichtenheft,
- Produktmodell,
- Konzept der Benutzeroberflächen,
- Benutzerhandbuch.

Zur Beschreibung von Datenmodellen werden in den einzelnen Entwicklungsphasen, neben umgangssprachlichen Beschreibungen, bevorzugt formale Notationen verwendet. Diese Notationen verwenden Symbole zur Beschreibung der gewünschten Softwareeigenschaften. Je nach Zielsetzung der einzelnen Entwicklungsphasen kommen unterschiedliche Notationen zum Einsatz. In der Definitionsphase werden beispielsweise Datenflussdiagramme, Petri-Netze, Entity-Relationship-Diagramme, Klassendiagramme, Zustandsautomaten oder Interaktionsdiagramme verwendet.

15.1.2.3 Entwurfsphase

Nachdem in der Definitionsphase die Anforderungen an das Softwareprodukt spezifiziert wurden, werden in der Entwurfsphase geeignete Datenmodelle zur Erfüllung des festgelegten Funktionsumfangs entworfen. Neben der Beschreibung der Abläufe durch Zustandsautomaten und Interaktionsdiagramme, wird die Datenstruktur mittels Klassendiagrammen festgelegt [RUMP11]. Ergänzend dazu werden Softwareschnittstellen definiert, die eine parallele Softwaremodulentwicklung ermöglichen. Hierzu zählen sowohl die Schnittstellen innerhalb eines Programms als auch die Schnittstellen zur Kommunikation mit anderen Programmen (z. B. über ein Netzwerk). Als Ergebnisse der Entwurfsphase liegen die detaillierten Beschreibungen der dynamischen Aspekte (z. B. der Fertigungsabläufe) und der statischen Eigenschaften (z. B. der Anlagenstruktur) als Da-

tenmodell vor. In der Entwurfsphase wird die Softwarearchitektur des Softwaresystems entworfen.

15.1.2.4 Implementierungsphase

In dieser Phase werden die Datenmodelle der vorangegangenen Phase unter Verwendung einer Programmiersprache in einen Programmquelltext überführt. Dieser Vorgang wird häufig als „Programmierung“ bezeichnet. Das Ergebnis dieser Phase ist ein ausführbares Programm. Entsprechend der Zielsetzung in dieser Entwicklungsphase werden neben Pseudocode und Struktogrammen Programmablaufpläne verwendet. Die genormten Symbole des Programmablaufplans sowie des Nassi-Shneiderman-Struktogramms sind exemplarisch in Bild 15.5 (DIN 66001, DIN 66262, DIN 66261) und Bild 15.6 dargestellt.

Das Programm, d. h. alle vom Rechner zu verarbeitenden Befehle und Daten, werden rechnerintern im sogenannten Maschinencode, einer Folge aus den Binärzeichen „0“ und „1“, gespeichert. Diese Verschlüsselung des Programmablaufs ist bei jedem Rechnerfabrikat anders. Eine Program-

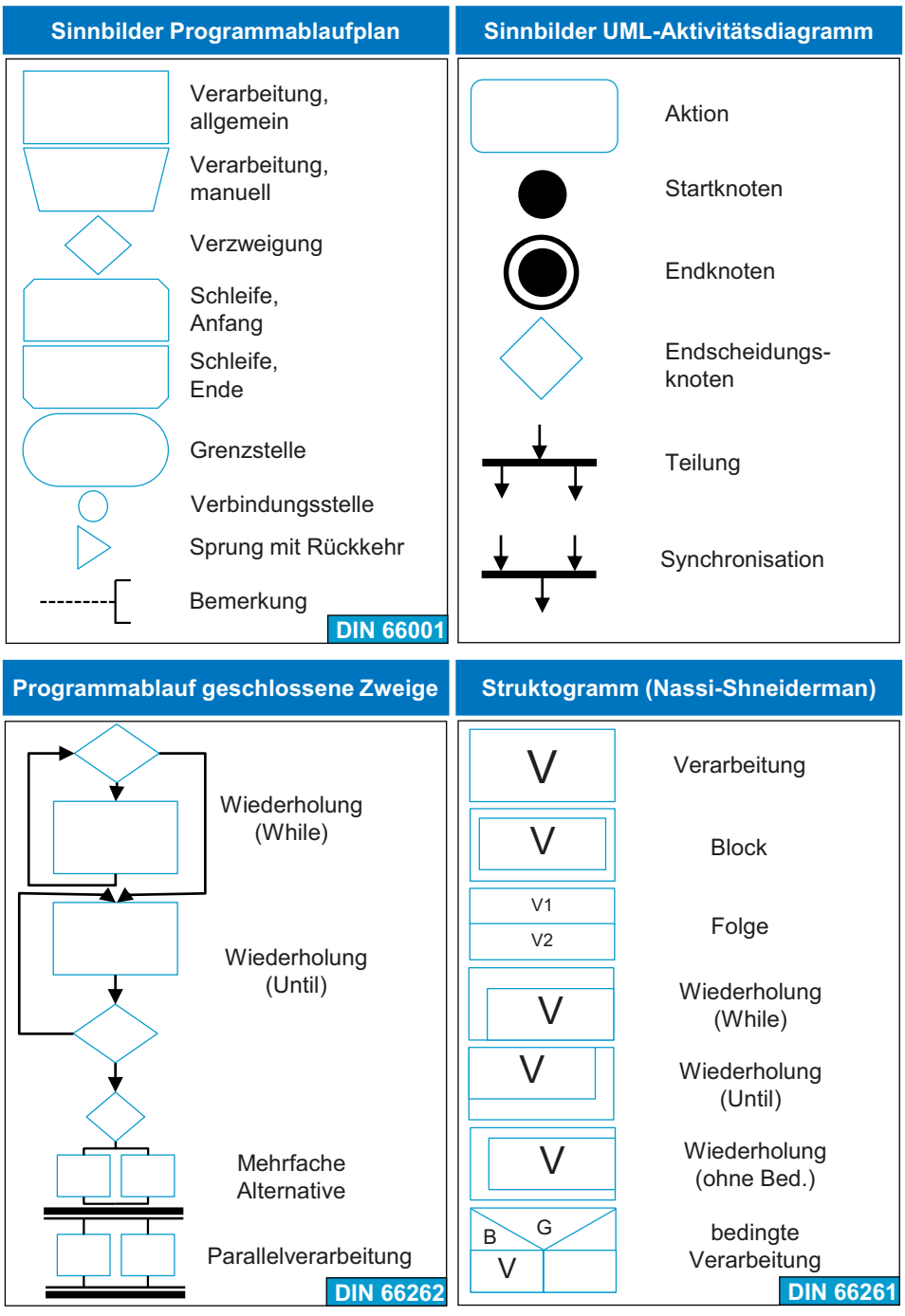


Bild 15.5 Programmdokumentation durch Programmablaufpläne und Struktogramme

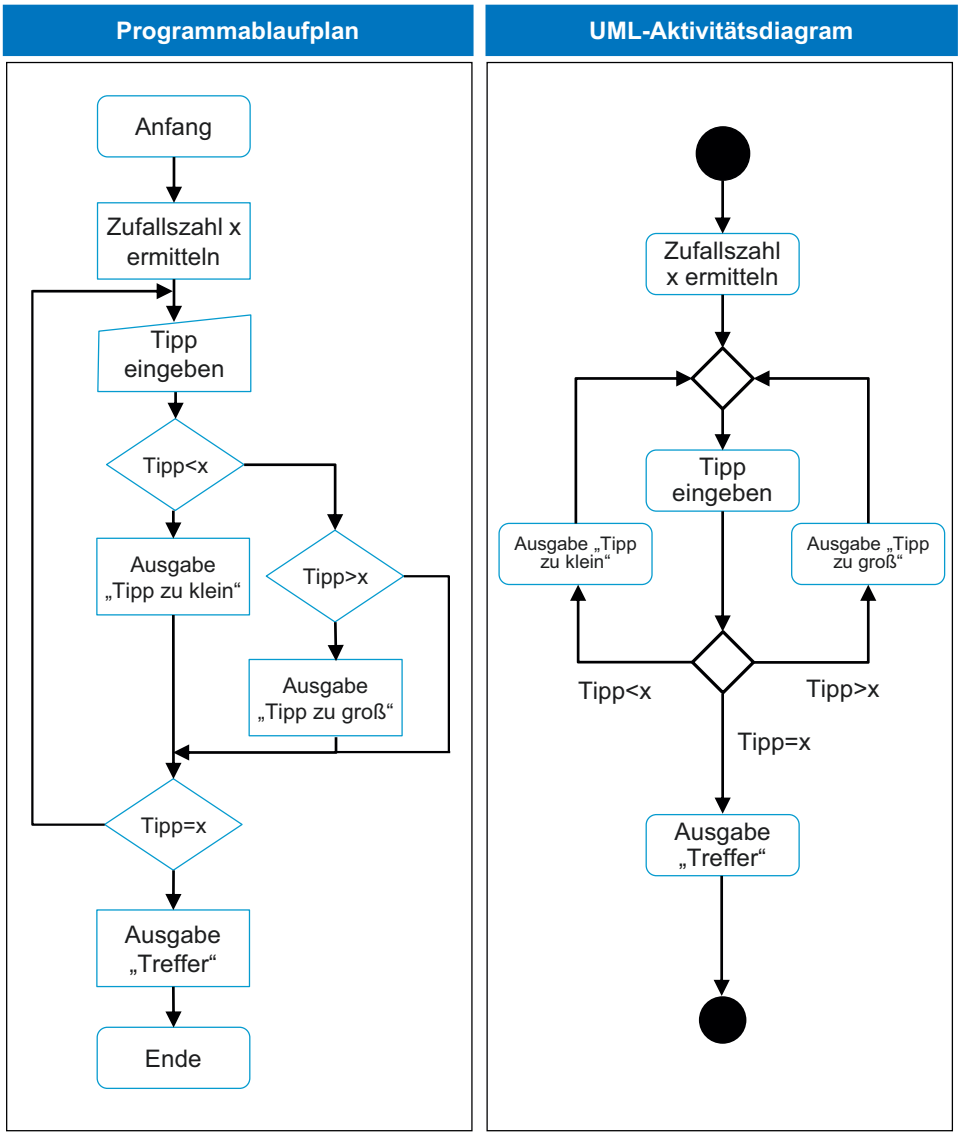


Bild 15.6 Programmbeispiel als Ablaufplan und UML-Aktivitätsdiagram. Nach [WEIL14]

mierung im Maschinencode, der auch als „Maschinensprache“ bezeichnet wird, ist sehr aufwendig. Es wurden daher Programmiersprachen entwickelt, die der menschlichen Ausdrucksweise angepasst sind und mit denen die Problemstellung einfach zu formulieren ist. Allerdings müssen die Programme, bevor sie im Rechner ablaufen können, mit Hilfe von Übersetzern bzw. Compilern in die für den Rechner verständliche Maschinensprache übertragen werden.

Programmiersprachen lassen sich in verschiedene Klassen einteilen, Bild 15.7. Wichtige Merkmale sind, außer der Einteilung in maschinen- und problemorientierte Sprachen, die Begriffe Programmierkomfort, Programmlaufzeit und Speicherplatzbedarf, Modularität und Wartbarkeit.

In der Prozessrechentechnik, in der kurze Programmlaufzeiten und kleine Programmlängen besonders bei schnellen, zeitkritischen Prozessen angestrebt werden, erfolgte die Programmierung bisher überwiegend in einer maschinenorientierten Sprache. Vernachlässigt man die Maschinensprache in der Betrachtung (die im eigentlichen Sinn keine Programmiersprache ist) dann stehen dem Anwender die sogenannten Assemblersprachen zur Verfügung. Mit ihnen lassen sich die Rechnerbefehle unter Verwendung eines mnemotechnischen Codes (leicht zu merkende Abkürzungen) angeben. Das in der Assemblersprache geschriebene Anwenderprogramm wird mittels eines Übersetzungsprogramms, dem sogenannten Assembler, in den Maschinencode übersetzt („assembliert“).

Die maschinenorientierte Programmierung in der Assemblersprache erfordert genaue Kenntnisse über die rechnerinterne Programmverarbeitung, da jeder Verarbeitungsschritt einzeln vorzugeben ist. Jedem Befehl des Quellprogramms entspricht nach der Assemblierung (Übersetzung in die Maschinensprache) ein Befehl oder eine Befehlsgruppe im sogenannten Objektprogramm, sodass auch hinsichtlich der Anzahl der benötigten Arbeitsspeicherzellen ein eindeutiger Bezug besteht.

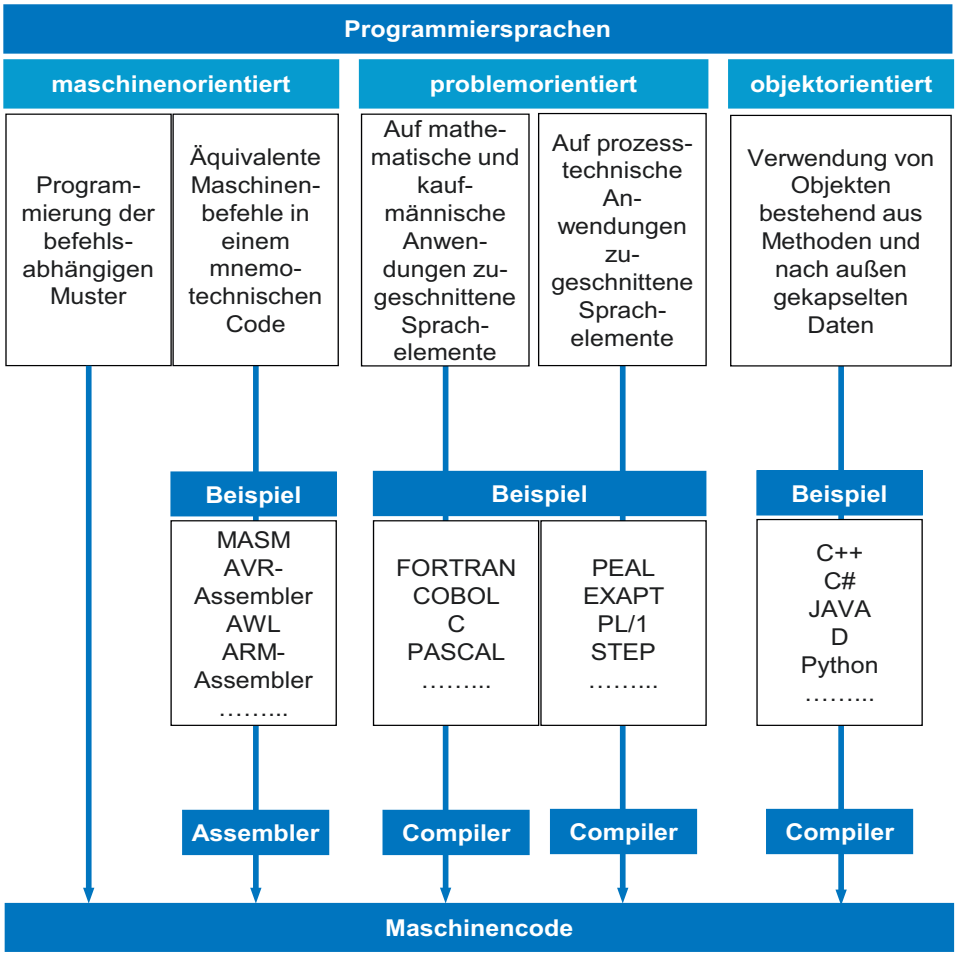


Bild 15.7 Einteilung von Programmiersprachen

15

Die Rechenleistung heutiger Prozessoren sowie der zur Verfügung stehende Speicher und Echtzeit-Betriebssysteme ermöglichen bei Steuerungen die Programmierung in sogenannten problemorientierten Sprachen. Der Nachteil eines solchen compiler-erzeugten und weniger optimierten Codes betrifft insbesondere die geringere Geschwindigkeit und der höhere Arbeitsspeicherbedarf. Dieser Nachteil wird jedoch durch die sehr hohe Leistungsfähigkeit der Systeme meist ausgeglichen, sodass in der Regel die Vorteile modularer, portierbarer und offener Steuerungsstrukturen auf Hochsprachenbasis überwiegen. Problemorientierte Sprachen (z. B. Pascal, C, FORTRAN, Cobol, Basic usw.) verfügen über Sprachelemente, die auf mathematisch-wissenschaftliche, kaufmännische oder bestimmte technische Probleme zugeschnitten sind. Sie sind losgelöst von der internen Rechnerstruktur und für verschiedene Rechner anwendbar. Die in einer problemorientierten Sprache geschriebenen Programme werden mit Hilfe von Compilern in den Maschinencode übersetzt (kompiliert) oder als sogenannte Interpretersprachen zur Laufzeit durch einen Interpreter ausgewertet und ausgeführt. Zusätzlich zur leichteren Lesbarkeit des Programmtextes ist der Test solcher Programme mit Hilfe spezieller Testprogramme (Debugger) möglich. Auch für die Programmierung des Bearbeitungsablaufs zur Werkstückherstellung mit numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, wurden problemorientierte Programmiersprachen, wie z. B. EXAPT, EASYPROG, PROGRAMAT u. a., entwickelt.

Manche der prozeduralen Programmiersprachen (C, Pascal usw.) sind nicht nur problemorientiert, sondern sind auch zu objektorientierten Sprachen (Java, Smalltalk, Eiffel, C++, C, objektorientiertes Pascal usw.) erweitert worden. Der Unterschied zwischen prozeduralen und objektorientierten Sprachen besteht darin, dass bei letzteren Daten und Funktionen (Methoden) zu Klassen zusammengefasst werden. Die Daten einer Klasse sind von außen nicht zugänglich, sondern müssen über dafür vorgesehene Methoden gelesen oder verändert werden. Weiterhin können Klassen ihre Eigenschaften an von ihnen abgeleitete Klassen vererben. Der Vorteil des Konzeptes der objektorientierten Programmierung liegt in der besseren Übersichtlichkeit des erstellten Programmcodes und in der guten Weiterverwendbarkeit bereits erstellter Klassen, da definierte Schnittstellen zu jeder Klasse existieren und außerdem auf vorhandene Klassen aufgebaut werden kann (Vererbung).

Das bedeutet z. B., dass eine alte Klasse beliebig gegen eine neuentwickelte Klasse ausgetauscht werden kann, falls

die Schnittstelle der neuen Klasse weiterhin die Methoden der alten Klasse zur Verfügung stellt. Wie die Daten in der Klasse verwaltet werden und welche Daten genau vorhanden sind, ist dabei unerheblich. Dieser Aspekt trägt ganz erheblich zu einer stärkeren Modularität und Modifizierbarkeit der erstellten Software bei. Ein zusätzlicher Vorteil dieser Programmiertechnik liegt in der sogenannten Kapselung: Fremde Objekte erhalten keine Erlaubnis, auf Daten im geschützten Bereich einer Klasse direkt zuzugreifen. Vielmehr müssen definierte Schnittstellen zur Kommunikation mit dem Objekt benutzt werden [OEST09].

Objektorientierte Programmierung wird inzwischen in vielen Bereichen nutzbringend angewandt. Mit objektorientierter Programmierung (OOP) werden Datenbanken, Texteditoren und Bedienoberflächen ebenso programmiert wie beispielsweise Betriebssysteme. Auch im mathematisch-wissenschaftlichen und fertigungstechnischen Umfeld wird die objektorientierte Programmierung erfolgreich eingesetzt. So lassen sich die Verarbeitung geometrischer Elemente und deren Darstellung ebenso auf Objekte abbilden wie Materialtransportaufgaben oder umfangreiche Fertigungsleitsysteme.

Basierend auf der verbreiteten, auf prozeduraler Programmierung basierenden Norm IEC 61131-3, wurde mit der Norm IEC 61499 eine objektorientierte Erweiterung geschaffen. Speziell für die IEC 61131-3 wurde ebenfalls eine objektorientierte Erweiterung standardisiert [JOHN09].

Begleitend zur Programmierung erfolgt in der Implementierungsphase die Dokumentation des Programmquelltextes. Die Dokumentation ist besonders für die spätere Wartung der Software in der Wartungs- und Pflegephase erforderlich und wichtig.

15.1.2.5 Abnahme- und Einführungsphase

In der Abnahmephase wird das Softwareprodukt durch den Auftraggeber im Hinblick auf die im Pflichtenheft formulierten Eigenschaften überprüft. Hierbei wird ein Abnahmeprotokoll durchlaufen, in welchem die Funktionsfähigkeit der Software mittels zuvor vereinbarter Testdaten überprüft wird. In der Einführungsphase erfolgen, neben der Installation und Inbetriebnahme des Softwareproduktes auch die Schulung der Benutzer sowie eine mögliche Ablösung eines bestehenden Softwaresystems durch die neu entwickelte Software.

15.1.2.6 Wartungs- und Pflegephase

Auf die Inbetriebnahme folgt die Wartungs- und Pflegephase. Da Anforderungen an Softwaresysteme im Laufe der Zeit regelmäßigen Veränderungen unterworfen sind (z. B. PLZ- oder Währungsumstellung), sollte die Software schon in der Entwurfsphase entsprechend wartungsfreundlich gestaltet und in der Implementierungsphase hinreichend dokumentiert werden. Andernfalls kann die Nachbesserung dieser Versäumnisse in der Wartungsphase zu signifikanten Wartungskosten und somit zu einer Steigerung der Gesamtkosten der Software führen.

15.1.3 Modellgetriebene Softwareentwicklung

Konventionelle Softwareentwicklungsmethoden basieren auf der Tatsache, dass der Entwickler die Systemspezifikation mittels einer Programmiersprache in eine konkrete Implementierung überführt. Dies geschieht häufig auf Basis eines Modells für die Systemspezifikation oder dem Verhalten einzelner Softwaremodule. Im einfachsten Fall geschieht dies unabhängig von einem Modell auf Basis der Implementierungserfahrungen des jeweiligen Entwicklers und unterliegt intrinsischen Motiven. Eine auf Basis von Modellen vorangetriebene Entwicklung wird modellbasierte Softwareentwicklung genannt. Der Vorteil liegt in dem Vorhandensein eines oder mehrerer Modelle, die aufgrund der Übersichtlichkeit die Komplexität des eigentlichen Codes abstrahieren und Zusammenhänge einzelner Module in verständlicher Form wiederspiegeln. Die Modelle werden parallel zur Implementierung eingesetzt. Werden Zusammenhänge in der Implementierung einzelner Module verändert, müssen die entsprechenden Modelle ebenfalls aktualisiert werden, damit diese die Implementation richtig wiederspiegeln können. Erfahrungsgemäß wird dies jedoch aufgrund des zusätzlichen Aufwandes im Laufe der Entwicklung nicht weiterverfolgt.

Um die Vorteile der modellbasierten Softwareentwicklung dennoch weiter nutzen zu können, knüpft hier die modellgetriebene Softwareentwicklung an. Bei der modellgetriebenen Softwareentwicklung (engl. „Model Driven Software Development“, kurz MDSD) werden Modelle als eigentlicher Programmcode eingesetzt. Aus vorhandenen Modellen wird mittels eines Generators automatisch Quellcode erzeugt, dessen Ablaufverhalten konform zum Modell eingehalten wird. In der Praxis existieren Code-Generatoren, die zumindest Teile des Codes aus Modellen herleiten, um die Entwicklung so zu unterstützen.

Während Modelle für fachliche Entscheidungen zur Lösung von Problemen eingesetzt werden, führen Generatoren die technische Umsetzung aus. Modelle beziehen sich immer auf einen bestimmten Fachbereich bzw. eine Domäne. Ein für einen bestimmten Fachbereich bzw. eine bestimmte Domäne spezifiziertes Modell für die Beschreibung von Lösungen wird domänenspezifische Sprache genannt (engl. „Domain Specific Language“, kurz DSL). Domänenspezifische Sprachen sind gezielt ausgelegt, eine domänenspezifische Abstraktion des fachlichen Bereichs abzudecken und so einer formalen Modellierung zugäng-

lich zu machen. Beispielsweise ließe sich für die Ablaufbeschreibung von Automatisierungsprozessen eine entsprechende Sprache entwickeln, die einzelne Prozessschritte mit Hilfe einer Menge an wohldefinierten Beschreibungselementen abbildet und so auf abstrakterer Ebene die Beschreibung eines Ablaufs wiederspiegeln kann. Konkrete Anweisungen mit Hilfe objektorientierter, maschinenorientierter oder problemorientierter Programmiersprachen würden in diesem Fall nicht benötigt, da diese durch die Beschreibungselemente der Sprache vollständig abgedeckt werden können [STAH12].

Eine weitere Form der Generierung von Code in der modellgetriebenen Softwareentwicklung basiert auf Datensätzen von Konfigurationsdaten. Hierbei wird durch Konfiguration entsprechender Optionen eine vorgefertigte Codeschablone angepasst, um so das gewünschte Verhalten zu erreichen. Beispielsweise kann durch geeignete Wahl von Konfigurationsparametern die Art und Weise der Bearbeitung eines Bauteils in einer Produktionslinie beeinflusst werden. In Relation dazu stehende Programme für die Ausführung von Aktionen (beispielsweise Roboter- oder SPS-Programme) werden konform zu den Konfigurationsparametern angepasst [THIE10].

15.2 Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen

15.2.1 Einführung

Die Leistungsfähigkeit moderner, automatisierter Werkzeugmaschinen und komplexer Fertigungsanlagen wird heute entscheidend durch elektrische, elektronische und Software-Komponenten bestimmt. Wie in Bild 15.8 gezeigt, realisieren diese Komponenten die Energieversorgung sowie die zur Automatisierung der Anlagen notwendigen Steuerungsfunktionen und bilden wichtige Sicherheitsfunktionen zum Schutz von Personal und Anlage. Die Auswahl, Auslegung und Verschaltung dieser Komponenten im Rahmen der Elektrokonstruktion ist damit ein wichtiges, funktions- und qualitätsbestimmendes Element bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen bzw. der Projektierung komplexer Fertigungsanlagen.

Aus der in Bild 15.9 gezeigten funktionalen Struktur der elektrischen und elektronischen Komponenten einer Werkzeugmaschine lässt sich die Interaktion der wesentlichen Domänen der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen ableiten.

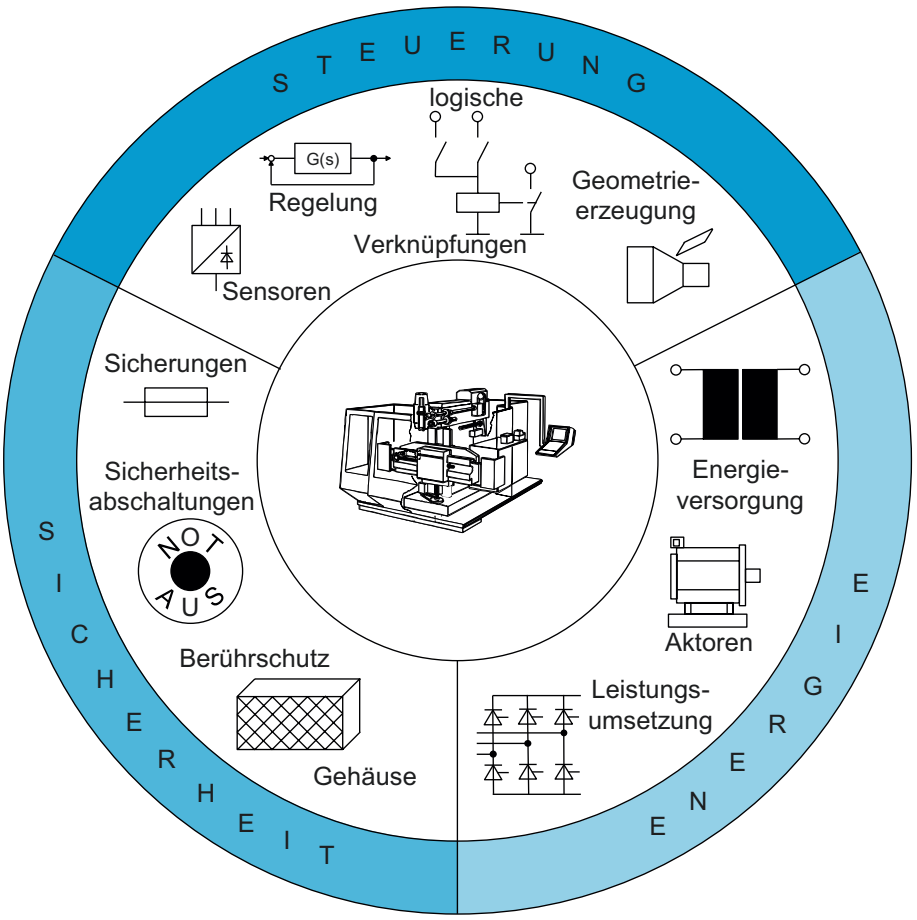


Bild 15.8 Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen

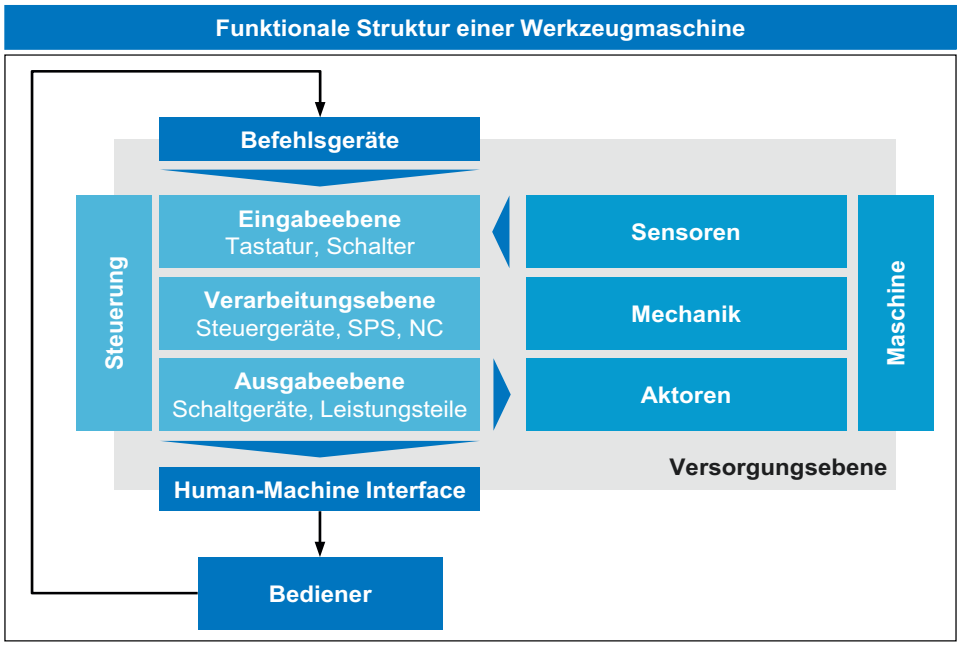


Bild 15.9 Komponenten der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen

Sensoren, wie z. B. Taster, Schalter oder Messsysteme, geben Informationen über den Maschinenzustand an die Steuerungsebene der Maschine weiter. In der Steuerungsebene werden diese Informationen zusammen mit den durch Befehlsgeräte eingegebenen Bedienerkommandos gemäß den programmierten Programmen verarbeitet, um die Stellgrößen für Schaltgeräte und Leistungsteile zu ermitteln. Für die Informationsbearbeitung werden heute typischerweise spezialisierte elektronische Steuerungssysteme wie speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und numerische Steuerungen eingesetzt, vgl. ► Kap. 9.

Die Signalverarbeitung auf der Eingabe- und Verarbeitungsebene ist durch geringe Leistungen gekennzeichnet. Daher müssen die Stellsignale in der Ausgabeebene auf die für den Betrieb der Aktoren notwendigen Leistungen umgesetzt werden. Beispiele dafür sind Leistungsteile der Achsantriebe oder Schütze zum Ein- und Ausschalten von Hauptantrieben. Typische Komponenten der Versorgungsebene, welche die verschiedenen Betriebsspannungen für die Geräte der einzelnen Ebenen bereitstellen, sind Transformatoren und Netzgeräte.

15.2.2 Aufgaben der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen

Die Domänen der Elektrokonstruktion wurden bereits in Bild 15.8 skizziert. Sie gliedern sich im Wesentlichen in drei Bereiche:

- Energiebereitstellung,
- Realisierung von Steuerungsfunktionen,
- Schutzfunktionen für Personal und Anlage.

Diese drei Bereiche werden im Folgenden vorgestellt.

15.2.2.1 Energiebereitstellung

Die elektrische Energie ist aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte und des guten Wirkungsgrads bei der Energieübertragung die wichtigste Energieform moderner Fertigungseinrichtungen. Im Allgemeinen ist die Energieversorgung innerhalb einer Fabrikanlage vorgegeben. Die Energiebereitstellung für die einzelnen Maschinen und Prozessstationen erfolgt dabei in der Regel durch Ein- bzw. Dreiphasenwechselspannungssysteme. Die Umwandlung in Gleichspannung bzw. unterschiedliche Betriebsspannungen findet meist lokal in der Station durch entsprechende Leistungsnetzteile statt.

Neben der Auslegung der Energieversorgungsnetzwerke unterstützt die Elektrokonstruktion die mechanische Konstruktion bei der Auswahl und Auslegung von Antriebskomponenten wie Motoren oder Hydraulikpumpen und entwirft deren Ansteuerungen. Hinweise und Beispiele zur Energiebereitstellung werden in ► Kap. 15.2.5.1 vorgestellt.

15.2.2.2 Realisierung von Steuerungsfunktionen

Die Steuerung und Überwachung von mechanischen, prozesstechnischen und sicherheitskritischen Abläufen gemäß einer logischen Ablauf- bzw. Schrittkette ist die wichtigste Aufgabe der Automatisierungstechnik. Die dazu verwendete Steuerungseinheit kann mit Hilfe von mechanischen, hydraulischen, pneumatischen, elektrischen oder elektronischen Elementen sowie deren Kombination aufgebaut werden. Auf Grund der einfachen Verfügbarkeit und Handhabbarkeit der elektrischen Energie sowie der erzielbaren Schaltgeschwindigkeiten wurden schon frühzeitig elektrische Steuerungen durch Verknüpfung von elektromechanischen Schaltern aufgebaut, vgl. ► Kap. 10.2.

Durch die Entwicklungen im Bereich der Elektronik und Computertechnik wurde der Einsatz von Digitalrechnern und Mikroprozessoren für frei programmierbare Steuerungen möglich, bei denen die zu verarbeitende Logik nicht durch feste Verdrahtungen, sondern durch flexibel änderbare Programme abgebildet wird. Die hohe Leistungsfähigkeit dieser Steuerungen erlaubt im Vergleich zur Schützsteuerung aber auch zur mechanischen Steuerung bei einer vielfach gesteigerten Komplexität der zu steuernden Maschinen und Anlagen eine günstigere Realisierung. Beispielsweise werden heute mechanische Komponenten wie Getriebezüge in Verzahnungsmaschinen durch elektronische Getriebe in Form von gesteuerten Einzelservoantrieben ersetzt. Damit ist eine einfache Änderung der Übersetzungsverhältnisse möglich, wodurch die Flexibilität der Maschinen wesentlich erhöht wird.

Die Elektrokonstruktion übernimmt daher als Mittel zur Realisierung und Integration von Steuerungsfunktionen eine Schlüsselrolle bei der Maschinenkonstruktion. Einige typische Aufgaben der Elektrokonstruktion im Bereich der Steuerungstechnik sind:

- Auswahl von Sensoren und Aktoren (Antriebe usw.),
- Auslegung der informationstechnischen Infrastruktur,
- Integration der NC,
- Auslegung des Bedienfeldes,
- Auslegung des Steuer-/Schaltschrankes und
- Auslegung und Programmierung der SPS.

15.2.2.3 Schutzfunktionen für Personal und Anlage

Die Nutzung elektrischer Energie birgt für Mensch und Maschine vielfältige Gefahren, welche sich aus der hohen Leistungsdichte und dem Fehlen menschlicher Sinnesorgane für elektrische und magnetische Felder ergibt. Die Auslegung entsprechender Schutzmaßnahmen und -vorrichtungen für die Sicherheit des Menschen und den sicheren Betrieb der Maschine bildet daher eine Kernaufgabe der Elektrokonstruktion:

- In erster Linie sind Personen vor einer Berührung spannungsführender Bauteile und damit gegen gefährliche Körperströme zu schützen. Die Gefährdung durch Körperströme ist abhängig von der Höhe der Berührspannung und der Einwirkungsdauer.
- Fehlfunktionen und Ausfälle von Anlagenteilen, welche durch Ausfälle von Sensoren und Aktoren, Kabelbrüche und Kurzschlüsse oder logische Fehler in der Hard- und Software der Steuerungen ausgelöst werden können, müssen durch entsprechende Schutzmaßnahmen und sichere Notabschaltroutinen aufgefangen werden.

Die sichere Integration und Nutzung elektrischer Energie und elektrischer Betriebsmittel sind durch eine Vielzahl internationaler und nationaler Richtlinien, Vorschriften und Normen geregelt. Dabei gilt ein allgemeiner Grundsatz: *Jeder Hersteller oder Betreiber elektrischer Anlagen ist für die Einhaltung der anerkannten Regeln der Elektrotechnik selbst verantwortlich*. Dies bedeutet im Einzelnen:

- Bei der Fertigung von elektrischen Anlagen sind die geltenden nationalen und internationalen Bestimmungen zu beachten.
- Es dürfen nur den nationalen Bestimmungen des Landes, in dem die Anlage betrieben wird, entsprechend geprüfte und zugelassene elektrische Betriebsmittel verwendet werden (Elektrische Betriebsmittel sind alle Gegenstände, die als Ganzes oder in einzelnen Teilen dem Anwenden elektrischer Energie dienen).
- Die Haftungssituation der Hersteller und Vertreiber wird durch Gesetze, wie z. B. das Produkthaftungsgesetz, noch weiter verschärft. Haftungspflichtig ist dabei in erster Linie derjenige, der das fehlerhafte Produkt erzeugt oder an den Endverbraucher weitergibt.

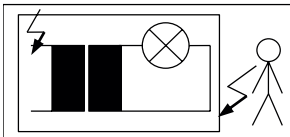
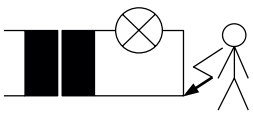
(1) Schutz gegen Indirektes Berühren	(2) Schutz gegen direktes Berühren	(3) Schutz gegen direktes und indirektes Berühren
		
▪ Schutz durch Abschaltung oder Meldung ▪ Doppelte oder verstärkte Schutzisolierung ▪ Schutztrennung ▪ Schutz durch erdfreien, örtlichen Potenzialausgleich	▪ Schutz durch Isolierung aktiver Teile ▪ Schutz durch Abdeckungen oder Umhüllungen ▪ Schutz durch Hindernisse ▪ Schutz durch Abstand	▪ Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) ▪ Schutz durch Schutzkleinspannung ▪ Funktionskleinspannung mit sicherer Trennung

Bild 15.10 Schutz gegen gefährliche Körperströme. Quelle: [DIN18a]

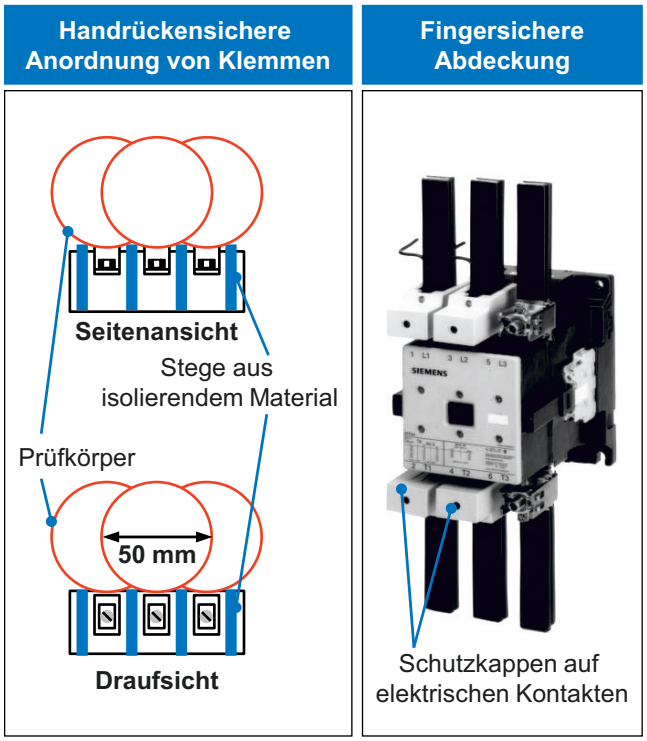
Diese Bestimmungen können von Land zu Land unterschiedlich sein, so dass zusätzliche Erschwernisse beim Export elektrisch betriebener oder gesteuerter Anlagen in verschiedene Länder auftreten können. Daher werden internationale Normen angestrebt, wie z. B. das CE-Zeichen innerhalb der Europäischen Union. Diese seit 1997 verpflichtende Kennzeichnung ist die Grundvoraussetzung für den Vertrieb von elektrischen Geräten, Maschinen und Anlagen im gesamten europäischen Binnenmarkt.

Mit dem Anbringen des CE-Kennzeichens auf einer Maschine versichert ein Hersteller, dass er allen seinen Verpflichtungen zum europäischen Warenverkehr nachgekommen ist. Diese Verpflichtungen sind technischer und organisatorischer Art. Sie sind in der „EU-Maschinenrichtlinie" festgelegt worden und in allen europäischen Ländern gleich.

Die Zielsetzung dieser Richtlinie ist die Sicherheit und Gesundheit von Personen und Tieren sowie die Sicherheit von Gütern, die sich im Gefahrenbereich der Maschine befinden können, zu gewährleisten. Zur Einhaltung dieser Richtlinie muss der Hersteller eine Akte mit einer technischen Dokumentation anlegen. Durch die Auslegung der Maschine nach bestimmten harmonisierten Europäischen Normen vereinfacht sich der Nachweis der Konformität erheblich. Die [DIN09b] ist ein Beispiel einer solchen Norm, welche die Sicherheitsanforderungen an Werkzeugmaschinen, speziell an Bearbeitungszentren, festlegt. Garantieren Normen die Konformität mit den grundlegenden gesundheitlichen und sicherheitstechnischen Anforderungen der Maschinenrichtlinie, werden sie als Gruppe C-Norm bezeichnet.

Bei der Auslegung von Schutzmaßnahmen wird zwischen „direktem" und „indirektem" Berühren unterschieden. „Direktes Berühren" bedeutet das Berühren von aktiven, also bei normaler Benutzung unter Spannung stehenden Anlagenteilen. Dies können z. B. Stromschienen oder Anschlussklemmen sein. „Indirektes Berühren" bedeutet, dass inaktive, normalerweise spannungsfreie, leitfähige Anlagenteile (z. B. Gehäuse etc.) unter Spannung geraten und von Personen berührt werden können.

Der Schutz gegen gefährliche Körperströme, verursacht durch die elektrische Ausrüstung, muss sowohl im ungestörten Betrieb (Schutz gegen direktes Berühren) als auch im Fehlerfall (Schutz gegen indirektes Berühren) gewährleistet sein. In der [DIN07b] sind die vorgesehenen prinzipiellen Schutzarten aufgeführt, ◘ Bild 15.10. Schutz- und Funktionskleinspannung bedeutet die Verwendung von Wechselspannungen kleiner 50 V und Gleichspannungen kleiner 120 V als Betriebsspannungen, welche bei Berührung keine Gefahr für den Menschen darstellen und damit als Schutz des Menschen einzustufen sind. Weitere Schutzmaßnahmen lassen sich grob in Verhinderung einer Berührung durch Isolation oder Abstände von aktiven Teilen, Ausgleich von Spannungspotenzialen an inaktiven Teilen (z. B. Erdung) und in Abschaltung der fehlerhaften Anlage gliedern.



◘ **Bild 15.11** Beispiele zum Schutz gegen gefährliche Körperströme. Quelle: WZL, SIEMENS

Neben der automatischen Abschaltung fehlerhafter Anlagenteile durch spezielle Sicherungsgeräte, die in ► Kap. 15.2.5.4 näher dargestellt werden, stellt die Schutzisolierung von Baugruppen den effektivsten und sichersten Schutz dar. Es gilt das Motto: „*Isolieren ist sicherer als erden*".

Eine Schutzisolation ist eine zusätzlich zur Basisisolation der Bauteile angebrachte Isolation. Durch eine Schutzisolation wird das Auftreten gefährlicher Berührungsspannungen an berührbaren Teilen infolge eines Fehlers in der Basisisolierung verhindert. Sie stellt eine aktive Schutzmaßnahme dar, da sie durch eine vollständige Umhüllung des Betriebsmittels durch Isolierstoff erzielt wird und damit ständig wirksam ist. Die meisten elektrischen Haushaltsgeräte sind schutzisoliert. Drei Beispiele zum Schutz gegen gefährliche Körperströme sind in ◘ Bild 15.11 gezeigt.

Im linken Bildteil ist eine handrückensichere Anordnung von Anschlussklemmen abgebildet. In der Mitte ist eine Möglichkeit zur fingersicheren Abdeckung eines Schützes dargestellt, wobei die Abdeckung der rechten Phase zur Veranschaulichung entfernt worden ist. Im rechten Teil des Bildes ist ein schutzisolierter Hauptschalter als Beispiel für einen Schutz gegen indirektes Berühren gezeigt. Der gesamte Schalter ist mit einem Gehäuse aus elektrisch nichtleitendem Kunststoffmaterial gekapselt.

Ein Schutz gegen direktes Berühren ist Bestandteil der IP-Schutzklassen (International Protection) nach [DIN19c]. Gemäß der in ◘ Bild 15.12 dargestellten Übersicht der IP-Schutzklassen und deren Code-Zahlen, unterscheidet man

Berührungs- und Fremdkörperschutz		Wasserschutz	
1. Kennziffer	Schutzumfang	2. Kennziffer	Schutzumfang
0	Kein Schutz	0	Kein Schutz
1	Schutz gegen Fremdkörper > 50 mm und Zugang mit dem Handrücken	1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
2	Schutz gegen Fremdkörper > 12,5 mm und Zugang mit dem Finger	2	Schutz gegen schräg fallendes Schutzwasser
3	Schutz gegen Fremdkörper > 2,5 mm und Zugang mit dem Werkzeug	3	Schutz gegen Sprühwasser
4	Schutz gegen Fremdkörper > 1 mm und Zugang mit einem Draht	4	Schutz gegen Spritzwasser
5	Staubgeschützt und Schutz gegen Zugang mit einem Draht	5	Schutz gegen Strahlwasser
6	Staubdicht und Schutz gegen Zugang mit einem Draht	6	Schutz bei Überflutung
		7	Schutz bei Eintauchen
		8	Schutz beim Untertauchen

Beispiel: IP54
Schutz gegen Staub
Schutz gegen Spritzwasser

Bild 15.12 IP-Schutzklassen: Berührungs-, Fremdkörper- und Wasserschutz. Quelle: [DIN14f]

zwischen Berührungs- bzw. Fremdkörperschutz (erste Ziffer), sowie Wasserschutz (zweite Ziffer). Typische Schutzklassen für Gehäuse sind beispielsweise:

- IP20: Gehäuse für allgemeine Anwendungen ohne Umweltanforderungen,
- IP22: tropfsicheres Gehäuse,
- IP54: wettersicheres, staubsicheres Gehäuse,
- IP65: wasserdichtes Gehäuse.

Außer dem primär personenbezogenen Spannungsberührschutz an elektrischen Betriebseinrichtungen müssen bei der Realisierung der Schaltungslogik von der Elektrokonstruktion ausreichende Sicherheitsvorkehrungen dafür vorgesehen werden, dass der Bediener und auch die Anlage bei Fehlbedienung und möglichen Fehlfunktionen sowie bei Versagen von Anlagenkomponenten ausreichend geschützt sind. Neben der Verwendung verschiedener Sicherungssysteme gegen Überlastung der Anlage und ihrer Komponenten, werden durch Schutzschaltungen logische Verriegelungsbedingungen aufgebaut. Diese ermöglichen z. B. bei Pressen den Ablauf eines Presshubes nur dann, wenn der Bediener nicht gefährdet wird (Sicherheitssteuerungen, ▶ Kap. 15.2.5). Daneben werden besondere Bauelementeigenschaften gefordert, z. B. zwangsgeführte Kontakte bei den verwendeten Schützen, die ein sicheres Abschalten der Anlage auch bei Kontaktverschweißungen gewährleisten. In ▶ Kap. 15.2.5.4 werden einige Sicherheitseinrichtungen für Werkzeugmaschinen beispielhaft vorgestellt.

15.2.3 Zusammenwirken zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion

15.2.3.1 Schnittstelle zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion

Die effiziente Kooperation verschiedener Disziplinen (mechanische bzw. elektrische Konstruktion, Automatisierung, Prozesstechnik, Simulation etc.) bei der technischen Produkt- und Systementwicklung stellt für Unternehmen und Entwicklungsabteilungen auch heute eine zentrale Herausforderung dar. Zurückzuführen ist dies unter anderem auf

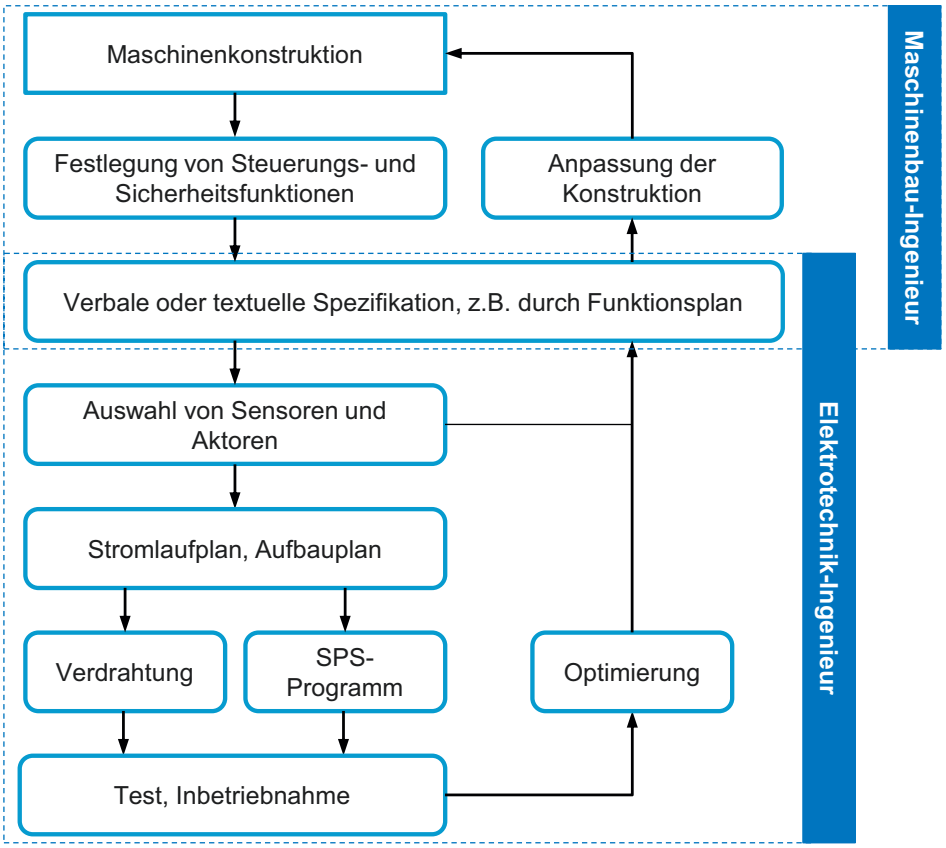


Bild 15.13 Zusammenarbeit und Informationsfluss zwischen mechanischer und elektrischer Konstruktion

die stetig steigende (interdisziplinäre) Komplexität der Anlagen- und Funktionsstrukturen sowie der arbeits- und kommunikationsaufwendigen Zusammenführung disziplinspezifischer Perspektiven auf technische Themenkomplexe.

Der in Bild 15.13 abgebildete Informationsfluss stellt einen typischen Ablauf der Kooperation der Abteilungen mechanische und elektrische Konstruktion sowie der Automatisierung bei der technischen Systementwicklung dar. Die Zusammenarbeit an einem technischen System, welches beispielsweise von der mechanischen Konstruktion entworfen und anschließend von der elektrischen Konstruktion zu automatisieren ist, basiert dabei häufig auf spezifischen und eigens angefertigten Spezifikationsdokumenten oder einer direkten verbalen Kommunikation.

Diese noch allgemein verbesserungswürdige Vorgehensweise erfordert eine enge Zusammenarbeit von mechanischer und elektrischer Konstruktion. Häufig lassen sich elektrische Bauteile, insbesondere Sensoren und Aktoren, erst nach Vorliegen und Erprobung der Maschinenprototypen endgültig festlegen. Andererseits beeinflussen die Abmessungen, Eigenschaften und Anforderungen dieser Bauelemente den mechanischen Teil der Maschinenkonstruktion. Diese Rückwirkungen führen häufig zu einem iterativen Optimierungsprozess. Sowohl bei der Grobauslegung als auch bei der Detailkonstruktion ist daher eine enge Zusammenarbeit beider Disziplinen notwendig.

Darüber hinaus stellt die Einsatzstelle spezifische Anforderungen an die elektrischen und elektronischen Komponenten hinsichtlich einer hinreichenden Wärmeabfuhr und der Zufuhrmöglichkeit für elektrische Leitungen. Daher kann eine optimale Auslegung bzw. Konstruktion einer Maschine nur dann gewährleistet werden, wenn der mechanische Konstrukteur über alle wesentlichen Funktionen und Funktionsabläufe der Maschine und somit auch über die der elektrischen Betriebsmittel Kenntnis hat.

15.2.3.2 Verständigungshilfsmittel zur Funktionsfestlegung in einer Werkzeugmaschine

Als Hilfsmittel der Kommunikation zwischen elektrischer und mechanischer Konstruktion bei der Definition von Steuerungsaufgaben wird häufig der Funktionsplan nach [DIN14d] verwendet. Der Funktionsplan ist eine rein ablauforientierte Darstellung einer Steuerungsaufgabe und damit unabhängig von der steuerungstechnischen Umsetzung (SPS, Schütze, Hydraulik, Pneumatik). Er erleichtert damit die Verständigung zwischen den Spezialisten der einzelnen Disziplinen. Der Funktionsplan bildet ein klares Verständigungsmittel an Stelle der oft frei formulierten, schriftlich festgelegten oder verbal übermittelten Systembeschreibung. Die Basiselemente eines Funktionsplanes sind:

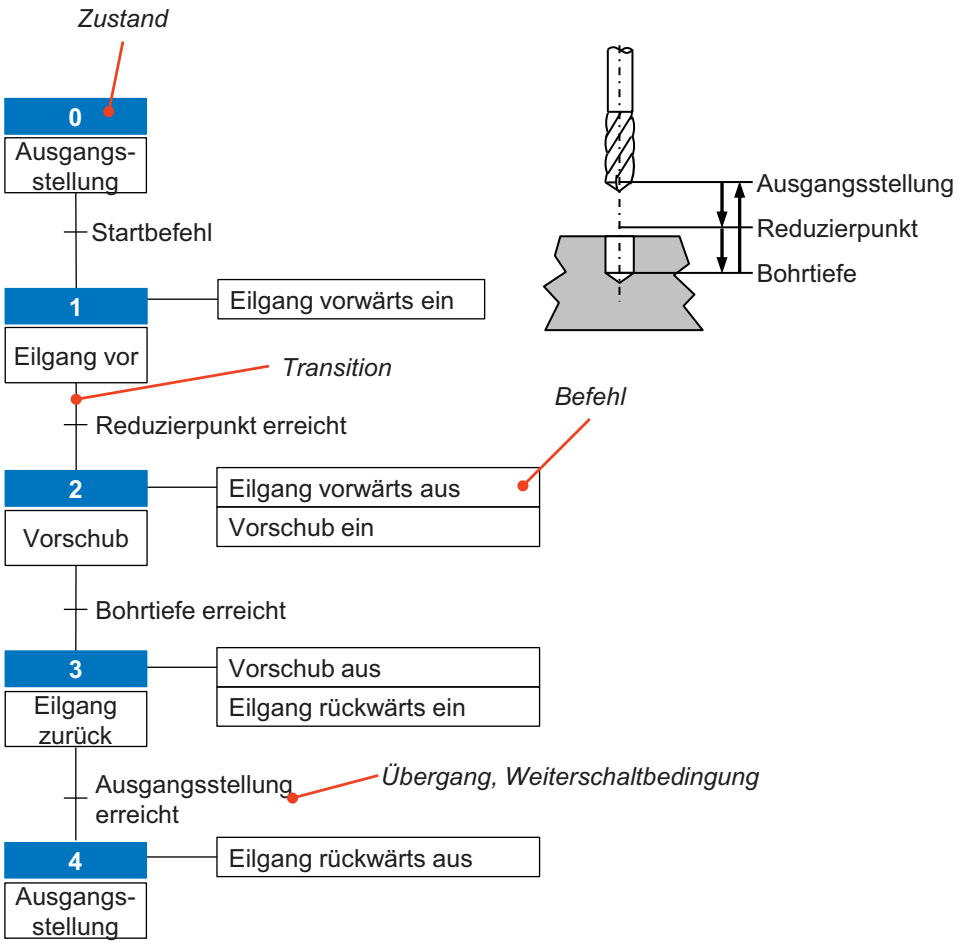


Bild 15.14 Elemente eines Funktionsplans am Beispiel einer Ablaufsteuerung für eine Bohraufgabe. Nach [DIN14g]

- Schritt/Zustand/Befehl,
- Weiterschaltbedingung/Verknüpfungslogik,
- Übergang/Transition.

Bild 15.14 zeigt die Basiselemente eines Funktionsplans am Beispiel einer einfachen Ablaufsteuerung für eine Bohraufgabe. Ein *Zustand* repräsentiert einen Beharrungszustand des Prozesses oder der Steuerung in einem bestimmten Augenblick. *Weiterschaltbedingungen* geben die Funktionsbedingungen für einen Übergang des aktuellen Zustands zum Nächsten an, was zugleich die Verknüpfungslogik des Systems festgelegt. Der Übergang von einem Zustand zum Nächsten findet dann statt, wenn der Ausgangsschritt aktiv und die Übergangsbedingung erfüllt ist. *Transitionen* verknüpfen die Zustände dabei untereinander.

Funktionspläne lassen sich mit geeigneten Programmiergeräten direkt in Steuerungsprogramme für eine SPS umwandeln, ▶ Kap. 10. Mit Hilfe von Funktionsplänen können aber nur relativ geringe Verknüpfungstiefen dargestellt werden.

Eine weitere Beschreibungsmethodik ist mit Hilfe von Petri-Netzen möglich. Sie erlauben eine Beschreibung und mathematische Analyse diskret gesteuerter Systeme mit zeitlich parallelen Prozessen. Auf Grund des hohen Abstraktionsniveaus sind sie bisher noch nicht sehr verbreitet. Daher soll hier auf Literatur verwiesen werden [LITZ13; UHLI06]. Diese Beschreibungsmethodik eignet sich besonders für komplexe und verkettete Fertigungseinrichtungen (Transferstraßen usw.). Daneben können auch die aus der Datentechnik bekannten Diagramme für Datenflüsse und Programmablaufpläne nach [DIN83a] verwendet werden.

15.2.4 Komponenten und Verfahren der Elektrokonstruktion

15.2.4.1 Normen und Vorschriften zur Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen

Einige Normen sowie Vorschriften und ihre Bedeutung beim Bau und Betrieb elektrischer Anlagen wurden bereits in den vorherigen Abschnitten aufgeführt. Weitere wichtige Normen und Vorschriften im Bereich der Elektrokonstruktion an Werkzeugmaschinen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, sind:

Sicherheit

- Gesetz über Unfallsicherheit (Arbeitsschutzgesetz) [BUND15],
- DIN EN 349, DIN EN ISO 13857 Sicherheit von Maschinen zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen [DIN18b],
- DIN EN 60529 Schutzarten durch Gehäuse [DIN14f],
- BGV-A3 Unfallverhütungsvorschrift für „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ [DGUV97],
- DIN EN ISO 10218 Industrieroboter, Sicherheitsanforderungen [DIN12],
- DIN EN 12417 Sicherheit von Werkzeugmaschinen, Bearbeitungszentren (Typ C-Norm) [DIN09b],
- DIN EN ISO 13850 Sicherheit von Maschinen, NOT-Halt – Gestaltungsleitsätze [DIN16c],
- DIN EN 1037 Sicherheit von Maschinen, Vermeidung von unerwartetem Anlauf [DIN08],
- DIN EN ISO 12100 Sicherheit von Maschinen, Risikobeurteilung und Risikominimierung [DIN13],
- DIN EN ISO 14119 Sicherheit von Maschinen, Verriegelungseinrichtungen [DIN14a],
- VDI 2854 Sicherheitstechnische Anforderungen an automatisierte Fertigungssysteme [VDI91].

Komponentenauswahl

- DIN VDE 0660 Bestimmungen für Niederspannungsschaltgeräte (Befehlsgeräte, Gehäuse, Schalter) [DIN19a],
- DIN EN 60073 / VDE 0199 Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle [DIN03b],
- DIN EN 60034 / VDE 0530 Drehende elektrische Maschinen (Motoren) [DIN19d].

Elektrische Ausrüstung

- DIN VDE 0100-100 Errichten von Niederspannungsanlagen (IEC 365) [DIN09a],
- DIN EN 60947-1 / VDE 0660-100 Niederspannungsschaltgeräte Allgemeine Festlegungen [DIN18c],
- DIN EN 50274 / VDE 0660-514 Niederspannung-Schaltgerätekombinationen [DIN02],
- DIN EN 61140 / VDE 0140-1 Schutz gegen elektrischen Schlag [DIN16a],
- DIN EN 60204-1 / VDE 0113-1 Sicherheit von Maschinen; Teil 1 Elektrische Ausrüstung von Maschinen. (diese Norm wird in Zusammenhang mit der Projektierung näher vorgestellt) [DIN19b],
- DIN EN 50178 / VDE 0160 Ausrüstung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln [DIN98].

Schaltungsunterlagen

- DIN EN ISO 7200 Technische Produktdokumentation [DIN04a],
- DIN EN 81346-2 Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung – Klassifikation von Objekten und Kennbuchstaben für Klassen [DIN17a],
- DIN EN 60617 Graphische Symbole für Schaltpläne [DIN97],
- DIN EN 61082 / VDE 0040 Dokumente der Elektrotechnik [DIN16b].

Funkentstörung

- DIN EN 50370-1 / VDE 0875-370-1 Produktfamiliennorm für Werkzeugmaschinen – Teil 1 Störaussendung [DIN016c]
- DIN EN 55014 / VDE 0875-14 Elektromagnetische Verträglichkeit [DIN17b].

Die Funkentstörung gewinnt auch im Bereich des Werkzeugmaschinenbaus zunehmend an Bedeutung, da durch hochdynamische Antriebe mit Umrichtern und durch hohe Taktfrequenzen bei Mikrorechnern in den Steuerungen hohe Störpegel erzeugt werden.

Verständigung zwischen Maschinenbau und Elektrotechnik

- VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme [VDI04a],
- VDI 2223 Methodisches Entwerfen technischer Produkte [VDI04b],
- VDI/VDE 3695 Engineering von Anlagen – Evaluieren und optimieren des Engineerings [VDI10],
- DIN EN 61082 / VDE 0040 Dokumente der Elektrotechnik [DIN15c],
- VDE Verband Deutscher Elektrotechniker,
- DIN Deutsches Institut für Normung,
- IEC International Electrotechnical Commission,
- VBG Berufsgenossenschaften.

Steuerungstechnik

- DIN IEC 60050-351 Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik [DIN14c],
- DIN EN 61131 Speicherprogrammierbare Steuerungen,
  - Teil 1 Allgemeine Informationen [DIN04b],
  - Teil 2 Betriebsmittelanforderungen und Prüfungen [DIN15],
  - Teil 3 Programmiersprachen [DIN14b]
- DIN 66025 Programmaufbau für NC-Maschinen [DIN83b],
- DIN 66217 Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen von NC-Maschinen [DIN75].

Zur Informationsverarbeitung gibt es darüber hinaus eine Vielzahl von Vorschriften und Richtlinien von der SPS-Programmierung bis zu den Datenübertragungsprotokollen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Einige Beispiele zur Anwendung dieser Normen werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

15.2.4.2 Kriterien zur Auswahl von Komponenten

Kriterien zur Auswahl von Komponenten durch die Elektrokonstruktion sind in ◘ Bild 15.15 zusammengefasst. Neben der unmittelbaren Forderung nach gesicherter Leistungsfähigkeit und akzeptablen Preisen stellen Kundenforderungen, nationale Vorschriften, Umweltbedingungen am Aufstellungsort der Anlage und das Design wichtige Kriterien dar. Die Auswahl geeigneter Komponenten ist ein vielschichtiges Gebiet, sodass hier nur einige Anregungen gegeben werden können. Weitere Hinweise finden sich in ▶ Kap. 15.2.4.4 bei der Diskussion von Beispielen.

Insbesondere die je nach Aufstellungsort gültigen, nationalen Normen und Vorschriften können die Auswahl der einsetzbaren Komponenten erheblich einschränken. Dies ist bei der Konstruktion von Maschinen für den Export unbedingt zu beachten, da die Anlagen durch nationale Behörden am Aufstellort abgenommen werden. Viele Hersteller von Elektrokomponenten bieten daher weltweit zugelassene Bauelemente an, durch deren Verwendung man solche Schwierigkeiten vermeiden kann.

Umweltbedingungen am Aufstellort, wie elektrische oder magnetische Felder, z. B. in der Nähe von Elektroöfen oder durch leistungsstarke Antriebe, Erschütterungen z. B. durch Pressen, extreme Temperatur und Feuchtigkeitseinflüsse, Belastungen durch Öl, Kühlschmiermittel der Wasser schränken die Auswahlmöglichkeiten für Elektrokomponenten ebenfalls erheblich ein. So schreibt z. B. die [DIN14d] eine Mindestschutzart IP54 (gegen Staub und Spritzwasser) für alle Bedien- und Meldegeräte vor. Bei der Konstruktion von Maschinen für Länder in den Tropen sind z. B. Vorkehrungen gegen Befall durch Insekten wie Termiten, die Kabelisolierungen beschädigen können, vorzusehen.

Die Ausführungsform und das zulässige Design der zu verwendenden Komponenten werden nicht zuletzt entscheidend vom vorgesehenen Einbauraum in der Maschine bzw. im Schaltschrank bestimmt. Viele Kunden schreiben zudem die Verwendung bestimmter Bauteile vor, weil entweder spezielle Anforderungen zu erfüllen sind oder die Ersatzteilhaltung unter rationalen Gesichtspunkten erfolgen soll.

Der Bedarf an Komponenten wird im Rahmen der in ▶ Kap. 15.2.4.5.1 beschriebenen Projektierung ermittelt. Elektrokomponenten sind in aller Regel Kaufteile, die den Katalogen der Hersteller entnommen werden können.

15.2.4.3 Schaltungsunterlagen

Das Recht, das CE-Zeichen an einer Maschine anzubringen, setzt die Unterzeichnung der dazu gehörenden Konformitätserklärung voraus. In dieser verpflichtet sich der Hersteller eine technische Dokumentation bereitzustellen, die u. a. einen Gesamtplan der Maschine und alle Stromlaufpläne enthält.

Die technische Dokumentation einer elektrischen Anlage zur Erläuterung der Funktion und der Wechselwirkungszusammenhänge von Schaltungen, SPS-Programmen oder Leitungsverbindungen erfolgt durch die Schaltungsunterlagen [DIN15c]. Sie vermitteln Angaben für das Errichten und den sicheren Betrieb elektrischer Einrichtungen. Als Schaltungsunterlagen gelten Schaltpläne, Tabellen, Diagramme und Beschreibungen [DIN15c].

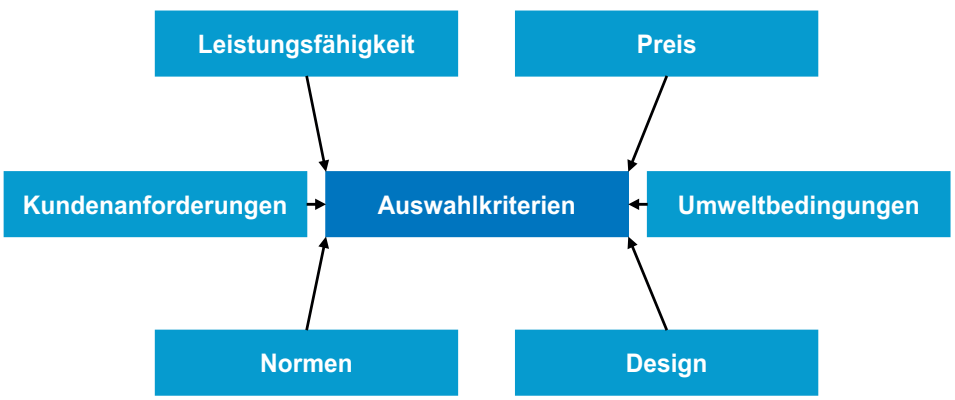
Nach [DIN14d] muss die technische Dokumentation für eine Werkzeugmaschine folgende Unterlagen enthalten:

- Installationsplan,
- Übersichtsschaltplan,
- Stromlaufplan,
- Stückliste,
- Bedienungsanleitung und Instandhaltungsanleitung.

Nicht obligatorisch, aber wenn nötig mitzuliefern sind:

- Dokumentation des Arbeitsablaufes, vorzugsweise als Funktionsplan,
- Verdrahtungs-, Verbindungs- und Klemmenplan.

Schaltungsunterlagen müssen immer korrekt, d. h. auf dem neuesten Stand und an der elektrischen Anlage verfügbar sein. Änderungen müssen unverzüglich in die Schaltungsunterlagen eingetragen und dokumentiert werden, sonst ist die Sicherheit der Anlage nicht gegeben und eine schnelle



◘ **Bild 15.15** Auswahlkriterien für Elektrokomponenten

Bild 15.16 Systematik für Schaltungsunterlagen. Nach [DIN15c]

Schaltungsunterlagen					
Dokumententyp	**Beispiele**				
Funktionsbezogene Dokumente	Übersichts-schaltplan	Block-schaltplan	Funktions-schaltplan	Ablauf-diagramm	Stromlauf-plan
Ortsbezogene Dokumente	Lageplan	Installations-zeichnung	Installations-schaltplan	Gruppen-zeichnung	Anordnungs-plan
Verbindungsbezogene Dokumente	Verdrah-tungsplan	Verbin-dungsplan	Anschluss-plan	Kabelplan	
Betriebsmittellisten	Teileliste	Ersatz-teilliste			
Montagebezogene Dokumente	Anordnungs-zeichnung	Montagebe-schreibung	Kabel-tabelle		

Weitere Dokumententypen:
Inbetriebnahmebezogene Dokumente,
Dokumente zur Betriebsführung, Instandhaltung und Zuverlässigkeit

Bild 15.17 Aufbau der Betriebsmittelkennzeichnung. Nach [DIN15c]

Betriebsmittelkennzeichnungen		
Zeichen	**Kennzeichnung**	**Objekttyp**
=	**Funktionsaspekt**	**Anlage**
+	**Ortsaspekt**	**Funktionseinheit**
-	**Produktaspekt**	**Funktion**
:	**Anschlussaspekt**	**Klemme**

Teilbezeichnungen sind zulässig, solange die vollständige Kennung aus den weiteren Unterlagen hervorgeht (z.B. Blattkennungen)

Beispiele
=TNS42+L4-S8 Näherungsschalter (S8) am Reitstock (L4) einer Drehmaschine (TNS42) = TNS42+L4-X14:335 Klemme 335 auf Klemmleiste X14 am Reitstock (L4) einer Drehmaschine (TNS42)

Fehlerbehebung sowie Ersatzteilbeschaffung nicht möglich. In diesem Zusammenhang ist auf die Eigenverantwortung des Betreibers für die Sicherheit einer elektrischen Anlage hinzuweisen. Im Folgenden wird zunächst der grundsätzliche Aufbau von Schaltungsunterlagen skizziert. Am Beispiel der Pinolenfunktion einer Drehmaschine wird dann die Realisierung einiger Planungsarten anhand von Auszügen aus Originalplänen einer Drehmaschine gezeigt.

Man unterscheidet Schaltungsunterlagen grundsätzlich nach Darstellungszweck und Darstellungsart. Die verschiedenen Darstellungsarten dienen in erster Linie der Bildung unterschiedlicher Abstraktionsstufen bei der Beschreibung auf Anlagen-, Geräte- oder Bauteilebene. Sie sollen hier nicht weiter erläutert werden. Zweck der Darstellung ist zum einen die Erläuterung der Arbeitsweise, zum anderen die Darstellung der Verbindungen bzw. Kopplung und räumlichen Lage der Komponenten als eine Montageanleitung und Wartungsgrundlage. Eine Einteilungssystematik nach [DIN15c] für Schaltungsunterlagen ist in Bild 15.16 dargestellt.

Basis aller Schaltungsunterlagen für die Hardware der Elektrokonstruktion an einer Maschine sind die Stromlaufpläne. Ein Stromlaufplan ist die ausführliche Darstellung einer Schaltung mit allen Einzelheiten und zeigt damit die Arbeitsweise einer elektrischen Einrichtung, Bild 15.22. Die grundlegende Strukturkomponente des Stromlaufplanes ist der Strompfad. Üblicherweise werden Stromlaufpläne mit einer senkrechten Orientierung gezeichnet, d. h. die komponentenverbindenden Strompfade verlaufen vertikal.

	Art des Betriebsmittels	Beispiele		Art des Betriebsmittels	Beispiele
A	Baugruppen, Teilebaugruppen	Verstärker, Laser, Magnetverstärker	N	Verstärker, Regler	
B	Umsetzer von nicht-elektr. auf elektr. Größen	Sensoren, Mikrofon, Lautsprecher, Drehfeldgeber	P	Messgeräte, Prüfeinrichtungen	
C	Kondensatoren		Q	Leistungsschalter, Trennschalter	
D	Binäre Elemente, Verzögerungs-, Speicherelemente		R	Widerstände	Potentiometer, Abschluss-widerstände
E	Verschiedenes	Beleuchtungs-einrichtungen, Heizeinrichtungen	S	Schalter, Wähler	Steuerschalter, Taster, Grenztaster
F	Schutz-einrichtungen		T	Transformatoren	Spannungs- und Stromwandler
G	Generatoren, Stromversorgung		U	Modulatoren, Umsetzer von elektr. in andere elektr. Größen	Demodulator, Frequenz-umrichter
H	Meldeeinrichtungen		V	Röhren, Halbleiter	Dioden, Transistoren
J	frei		W	Übertragungs-wege, Hohlleiter, Antennen	Schaltdrähte, Sammelschienen, Kabel
K	Relais, Schütz		X	Klemmen, Stecker	Trennstecker, Klemmenleisten
L	Induktivitäten		Y	Elektr. betätigte mech. Einrichtungen	Bremsen, Kupplungen, Druckluftventile
M	Motoren		Z	Abschlüsse, Filter, Entzerrer, Begrenzer	

Bild 15.18: Kennzeichnung elektrischer Betriebsmittel. Quelle: [DIN10]

Eine eindeutige standardisierte, referenzierende Bezeichnung der Komponenten in einem Schaltplan erfolgt durch die genormte Kennzeichnung der elektrischen Betriebsmittel nach [DIN15c], Bild 15.17. Die Definitionen der zu verwendenden Kennzeichnungen für die Bezeichnungen elektrischer Betriebsmittel, beispielsweise *K* für *Schütz, Relais*, sind in Bild 15.18 dargestellt.

15.2.4.4 Schaltungsunterlagen am Beispiel einer Drehmaschine

Der Aufbau von Schaltungsunterlagen und die Kennzeichnung von Komponenten für eine Werkzeugmaschine soll am Beispiel der Ansteuerung der Funktion „Reitstock lösen“ einer Drehmaschine erläutert werden. In Bild 15.19 ist eine Übersicht zum Informations- und Leistungsfluss für die Ausführung der Funktion „Pinole zurückfahren“ von der Sensorik Fußschalter und Näherungsschalter über die Steuerung (SPS), Leistungsumsetzung (Relais im Schaltschrank) bis zum Aktor (Hydraulikventil am Reitstock) dargestellt.

Eine Lokalisierung der betreffenden Sensorik und Aktorik an der Maschine ist durch den Übersichtsschaltplan aus Bild 15.20 möglich, welcher durch seine übersichtliche Darstellung der schnellen Orientierung z. B. dem Instandhalter und dem Maschinenbediener dient.

Verdrahtungs- und Anordnungspläne zeigen die leitenden Verbindungen zwischen elektrischen Betriebsmitteln, Bild 15.21. Sie enthalten Angaben zur räumlichen Lage elektrischer Betriebsmittel im Schaltschrank, auf der Bedientafel oder an der Maschine.

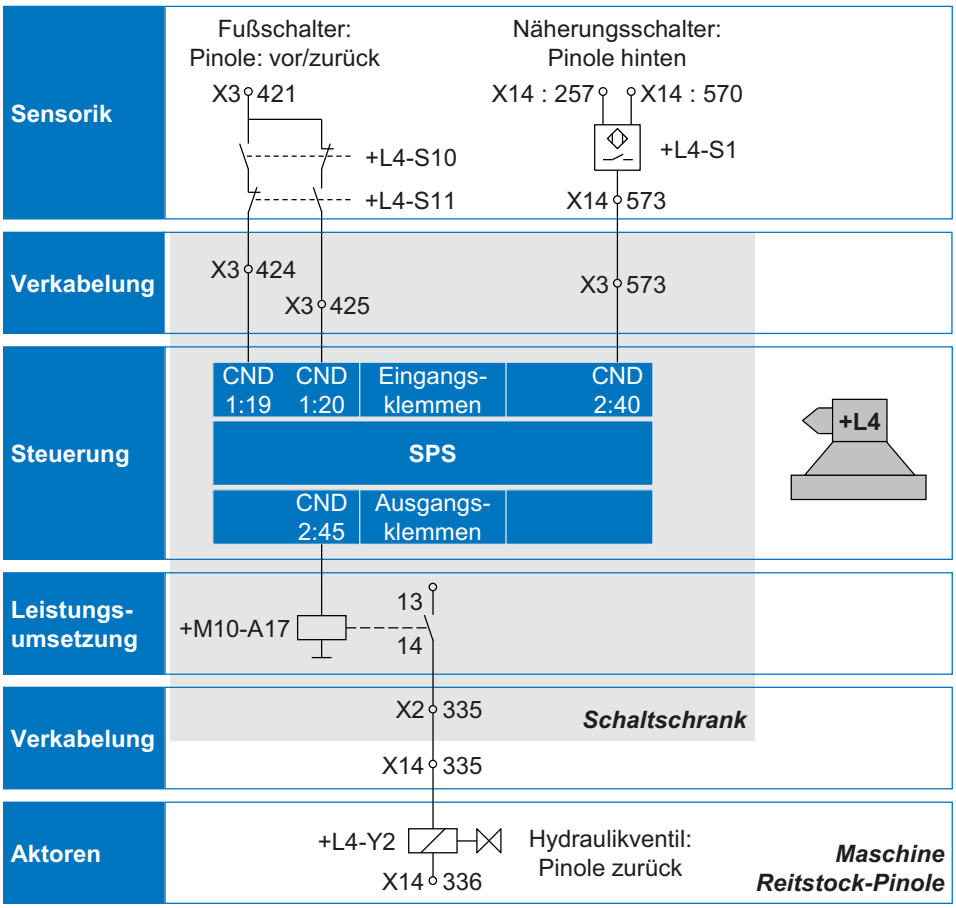


Bild 15.19 Signalfluss am Beispiel der Pinolenfunktion einer Drehmaschine

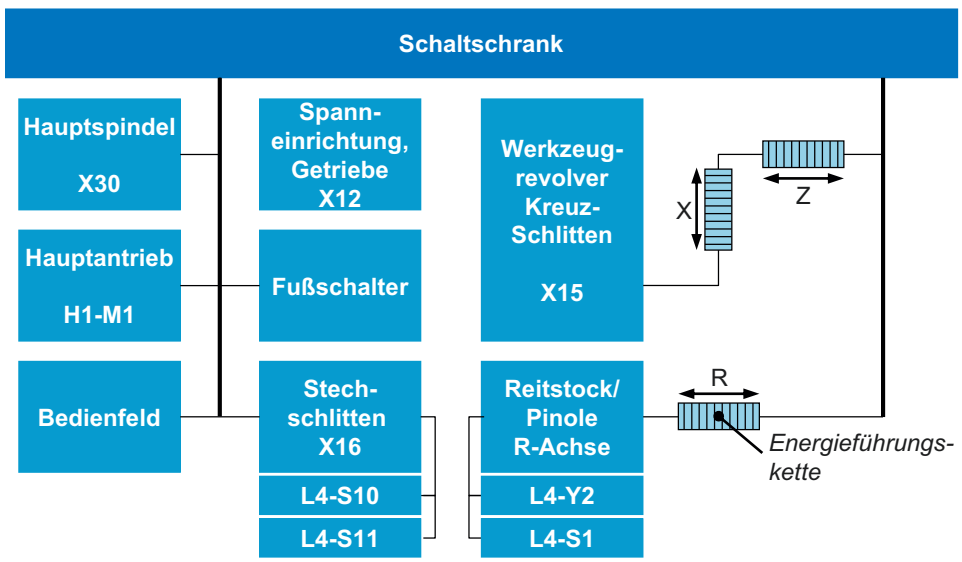


Bild 15.20 Übersichtsplan einer Drehmaschine (Ausschnitt)

Die zur Steuerung und Leistungsumsetzung notwendigen Komponenten sind im Schaltschrank untergebracht. Ihre Lage lässt sich dem Anordnungsplan des Schaltschrankes entnehmen (in Bild 15.21 als Ausschnitt dargestellt). Die für das Beispiel der Pinolenfunktion relevanten Bauteile, wie die NC mit integrierter SPS (+W1-A2) sowie das Mehrfach-Schütz (+M10-A17), sind in diesem Bild besonders gekennzeichnet.

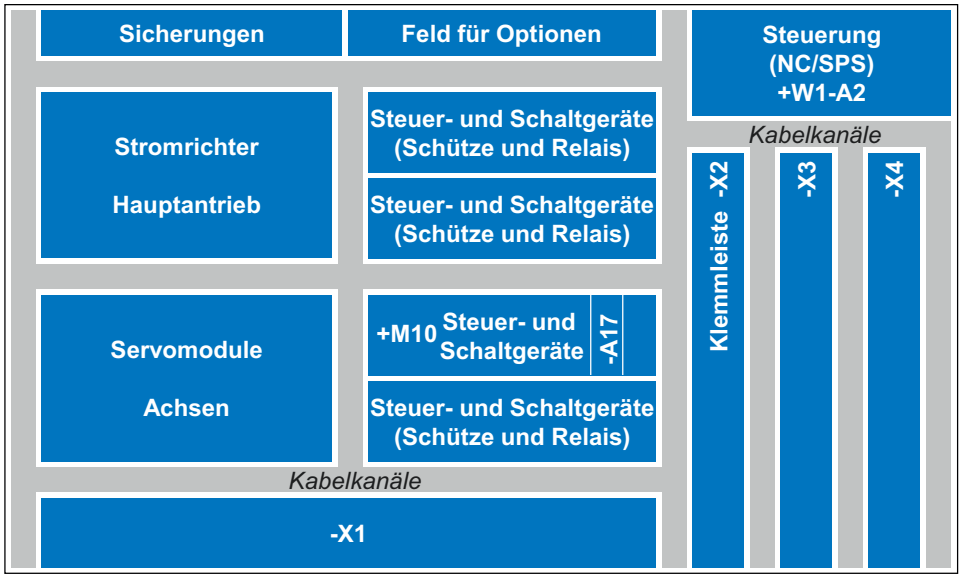


Bild 15.21 Anordnungsplan eines Schaltschranks

Bild 15.22 zeigt die Stromlaufpläne für den Anschluss der Sensorik-Fußschalter (+L4-S10, +L4-S11) und Näherungsschalter (+L4-S1) aus Bild 15.19 über die Klemmen X3 und X14 an die SPS. Die Ortsbezeichnung „+L4“ bezieht sich auf die Funktionsgruppe „Reitstock“ und „+M10“ auf die im Schaltschrank angeordnete Funktionsgruppe zur Signalumsetzung zwischen SPS und Maschinen mittels eines Relais. Bei der Bauteilbezeichnung „-S1“ wird durch „S“ ein Schalter gekennzeichnet, wobei „1“ eine fortlaufende Zählnummer ist. Deutlich wird in Bild 15.22 die Aufteilung eines Stromlaufplanes in einzelne, vertikal verlaufende Strompfade. Die einzelnen Strompfade werden durch eine Ortskennung (hier „+M10“), eine Blattnummer (hier „38“ und „39“) und eine Strompfadnummer in der obersten Reihe eines Stromlaufplanes vollständig identifiziert, z. B. +M10/39/2.

Um den Zusammenhang zwischen den zahlreichen einzelnen Stromlaufplänen herzustellen, werden die Orts-/Funktionsgruppenkennungen in der Blattkennung verwendet. So stellt beispielsweise in Bild 15.22 die Angabe „+Ml0/39/1“ am Strompfad 15 im Blatt +Ml0/38 die Verbindung dieses Strompfades mit dem Strompfad 1 auf Blatt

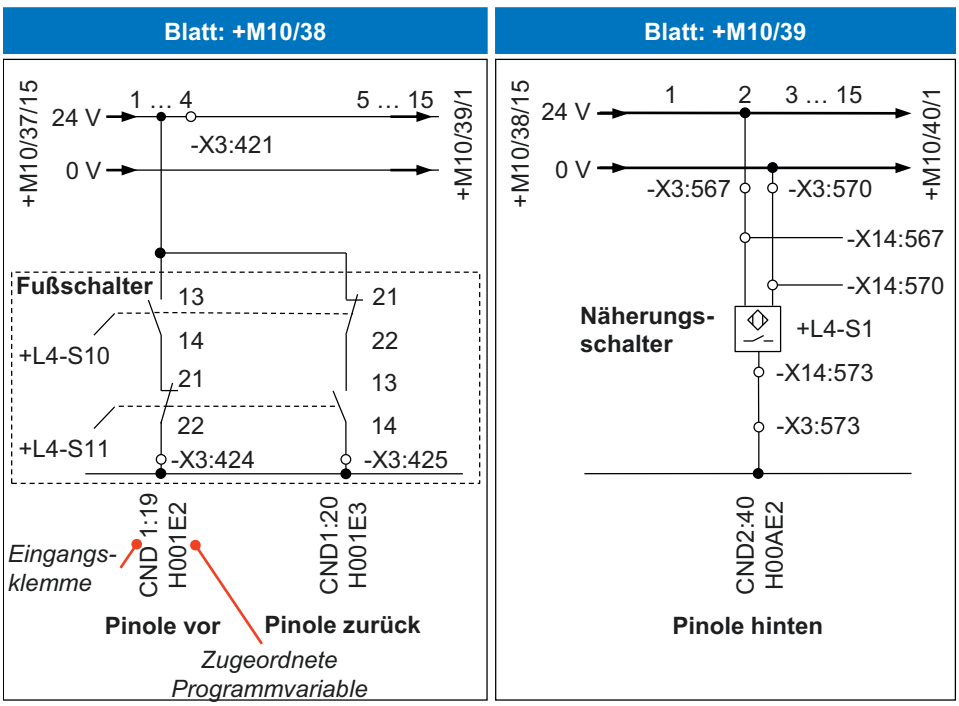


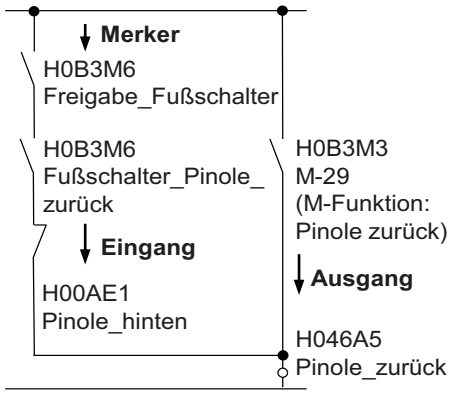
Bild 15.22 Stromlaufplan: SPS-Eingänge Pinole

Bild 15.23 SPS-Programm „Pinolenfunktion“ als Stromlaufplan und Anweisungsliste

Logik

Pinole_zurück, wenn (Freigabe_Fußschalter und Fußschalter_Pinole und Pinole_hinten nicht) oder M-Funktion M_29 gesetzt

Stromlaufplan, Kontaktplan



Anweisungsliste

Operation	Operand	Kommentar
U	H0B3M6	Lade Arbeitsregister mit Merker
U	H001E3	Und-Verknüpfung mit Schließer
UN	H00AE1	Und-Verknüpfung mit Öffner
0	H063M3	Oder-Verknüpfung mit Merker
=	H046A5	Setze Ausgang

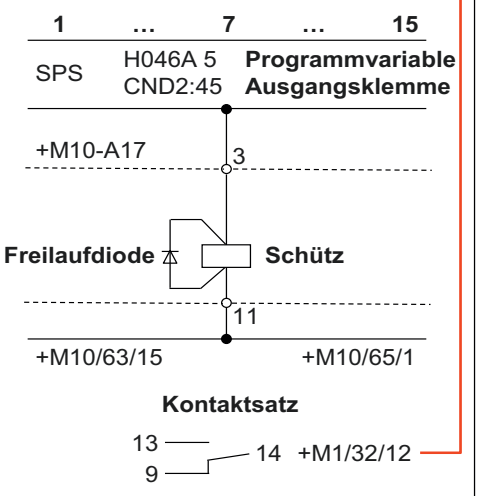
+Ml0/39 her. Die Angabe „+M10/38/15“ am Strompfad 1 auf Blatt +M10/39 stellt die zugehörige Kreuzreferenz her. Damit sind alle Bezüge zwischen den einzelnen Blättern vollständig, eindeutig und verfolgbar angegeben.

Das in Bild 15.23 in Form eines Stromlaufplanes und als Anweisungsliste dargestellte SPS-Programm zeigt die Verriegelungsbedingungen, die erfüllt sein müssen, damit die Funktion „Pinole zurückfahren“ ausgelöst wird. Die Bedingungen lauten: Die Pinole wird zurückgefahren, wenn:

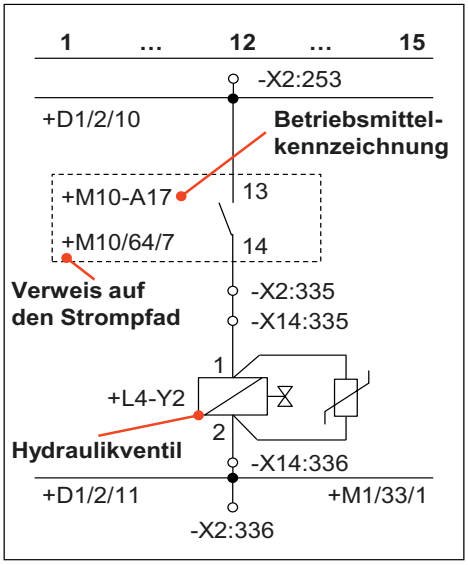
```
(    Freigabe Fußschalter gesetzt
     (Merker H0B3M6)
und  Fußschalter Pinole zurück betätigt
(    Schalter +L4-S11, Eingang H001E3)
und  Näherungsschalter Pinole hinten
     (+L4-S1, Eingang H00AE1) nicht ge-
setzt)
)
oder M-Funktion M29 durch NC gesetzt
     (Merker H063M3).
```

Bild 15.24 Stromlaufpläne: SPS-Ausgang Pinole-zurück, Ansteuerung des Stellgliedes

Blatt: +M10/64



Blatt: +M1/32



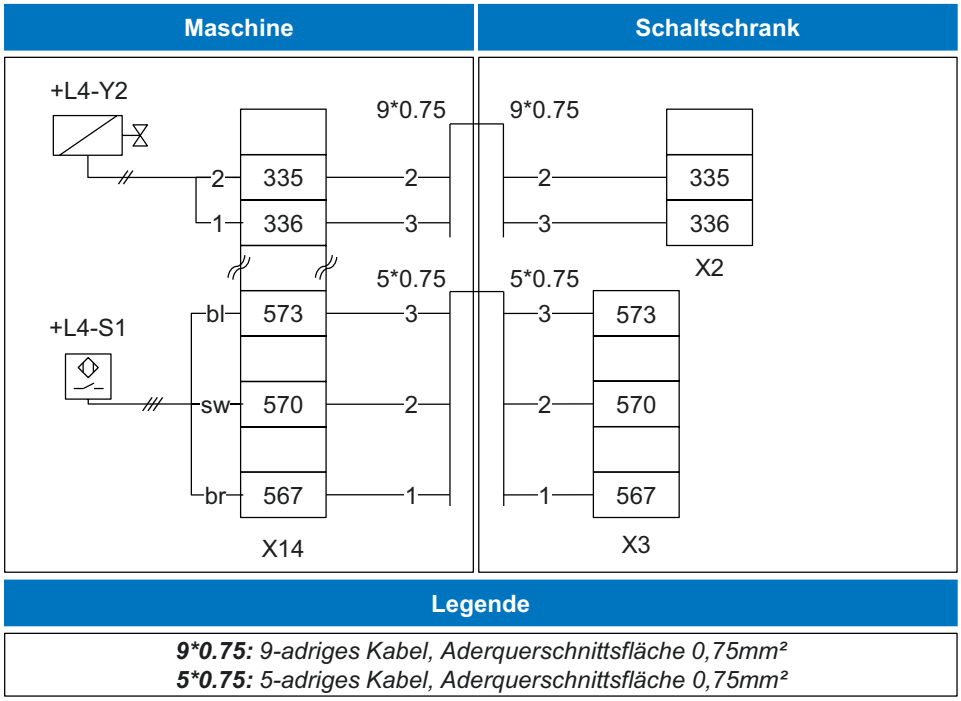


Bild 15.25 Klemmenplan für die Klemmleisten X2, X3 und X14 (Reitstock/Pinole Schaltschrank)

Die angegebenen Operandenbezeichnungen (beispielsweise H0B3M6) sind steuerungsspezifisch. Wie Bild 15.23 zeigt, kann bei der hier vorgestellten Form diesen Bezeichnungen die Art der Operanden Eingang, Ausgang, Merker) entnommen werden. Die Projektierung und Programmierung von elektronischen Steuerungen wird in ▶ Kap. 10 ausführlich behandelt.

Die Ausgabe der Schaltinformation von der SPS über die Relaisbaugruppe +M10-A17 über die Klemmen X2 und X14 an das Hydraulikventil +L4-Y2 ist rechts in Bild 15.24 dargestellt. Weiterhin ist eine vollständige Strompfadkennung für den Schützkontakt 13/14 zur Ansteuerung des Hydraulikventils +L4-Y2 dargestellt. Die Kennung „+M1/32/12“ im linken Teilbild stellt die Verbindung zum Blatt „+M1/32“, Strompfad 12 her, in dem der Kontakt verwendet wird. Die Ortskennung „+M1“ kennzeichnet die Funktionsgruppe „Ansteuerung der Stellglieder, Verriegelungen“. An diesem Strompfad findet sich eine Kreuzreferenz „+M10/64/7“ auf die zugehörige Antriebsspule im Blatt +M10/64, Strompfad 7.

Auf der Basis der Stromlaufpläne werden die weiteren Unterlagen, wie Klemmenpläne, Anordnungspläne und Stücklisten erstellt. Bild 15.25 zeigt einen Klemmenplan, der die elektrischen Verbindungen, im Gegensatz zur bis ins Einzelne aufgelösten Darstellung in den Stromlaufplänen, übersichtlich zusammenfasst. Er ist damit als Montageanleitung verwendbar.

15.2.4.5 Verfahren der Elektrokonstruktion

Projektierung, Erstellung von Schaltungsunterlagen

Die Elektrokonstruktion ist in der Realisierungsphase unter ande für die Auswahl und Kombination einzelner Geräte verantwortlich. Diese Projektierungsaufgabe umfasst:

- Ermittlung des Gerätebedarfes,
- Auswahl der Komponenten und Auslegung der Ansteuerung,
- Erstellung der Schaltungsunterlagen (Stromlauf-, Verdrahtungspläne usw.),
- Aufstellung der Stücklisten,
- Schaltschrank- und Bedienfeldauslegung,
- Programmierung der Automatisierungsgeräte (SPS).

Damit unterscheidet sich die Projektierung einer elektrischen Anlage wesentlich von der mechanischen Konstruktion einer Maschine, bei der unter anderem die Gestaltung von einzelnen Bauteilen geleistet werden muss. Wie bereits in ▶ Kap. 15.2.3 dargestellt, kann gerade bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen die Projektierung der elektrischen Anlage nur in enger Zusammenarbeit mit der mechanischen Maschinenkonstruktion geschehen. Dies gilt insbesondere zu Beginn einer Maschinenentwicklung, da hier noch nicht alle Anforderungen genau bekannt sind.

Selbstverständlich muss der Projektierer alle nationalen und internationalen Vorschriften beachten. In [DIN14d] sind wichtige Vorgaben für eine sichere elektrische Auslegung von Werkzeugmaschinen zusammengefasst. Die wesentlichen Inhalte dieser Vorschrift werden hier nur stichwortartig zusammengestellt, da die einzelnen Punkte im ▶ Kap. 15.2.5 ausführlich erläutert werden:

- Netzanschluss und Einrichtungen zum Trennen und Ausschalten,
- Schutz gegen elektrischen Schlag (beispielsweise direktes und indirektes Berühren),

- Schutz der Ausrüstung (beispielsweise Überstromschutz, Überlastschutz von Motoren),
- Potentialausgleich (beispielsweise Schutzleitersystem, elektrische Störung),
- Steuerstromkreis und Steuerfunktionen,
- Bedienerschnittstelle (beispielsweise Taster, Schalter, Not-Aus-Einrichtung),
- Steuerungsschnittstelle,
- Elektronische Ausrüstung,
- Schaltgeräte: Anordnung, Aufbau und Gehäuse,
- Leiter, Kabel und Leitungen,
- Verdrahtungstechnik,
- Elektromotoren und zugehörige Ausrüstung (beispielsweise Gehäuse, Abmessungen),
- Warnschilder und Betriebsmittelkennzeichnung,
- Technische Dokumentation, ▶ Kap. 15.2.4.3,
- Prüfungen (beispielsweise Schutzleitersystem, Isolationswiderstand, Restspannung).

CAD-Systeme für die Elektrokonstruktion

Da die Projektierung einer elektrischen Anlage in erster Linie in der Auswahl und der Zusammenstellung fertiger Komponenten besteht, kann der Projektierungsvorgang effektiv durch CAx-Systeme unterstützt werden. Tatsächlich war die Elektrokonstruktion eines der ersten Gebiete, in dem CAx-Systeme wirtschaftlich eingesetzt werden konnten. Im Gegensatz zu den stark geometrieorientierten Mechanik-CAD-Systemen, die 3D-Funktionen, Hidden-Line-Algorithmen usw. benötigen, sind Elektro-CAD-Systeme (CAE) verbindungsorientiert. Sie verwenden 2D-Funktionen, müssen aber Potenzialnetze und Gerätezusammenhänge verwalten können. CAD-Systeme für die Elektrokonstruktion unterstützen in aller Regel folgende Funktionen:

- Erstellen, Verwalten und Ändern aller notwendigen Unterlagen (Stromlaufplan, Verdrahtungsplan, Stücklisten usw.),
- Bearbeiten von Normschaltungen aus einer Bibliothek, schnelle graphische Darstellung durch Setzen von Gerätesymbolen aus Zeichnungsbibliotheken,
- CAD-Geometriebefehle zum Erstellen von Anordnungsplänen (z. B. für Schaltschränke),
- On-Line-Logik-Prüfung (z. B. Kurzschlussprüfung, Doppelvergabe von Bezeichnungen, offene Leitungsenden), automatische SPS-Zuordnungslisten,
- Datenaustausch zu anderen CAE-Systemen,
- Kopplung zur Materialverwaltung und zu PPS-Systemen,
- Mehrbenutzerfähigkeit.

Bild 15.26 zeigt die Hilfsmittel eines ECAD-Systems zur Erstellung von Stromlaufplänen. Module sind anwenderspezifische Sammlungen von Symbolen und Funktionsgruppen. Durch eine rechnerunterstützte Zeichnungserstellung/-verwaltung und Vergabe von Bauteilbezeichnungen werden viele Fehlerquellen ausgeschaltet. Ein ECAD-System kann Kurzschlüsse und Doppelbelegungen, zu viele Kontakte und Geräteanschlüsse an einem falschen Potenzial erkennen und anmahnen. Die Möglichkeit zur Verwendung und Modifikation bestehender Schaltungen oder Schaltungsbibliotheken

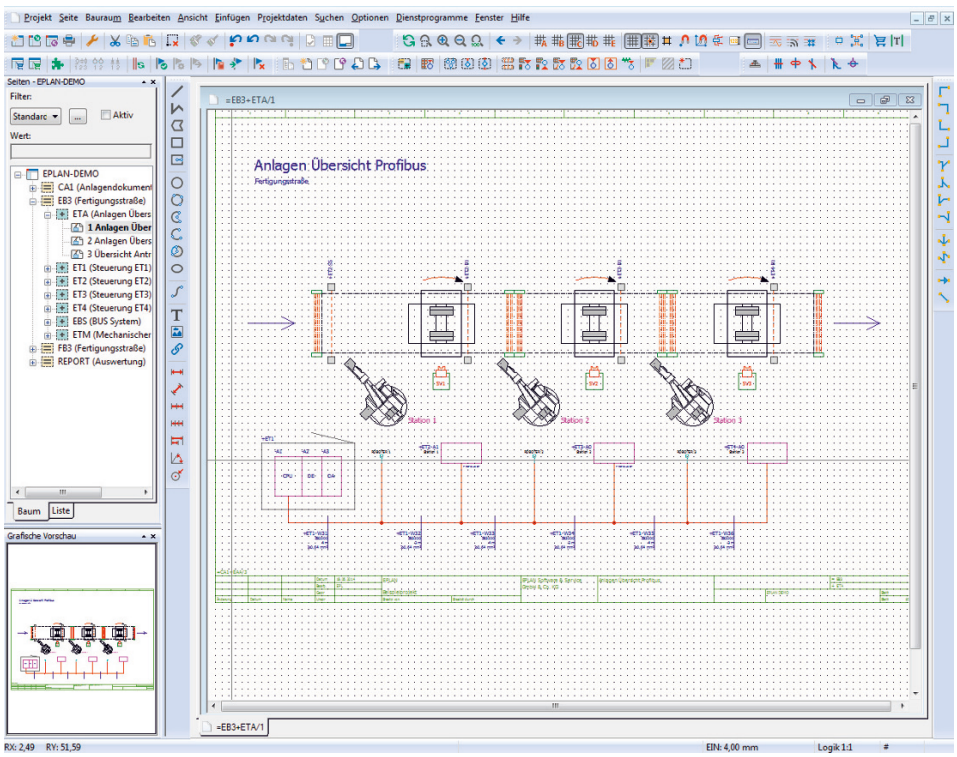


Bild 15.26 ECAD-Einsatz zur Erstellung von Stromlaufplänen

unterstützt die Rationalisierung bei der Projektierung und die kontinuierliche Aktualisierung von Schaltungsunterlagen. Die Umstellung der Schaltungsunterlagen auf andere Schaltzeichennormen, z. B. für den Export in die USA, ist einfach und fehlerfrei möglich. Wichtige Installationshilfen, wie Klemmenpläne oder Verdrahtungslisten, können automatisch generiert werden.

Durch eine Kopplung mit dem Materialverwaltungswesen lassen sich Angebotskalkulationen und Bestellvorgänge vereinfachen. Einige typische Elektro-CAD-Systeme sind, ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

- EPLAN *Friedhelm Loh Group*,
- ELCAD *AUCOTEC*,
- CADdy++ *IGE-XAO GmbH*,
- ELTIME *HOS GmbH*,
- TREE-CAD *TreeSoft GmbH & Co. KG*.

15.2.5 Funktionsgerechte Integration von elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen

15.2.5.1 Energieversorgung

Voraussetzung für den Betrieb einer Industriemaschine ist der Anschluss an das elektrische Netz der Fabrik. Bisher ist es allgemein üblich, die zugehörigen Leitungen fest in Kabelkanälen im Boden zu verlegen, wobei jede Maschine ein eigenes Kabel erhält. Diese Kanäle müssen häufig bei jedem Umstellen der Maschinen neu in den Boden der Fabrikhallen geschlagen werden. Beim Anschluss der Kabel liegt oft ein Teil der Produktion still.

Neuere, modularere Konzepte verringern mögliche Stillstandszeiten von Teilen der Produktion. Durch Verlegen eines sogenannten Schienenverteilers an der Decke erhält man eine Art Bus-System für die Hauptstromleitung, an das man die einzelnen Verbraucher anschließen kann. Das geschieht durch Ankopplung an einen der Abgangskästen, die praktisch überall mit dem Schienenverteiler verbunden werden können. Hierbei kann das Anschalten an das System unter Spannung erfolgen, sodass die Produktion nicht unterbrochen werden muss. Weiterhin lassen sich für kleinere Maschinen noch Unterverteiler an den Hauptverteiler anschließen bis hin zu Leisten mit Steckdosen für Kleinverbraucher. Die Spannung in den Verteilern beträgt meist 380 V. Neuere Bestrebungen zielen darauf ab, die Spannung in den Fabriknetzen auf 660 V zu erhöhen, um Leistungsverluste bei der Übertragung zu verringern.

In den Maschinen wird üblicherweise eine Reihe verschiedener Spannungen benötigt. Diese werden durch Transformation aus der Spannung des Fabriknetzes erzeugt. Die Umrichter befinden sich im Schaltschrank der jeweiligen Maschine.

Die Schnittstelle zwischen Fabriknetz und Maschine ist der nach [DIN14d] vorgeschriebene Maschinenhauptschalter. Alle Hauptschalter dürfen nur die Stellungen 0 und 1 haben, müssen von Hand schaltbar und gut zugänglich sein. Sie müssen bei Betätigung zwangsweise öffnen. Die Hauptschalter müssen abschließbar sein, um bei Wartungsarbeiten einen Schutz des Wartungspersonals vor unbefugtem Einschalten der Anlage durch andere Personen zu garantieren.

15.2.5.2 Elektrische Komponenten in Werkzeugmaschinen

Zu den elektrischen Komponenten in Werkzeugmaschinen zählen Signalglieder, Antriebe und Stellglieder, Verkabelung und Messsysteme. Signalglieder sind Komponenten im Hilfsstromkreis, die den Maschinenzustand entweder an die Steuerung oder den Bediener weitergeben (Meldegeräte) oder aber von Hand betätigt Funktionen der Maschinen auslösen (Befehlsgeräte). Durch die Signalglieder können Schütze oder Relais im Hauptstromkreis geschaltet werden. Eines der wichtigsten Meldegeräte ist der Grenztaster. Der mechanische Grenztaster wird durch bewegte Maschinenteile betätigt, indem ein Nocken ein bewegliches Schaltstück verschiebt und dabei den Schalter betätigt, ◘ Bild 15.27, wobei aus Sicherheitsgründen zwangsweise der Kontakt geöffnet werden muss.

Die Einsatzmöglichkeiten des Grenztasters sind sehr vielfältig. Er wird als End- oder Referenzschalter an bewegten Achsen eingesetzt, zur Positionsbestimmung von Paletten, Werkzeugmagazinen oder Werkstücken in Transferstraßen und zur Erfüllung von Sicherheitsanforderungen, z. B. an Türen von Maschinen oder Schutzzäunen. Beim Einbau von Grenztastern sind einige Punkte zu beachten. So sollen Grenztaster leicht zugänglich sein, sodass ihre Funktionsfähigkeit ohne Entfernung anderer Bauteile geprüft werden kann.

Die Anordnung muss so erfolgen, dass der Taster keinen zu großen Erschütterungen ausgesetzt ist. Der Taster ist außerdem gegen unbeabsichtigtes Betätigen, Späne und Kühlschmiermittel zu schützen. Eine Betätigung darf nur in der erlaubten Ebene erfolgen. Die Betätigungszeit des Grenztasters muss mit zweifacher Sicherheit ausreichen, eine Selbsthaltung des Relais zu erzielen.

Induktive Grenztaster (Näherungsschalter) werden dort eingesetzt, wo keine Betätigungskräfte zur Verfügung stehen, ein mechanischer Kontakt vermieden werden soll oder eine extrem hohe Schalthäufigkeit verlangt wird. Der induktive Näherungsschalter erzeugt mit Hilfe eines Schwingkreises ein hochfrequentes magnetisches Wechselfeld, ◘ Bild 15.28 und ◘ Bild 15.29. Nähert sich dem Ansprechbereich ein elektrisch leitfähiges Objekt, so wird durch die induzierten Wirbelströme das magnetische Wechselfeld gedämpft. Die dadurch kleiner werdende Schwingamplitude führt bei Erreichen eines unteren Schwellwertes zum Schaltvorgang [FEST16].

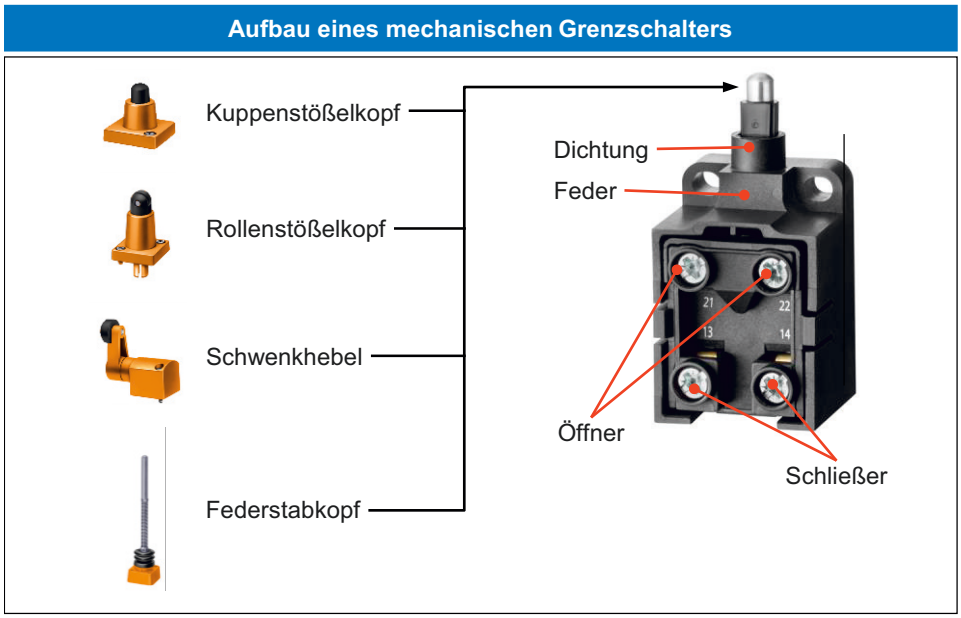


Bild 15.27 Ausführungen mechanischer Grenztaster. Quelle: SIEMENS

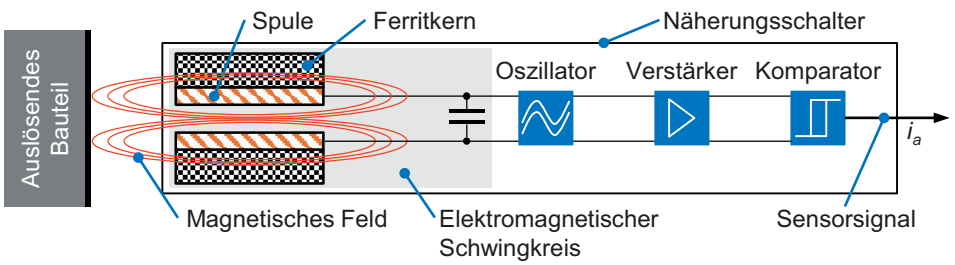


Bild 15.28 Funktionsprinzip eines induktiven Näherungsschalters

Neben den induktiven Näherungsschaltern gibt es auch kapazitive, optische und Ultraschall-Näherungsschalter. Der kapazitive Näherungsschalter kann sowohl elektrisch leitende, als auch nichtleitende Materialien, die sich in festem, pulverförmigem oder flüssigem Zustand befinden, berührungslos erfassen. Er kann z. B. zur Füllstandsüberwachung eingesetzt werden. Der optische Näherungsschalter kann zur Erfassung von Objekten kleinster Abmessung eingesetzt werden, auch wenn hohe Anforderungen an Betätigungsgeschwindigkeit, Schalthäufigkeit, Genauigkeit, Lebensdauer und erschwerte Einbaulage vorliegen. Ultraschall-Näherungsschalter sind wartungsfrei und allgemein unempfindlich gegen Umwelteinflüsse. Sie können z. B. zur Erfassung von Personen an Türen und Toren oder zur Füllstandsüberwachung dienen.

Druckwächter dienen dazu, den Systemdruck z. B. für hydraulische Spanner zu überprüfen um beispielsweise den Druck zu regeln. Dabei wirkt der Systemdruck über eine Membran auf eine vorgespannte Feder. Entspricht die Membrankraft nicht mehr der Federkraft, bewegt sich der Stößel, bis wieder Gleichgewicht herrscht. Nach Überwindung des einstellbaren Leerhubs wird schlagartig der Kontaktmechanismus betätigt. Mit der Vorspannung der Feder legt man

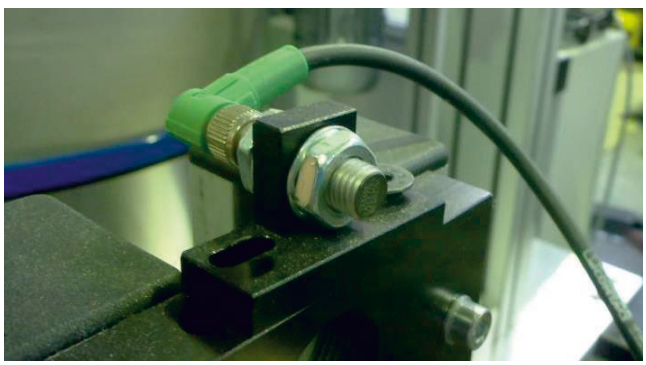


Bild 15.29 Beispiel eines induktiven Näherungsschalters

den Ausschaltdruck fest, während der Leerhub den Einschaltdruck bestimmt.

Zur Energieversorgung der Komponenten und zur Signalübertragung müssen Kabel in und an der Maschine verlegt werden, Bild 15.30. Die Kabel werden üblicherweise von einem Schaltschrank über einen zentralen Kabelbaum zu Verteilerklemmen in der Maschine geführt. Von dort werden kleinere Kabelgruppen zu Zwischenverteilern verlegt und schließlich einzelne Kabel bis zu den Endkomponenten.

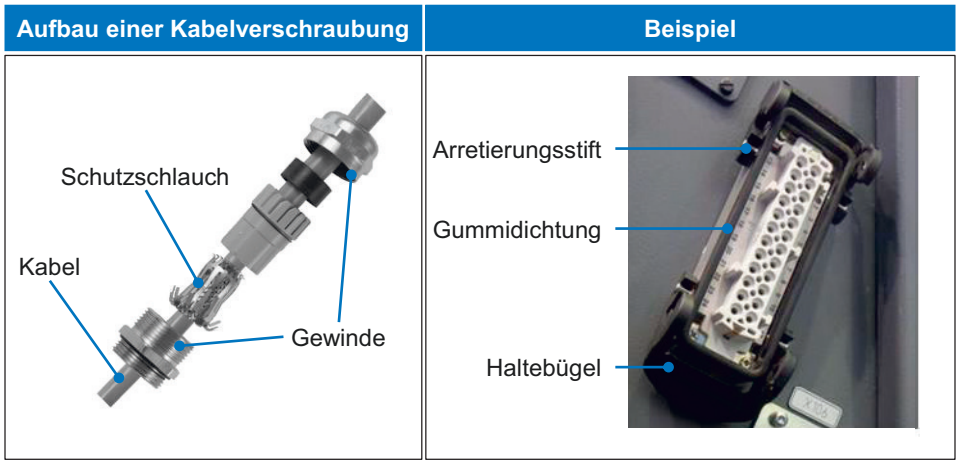


Bild 15.30 Kabelzuführung an Schaltschränken und Maschinen (Stecker). Quelle: Schlemmer

Die Verlegung der Kabelgruppen soll in Kabelschächten oder Rohren erfolgen, da damit ein guter Schutz vor Umwelteinflüssen und mechanischen Beschädigungen gewährleistet ist. Einzeln verlegte Kabel werden mit speziellen Befestigungselementen angebracht. Wichtig ist, dass die Kabel keinen mechanischen Zugbeanspruchungen ausgesetzt werden, da sie sonst reißen können. Beim Verlegen muss darauf geachtet werden, dass die Kabel nicht geknickt werden. Die Querschnitte der Leitungen werden nach der Leistung bestimmt, die zu übertragen ist. Signalkabel müssen abgeschirmt sein, um Störungen der Signale zu vermeiden.

Im Werkzeugmaschinenbau werden häufig viele Einzelantriebe eingesetzt. Dies hat zur Folge, dass viele dieser Motoren auf beweglichen Maschinenteilen angebracht sind, wie z. B. Vorschubschlitten. Oft werden dazu sogenannte Energieketten eingesetzt, Bild 15.31. Ein Ende der Kette ist fest am Maschinenrahmen angebracht, während das andere Ende am bewegten Maschinenteil befestigt ist. Die Kette ist aus beweglichen Gliedern oder einem flexiblen Schlauch aufgebaut. Der untere Teil der Kette liegt auf einer ebenen Fläche auf. Der Rest kann frei hängen. Bewegt sich nun das Maschinenteil, wird die Kette mitgezogen. Dabei wird immer ein konstanter Krümmungsradius KR eingehalten, Bild 15.31. Bei sehr großen Kettenlängen muss darauf geachtet werden, dass die Kette nicht durchhängt. Sie muss durch Stützrollen daran gehindert werden, sich am unteren Kettenteil zu verhaken, falls sie nicht entsprechend gleitfähig ausgeführt ist. Das Kettenmaterial ist Stahl oder auch Kunststoff. Die Kabel werden in die Kette eingelegt. Dazu können bei den meisten Kettentypen Bügel aufgeklappt werden, Bild 15.32.

An die Kabel und deren Anordnung in den Ketten werden bestimmte Anforderungen gestellt. Die Kabel müssen hochflexibel ausgeführt sein. Der zulässige Biegeradius muss kleiner sein, als derjenige der Kette und die Leitungen müssen doppelt isoliert sein.

Es empfiehlt sich, kleine Kabeldurchmesser zu wählen mit feinadrigem Kupfer, denn dicke Kabel werden am Außenrand durch die wiederholten Biegungen hoch beansprucht. Die Geschwindigkeit und Frequenz der Bewegung des Maschinenteiles ist zu beachten. Werden mehrere Kabel in die Kette eingelegt, können Trennstege eine Reibung untereinander vermeiden. Wichtig ist, dass die Kabel sich in der Energiekette frei bewegen können, da sie sonst beim Biegen eine mechanische Zugbeanspruchung erfahren und reißen können [TSUB13].

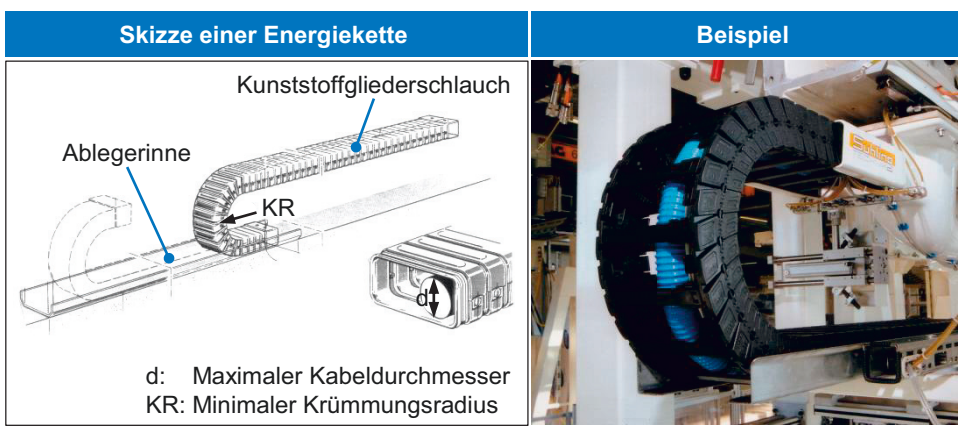


Bild 15.31 Energiekette zum Führen von Kabeln. Quelle: igus

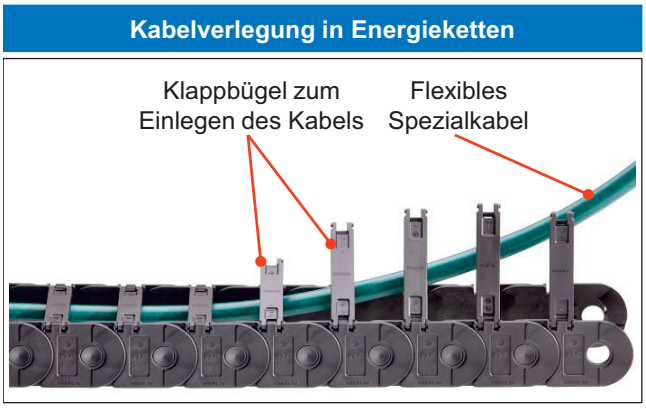


Bild 15.32 Bügelmechanismus zur Kabelverlegung in Energieketten. Quelle: igus

Es werden neben den Energieketten auch Kabel angeboten, die keine Führung benötigen. Den Querschnitt eines solchen Kabels zeigt Bild 15.33. Die Ummantelung besteht aus Polyurethan (PUR), das nicht versprödet. Die Leiter im Inneren bestehen aus feindrahtigem Kupfer mit höherer Zugfestigkeit.

Die einzelnen Adern sind durch Folienzwischenlagen gegeneinander beweglich. Die eigentliche Stützwirkung wird durch den Außenmantel erzielt. Da die Kabel an bewegten Maschinenteilen einer sehr hohen mechanischen Biegebelastung ausgesetzt sind, sind Materialien erforderlich, die einen Kabelbruch verhindern. Die Dichtigkeit und die Resistenz gegenüber Kühlmitteln und deren chemischen Bestandteilen, sowie die Widerstandsfähigkeit gegenüber Spänen müssen gewährleistet sein. Innerhalb von Schaltschränken und Maschinen werden zur Verteilung der Kabel Reihenklemmen verwendet, Bild 15.34. Sie sind fingersicher ausgeführt. Zum Anschluss der Kabel von außen an Schaltschrank, Maschine und an die Maschinenteile werden Stecker oder verschraubte Schläuche verwendet, die an die rauen Bedingungen einer Fabrikhalle angepasst sind, Bild 15.30. Sie sind totalisoliert, wasserdicht und so befestigt, dass die Stecker durch mechanische Kräfte nicht aus der Steckdose abgezogen werden können. Hierzu ist vorher ein Gewindeverschluss oder ein Haltebügel zu lösen.

15.2.5.3 Bedienerschnittstelle

Um Maschinen durch den Bediener steuern zu können, müssen Möglichkeiten geschaffen werden, von außen Befehle zu geben bzw. Meldungen der Maschine zu erkennen. Dazu dienen die Befehls- und Meldegeräte, die vom einfachen Schalter bis zum Bildschirm mit Computertastatur und ergonomisch ausgelegten Bedienfeldern anzutreffen sind. In zunehmendem Maße spielt das Design einer Maschine und hierbei vor allem das des Bedienfeldes eine Rolle für die

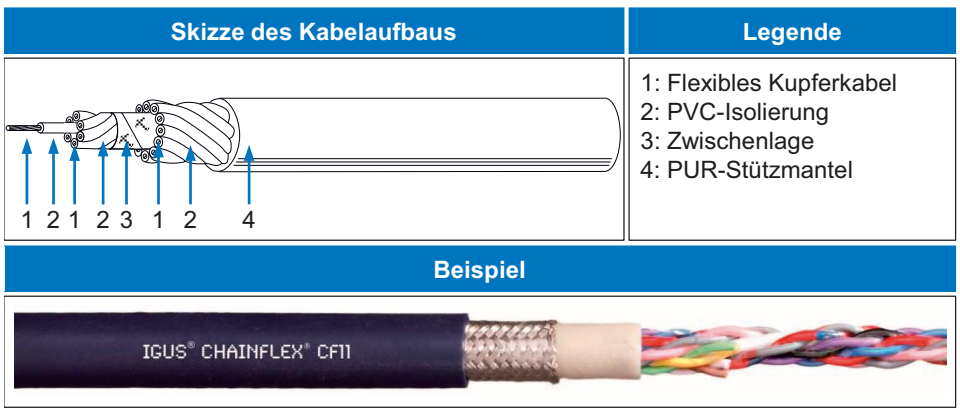


Bild 15.33 Aufbau eines Kabels für Energieketten. Quelle: igus

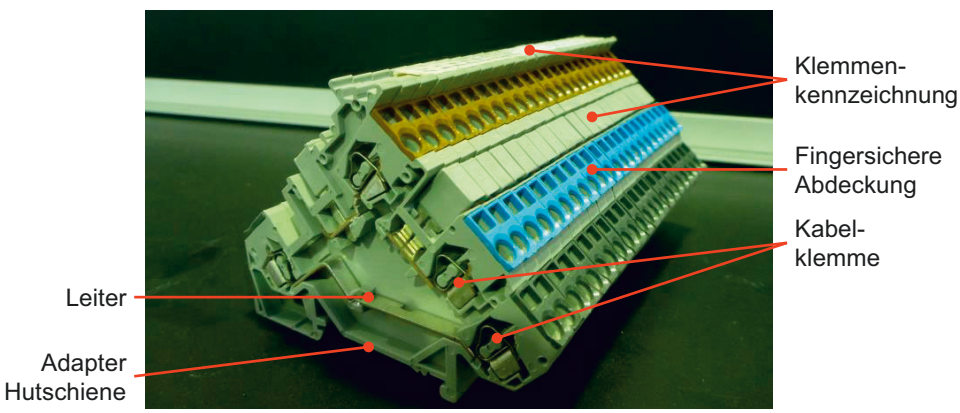


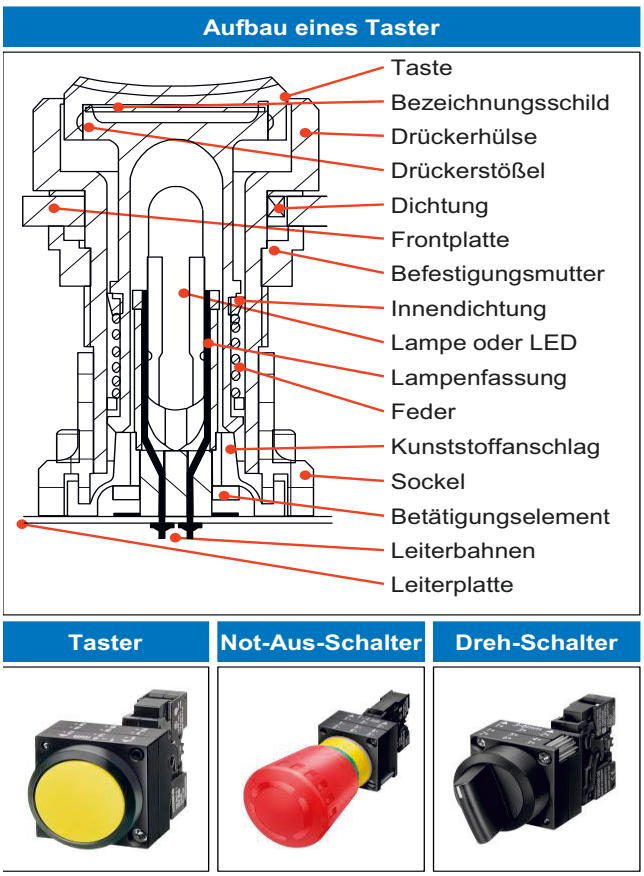
Bild 15.34 Aufbau einer Reihenklemme

Kaufentscheidung, vgl. ▶ Kap. 11. Bei Gestaltung des Bedienfeldes, insbesondere in der Farbgebung, ist die entsprechende Normung zu beachten, ◘ Bild 15.35. Rot muss für NOT-AUS-Bedienteile verwendet werden. Vorzugsweise sollten Bedienteile, die als einfaches „Halt“ oder „Aus“ wirken, schwarz sein.

Farbe	Bedeutung	Erläuterung	Anwendungsbeispiele
Rot	Notfall	Handlung im Falle von Gefahr oder Notlage	- NOT-AUS - HALT oder AUS mit NOT-AUS-Taster - Einleiten einer Notfunktion
Gelb	Anormal	Handlung im Falle eines anormalen Zustands	- Eingreifen zum Unterdrücken des anormalen Zustands - Manueller Eingriff zum Neustart eines unterbrochenen autom. Zyklus
Grün	Sicherer Zustand	Handlung bei sicherem Zustand oder um normale Zustände vorzubereiten	- Start/Ein
Blau	Vorschrift	Zustand mit Handlungsbedarf	- Rückstellfunktion
Weiß Grau Schwarz	Keine eindeutige Bedeutung	Einleiten von Funktionen	- Darf für beliebige Funktionen eingesetzt werden, außer für NOT-AUS, z. B. für AUS/EIN, HALT/START

◘ **Bild 15.35** Allgemeine Bedeutung der Farben von Bedienteilen. Quelle: [DIN03b]

◘ **Bild 15.36** Drucktaster und Schalter. Quelle: Georg Schlegel GmbH & Co, SIEMENS



15

Gelb wird für Eingriffe benutzt, typisches Beispiel ist eine „Clear“-Taste nach falscher Eingabe. Grün oder Weiß gelten für „Start“, „Ein“ oder ähnliches. Weiterhin können die Farben Weiß, Grau und Schwarz für Bedienteile verwendet werden, die wechselweise START/EIN und STOP/AUS bewirken.

Wichtig ist es, die Umgebungsbedingungen am Einsatzort zu betrachten. Ein Bedienpult für eine Einrichtung in einem Messraum muss anders ausgelegt werden als ein Bedienpult zum Einsatz in einer Gießerei. Einsatzbezogene Merkmale können sein: Die Dichtigkeit, die Resistenz gegen Staub, Flüssigkeit und Öle (vgl. IP-Schutzklasse in ◘ Bild 15.12) oder die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Belastung bzw. Schwingungen und Stöße.

Weiterhin ist zu beachten, ob der Bediener dicke Handschuhe trägt und somit nur große Druckknöpfe betätigen kann. Ein Bildschirm kann in Ölnebel und Staubumgebung nach kurzer Zeit nicht mehr ablesbar sein. Da moderne Maschinen auch für Bediener geeignet sein müssen, die an ältere Maschinentypen gewöhnt sind, werden auch konventionelle Komponenten, wie z. B. das elektronische Handrad verwendet. Hierbei wird die Drehung des Handrades in ein elektrisches Signal umgewandelt, das zur Ansteuerung der Antriebe verwendet wird. Komponenten eines typischen Bedienfeldes für NC-Maschinen sind Bildschirm, Tastatur, elektronisches Handrad und Not-Aus-Schalter. Die Maschine wird durch einen Druckknopf eingeschaltet, der oft

abschließbar ausgeführt ist, um unbefugtes Benutzen zu vermeiden. Die Tastatur wird fast ausschließlich als Folientastatur ausgelegt. Diese Tastatur ist hierdurch völlig gekapselt und sehr resistent gegenüber Umwelteinflüssen. Einfachere Maschinen mit wenigen Befehlstasten sind oft mit Drucktasten und Schaltern ausgestattet, ◘ Bild 15.36. Die Taster, die einen Maschinenstart bewirken, dürfen nicht hervorstehen, um ein unbeabsichtigtes Betätigen zu verhindern.

Bedienfelder müssen klar strukturiert sein, damit der Bediener jederzeit die Übersicht behält. Wichtigste Komponente ist der Not-Aus-Schalter, der deutlich sichtbar und gut erreichbar angebracht sein muss. Die Lage von Bildschirm und Tastatur ergibt sich automatisch aus Augen- und Handhöhe. Schlüsselschalter und Befehlstasten, die selten benötigt werden, sollten im Hintergrund platziert werden, während die häufig benutzten Tasten wie Richtungsvorgabe, Geschwindigkeitsvorgabe usw., zentral angeordnet sein sollten. Die übrigen Befehlsgeräte sollten dem Funktionsablauf entsprechend angeordnet sein. Weitere Informationen zu Benutzerschnittstellen sind dem ▶ Kap. 11.5 zu entnehmen. Nockenschalter eignen sich gut, um auf einfache Weise mehrere Maschinenfunktionen zu schalten, wie z. B. die Vorgabe unterschiedlicher Geschwindigkeiten.

Sind mehrere Schaltkammern vorhanden, lassen sich für jede Schalterstellung verschiedene Funktionen kombinieren, indem die Nockenscheiben der einzelnen Schaltkammern entsprechend der gewünschten Kombinationen von Funktionen ausgeführt werden. Weitere Befehlsgeräte sind Fußschalter, die z. B. zum Schließen des Futters einer Drehmaschine dienen, sodass der Bediener beide Hände frei halten kann.

Meldegeräte dienen dazu, dem Bediener bestimmte Maschinenzustände zu signalisieren. Meistens werden Leuchtmelder eingesetzt. Dazu ist wieder die Farbgebung zu beachten, ◘ Bild 15.37. Rotes Licht signalisiert Notzustände. Bei Rot muss sofort die auslösende Gefahr abgestellt werden. Gelb bedeutet Vorsicht vor anomalen Zuständen, die eventuell zu einer Gefahr führen könnten und Grün signalisiert einen sicheren Betrieb. Blau, Weiß und Schwarz

◘ **Bild 15.37** Farbgebung bei Leuchtmeldern. Quelle: [DIN03b]

Farbe	Bedeutung	Erläuterung	Tätigkeit des Bedieners	Anwendungsbeispiele
Rot	Not	Gefährlicher Zustand	Sofortiges Klären und dringender Handlungsbedarf, z. B. durch Not-Halt, Ventil öffnen, Kühlpumpe starten	- Druck/Temperatur außerhalb sicherer Bereiche - Spannungsausfall - Betriebsstörungen eines wichtigen Anlagenteils - Ausfall notwendiger Maschinen, Hilfssysteme
Gelb	Anormal	Anormaler Zustand oder bevorstehender kritischer Zustand	Beobachten und/oder Eingreifen, z.B. Wiederherstellen der Sollfunktion	- Druck/Temperatur weichen vom normalen Bereich ab - Auslösen einer Schutzvorrichtung einer Hilfseinheit - Überfahren eines Grenzschalters
Grün	Normal	Normaler Zustand	Freigestellt	- Einschaltfreigabe - Anzeige normaler Betriebsbedingungen
Blau	Vorschrift	Anzeige eines Zustands der ein Handeln erfordert	Vorgeschriebene Tätigkeit	- Anweisung an den Bediener, vorgewählte Werte einzustellen
Weiß Grau Schwarz	Keine eindeutige Bedeutung	Jede Bedeutung darf angewendet werden, wenn bzgl. der Farben ROT, GELB, GRÜN, BLAU Zweifel bestehen	Beobachten	- Allgemeine Informationen z. B. Bestätigung eines Befehls, Messwertanzeige

können für andere Funktionen verwendet werden. Heute ist es vielfach üblich, die Betriebszustände auf dem integrierten Bildschirm auszugeben, sodass Leuchtmelder wegfallen. Weitere Meldegeräte sind analoge oder digitale Anzeigen für Spannungen und Ströme. Gefahr kann auch durch Töne signalisiert werden, indem bei Zuständen, die eine Gefährdung eines größeren Bereiches bedeuten, ein Signalhorn die Umgebung warnt.

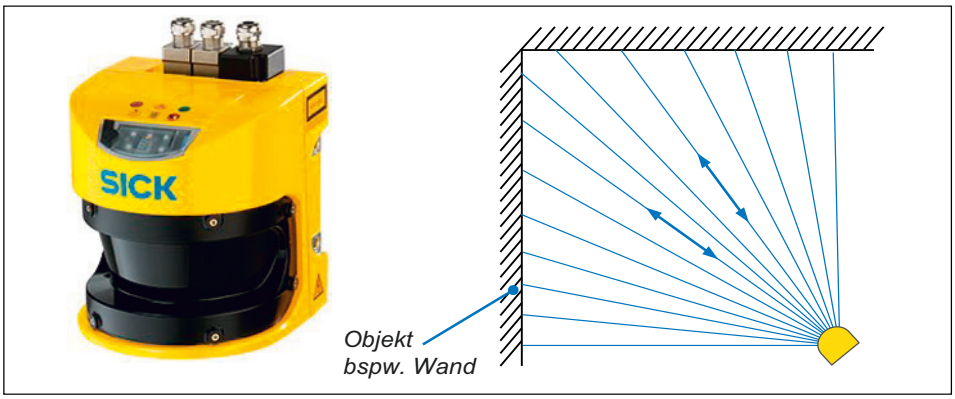
15.2.5.4 Sicherheitseinrichtungen

Der Umgang mit Maschinen stellt fast immer eine Gefährdung für den Menschen dar, sobald der Bediener gezwungen ist, Material in den Arbeitsraum zu bringen. Bei der Produktion besteht für den Bediener der Maschine durch herumfliegende Späne, rotierende Werkzeuge bzw. -stücke, durch den Arbeitshub von Pressenstößel usw. Verletzungsgefahr.

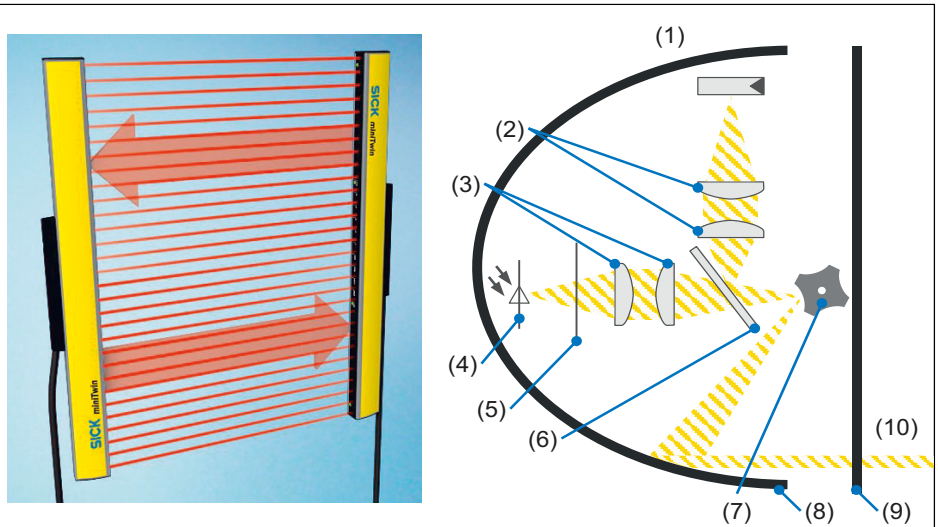
Auch bei der Inbetriebnahme, Wartung und Reparatur sind diese Gefahren vorhanden. Die Sicherheitsvorschriften der Berufsverbände helfen dem Maschinenkonstrukteur, die Maschine derart auszulegen, dass der Bediener vor möglichen Gefahren weitgehend geschützt wird. Es darf heute keine Maschine in Betrieb gehen, die nicht den Sicherheitsanforderungen genügt. Für Sicherheitseinrichtungen gilt, dass sie einen sicheren Betrieb der Anlage gewährleisten und auch bei einem Fehler an der Sicherheitseinrichtung selbst die überwachte Anlage sicher abschalten.

Die selbstüberwachenden Schaltungen sind oft sehr aufwendig. Sogar bei einem Kabelbruch in der Zuleitung der Einrichtung muss die betreffende Maschine gestoppt und eine entsprechende Fehlermeldung ausgegeben werden. Sicherheitseinrichtungen dürfen nicht auf einfache Art durch den Bediener umgangen oder außer Betrieb gesetzt werden

Drehstrahl-Laserscanner



Scanner-Lichtvorhang



1 Empfangselement
2 Empfangskondensor
3 Kondensor
4 Laser-Diode
5 Blende
6 Strahlteiler
7 Spiegelrad
8 Hohlspiegel
9 Fenster
10 Schutzfeld

Bild 15.38 Ausführungen von Sicherheits-Lichtschranken. Quelle: SICK AG

können. Ihre Reaktionszeit zwischen Auslösen der Sicherheitseinrichtung und dem vollständigen Stillstand der Maschine muss möglichst kurz sein, z. B. kürzer als die Zeit, die der Bediener benötigt, um in den Gefahrenbereich bzw. an die Gefahrstelle zu gelangen.

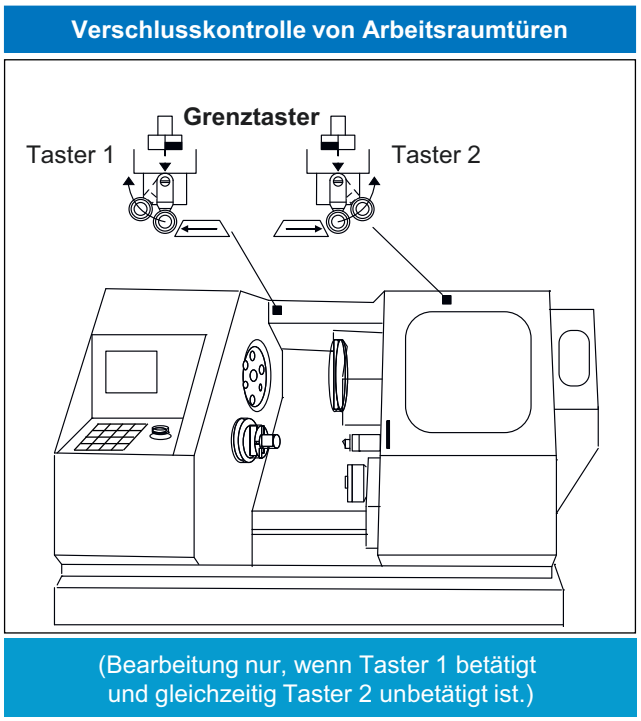
Die wohl bekannteste Sicherheitseinrichtung bei Pressen ist die Zweihandschaltung. Dabei wird der Pressvorgang nur dann ausgelöst, wenn die zwei Startknöpfe gleichzeitig gedrückt werden, die sich in ausreichender Entfernung von dem Arbeitsraum der Presse befinden. Absolut sicher sind die Lösungen jedoch nicht. So kann sich trotzdem eine andere Person im Gefahrenbereich der Presse aufhalten.

Erfinderische Bediener bauen sich Hilfsvorrichtungen, um die Maschine dennoch nur durch eine Hand zu betätigen. Deshalb werden oft zusätzlich bewegliche Schutzgitter vor dem Arbeitsraum eingesetzt.

Eine in diesem Anwendungsbereich häufig anzutreffende Sicherheitslösung verwendet Lichtschranken, Lichtgitter oder Lichtvorhänge. Bei Lichtgittern bzw. bei der Absicherung durch eine oder mehrere Lichtschranken kann der Arbeitsvorgang nur dann ausgelöst werden, wenn die Lichtstrahlen nicht unterbrochen werden, ◘ Bild 15.38.

Bei einem Lichtvorhang wird nur mit einem einzigen rotierenden Lichtstrahl gearbeitet, der mit Hilfe eines Motors angetrieben wird und die abzusichernde Fläche überdeckt. Der Strahl wird auf der anderen Seite des abzusichernden Raumes von einem Prismenreflektor in gleicher Richtung zurückgeworfen und durch die Spiegelanordnung auf eine Photodiode gelenkt. Eine Auswerteelektronik stellt fest, ob der Strahl zu irgendeinem Zeitpunkt unterbrochen wird. Beim Scanner-Lichtvorhang, ◘ Bild 15.38, wird Infrarotlicht über ein rotierendes Spiegelrad und einen Hohlspiegel stets achsparallel auf die Reflektoren jenseits des Gefahrraumes gesendet. Der Empfänger befindet sich im Brennpunkt des Spiegels. Wegen der schnellen Rotation des Spiegels ist der Eingang zum Raum nahezu gänzlich durch den Lichtstrahl abgesichert [GÖRN13]. Der Bediener legt das neue Teil in die Maschine ein, tritt hinter den Lichtvorhang zurück, drückt eine Fuß- oder Handtaste und löst damit den Arbeitsvorgang aus. Die in ◘ Bild 15.39 gezeigten Einrichtungen stellen eine deutliche Verbesserung der Arbeitsbedingungen dar, da die Sicherheitseinrichtung nicht den Arbeitsraum verbaut und den Bediener behindert. Bei der Gestaltung der Lichtschranken oder Lichtvorhänge ist sehr darauf zu achten, dass sie den Gefahrenbereich so abschirmen, dass der Bediener weder absichtlich noch unabsichtlich die Lichtstrahlen umgehen kann.

Gemäß [DIN09b] müssen spanende Werkzeugmaschinen im Betrieb voll gekapselt und für den Bediener nicht zu direkt zugänglich sein. Die (automatische) Bearbeitung darf nur dann starten, wenn die Tür des Arbeitsraumes geschlossen ist. Die SPS überwacht dies mit Hilfe von zwei demontagesicheren Endschaltern an der Tür. Der Arbeitsvorgang wird nur dann



◘ **Bild 15.39** Verschlusskontrolle an der Arbeitsraumtür einer Drehmaschine

freigegeben, wenn die Türe ganz geschlossen ist.

In Mehrmaschinensystemen, z. B. Transferstraßen, flexiblen Fertigungszellen und Fertigungssystemen, läuft der Materialtransport automatisch ab. Falls ein Bediener in den Bereich des Systems kommt, muss er vor Verletzungen durch die Bewegung von Robotern, Flurförderfahrzeugen etc. geschützt werden. Die sicherste und einfachste Maßnahme stellen Schutzzäune dar. Beim Öffnen einer Tür der Umzäunung fällt ein Relais ab und die gesamte Anlage steht still. Kollisionen mit Flurförderfahrzeugen können mit Hilfe von Ultraschallsensoren oder durch berührungsempfindliche Vorbauten verhindert werden. An eng begrenzten gefährlichen Bereichen, z. B. im Bereich von Robotern, können Trittmatten eingesetzt werden. Sobald eine bestimmte Gewichtskraft auf die Matte wirkt, wird das Gerät abgeschaltet. Auch können Lichtschranken einen wirksamen Schutz bieten. Flüssigkeits- oder gasgefüllte Schläuche, die durch Drucksensoren auf Berührung reagieren, können an möglichen Quetschstellen angebracht werden. Sie wirken als Notausschalter. ◘ Bild 15.40 zeigt die verschiedenen Sicherungsmöglichkeiten am Beispiel eines flexiblen Fertigungssystems.

15.2.5.5 Schaltschrankbau

Während in der Maschine die wesentlichen Befehls- und Meldegeräte sowie die Antriebe untergebracht sind, beinhaltet der Schaltschrank die Steuerungskomponenten. In ihm werden die benötigten Spannungen bereitgestellt, Steuerungsfunktionen durch die NC und SPS geschaltet und die

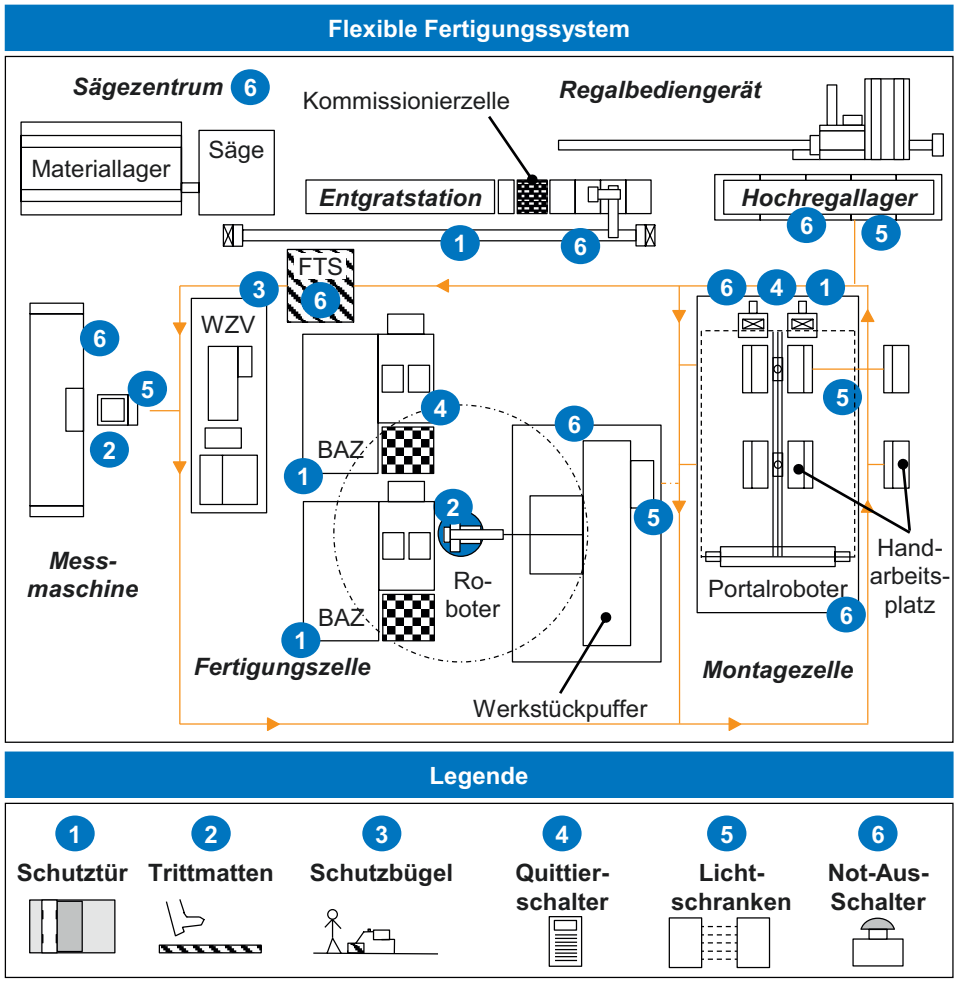


Bild 15.40 Sicherheitseinrichtungen an einem flexiblen Fertigungssystem

15

Regelung von Servo-Antrieben durchgeführt. Beim Schaltschrankbau ist man bemüht, möglichst viele empfindliche Bauteile kompakt, übersichtlich und geschützt unterzubringen.

Konstruktion und Aufbau

Standardisierte Rahmen und modulare Montageelemente erlauben einen (platz)effizienten Schaltschrankbau. In den äußeren Rahmen werden Montageplatten für Großgeräte wie Transformatoren angebracht. Auf Montageleisten befestigt man z. B. die Relais. Trageschienen eignen sich zum Befestigen von Geräten mit einfacher Schnappbefestigung. Kammplatten dienen für die Verkabelung. Die Verdrahtung, die früher durch Kabelkanäle durchgeführt wurde, erfolgt hier im Rückraum des Schaltschrankes.

Mit diesem System kann der benötigte Schaltschrank sehr flexibel erstellt werden. Der Schaltschrankauslegung geht eine räumliche Anordnungsplanung der einzelnen Komponenten voraus.

Komponenten und ihre Platzierung

Die Komponenten im Inneren eines Schaltschrankes werden nach verschiedenen Gesichtspunkten angeordnet. Kriterien hierfür sind die Trennung in Hoch- und Niederspannungsbereich, das Maß der Wärmeabgabe, die Störempfindlichkeit gegenüber E-Feldern, die Zugänglichkeit bei Wartung und Reparatur und das Zusammenfügen von solchen Gruppen, die bei der Maschinensteuerung gleichartige Funktionen erfüllen. Aus dem oben beschriebenen modularen Schaltschrankprinzip leitet sich ab, dass Bauteile gleichen Typs wie z. B. Relais in Baugruppen in dem Schaltschrank angeordnet werden.

Nachfolgend werden typische Komponenten des Schaltschrankes kurz behandelt. Hierzu zeigt Bild 15.41 am Beispiel des Schaltschrankes einer Drehmaschine den typischen Schaltschrankaufbau.

Die Transformatoren mit Netzspannungsregelung stellen aus der vom Hauptschalter ankommenden Spannung alle benötigten Betriebsspannungen zur Verfügung bzw. sorgen für eine ausreichende Spannungskonstanz, da das Netz häufig Spannungsschwankungen aufweist. Die Leistungsteile stellen Spannung und Strom für die Antriebe bereit. Beide Baugrup-

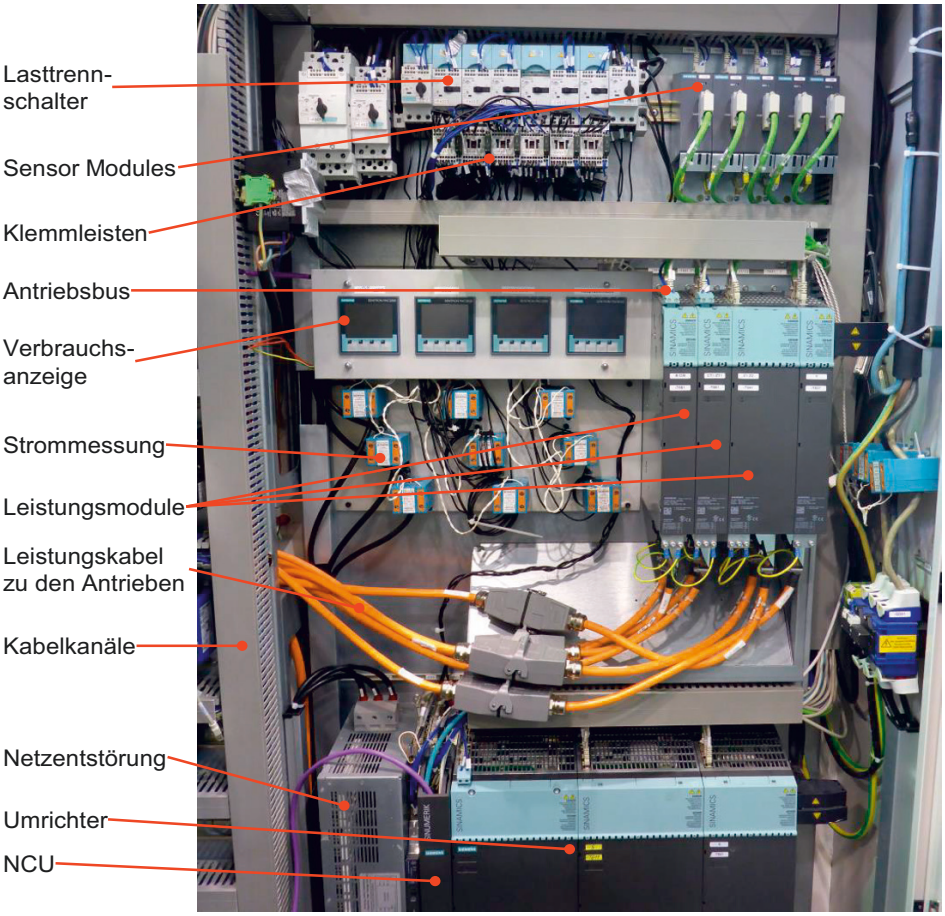


Bild 15.41 Aufbau des Schaltschranks einer Drehmaschine

penarten sind schwer und großvolumig und geben sehr viel Wärme ab. Wegen des Gewichtes müssen Geräte auf dem Boden des Schaltschrankes angebracht werden. Allerdings muss die entstehende Wärme möglichst an der Entstehungsstelle abgeführt werden. Gegen elektrische Felder empfindliche Komponenten können auf diese Weise weit entfernt von diesen Geräten mit ihren starken Störfeldern angebracht werden.

Der Unterschied zwischen Schütz und Relais ist in Bild 15.42 und Bild 15.43 gezeigt. Während beim Relais ein Kippkontakt auf Basis eines Kontaktes aus Federstahl das Umschalten vornimmt, wird beim Schütz durch den Magneten beim Umschalten ein gerades Schaltstück gegen eine Feder auf die zu verbindenden Kontakte gedrückt. Da ein solches Schaltstück größer ausgeführt werden kann als ein Federkontakt und somit höhere Ströme übertragen kann, werden Schütze zum Schalten größerer Leistungen genutzt. Bei der Auswahl von Schützen muss darauf geachtet werden, dass auf jeden Fall auch hohe Ströme wieder abgeschaltet werden können, ohne dass ein Lichtbogen bestehen bleibt oder ein Verschweißen der Kontakte eintritt. Die Schütze zum Schalten hoher Leistungen werden im Schaltschrank getrennt von den Relais mit niedriger Leistung angebracht.

Überstrom-Schutzeinrichtungen dienen dem Schutz von Leitungen, Motoren, Geräten etc. gegen Überlast und Kurzschluss. Hierzu stehen Schmelzsicherungen, Leitungsschutzschalter und Leistungsschalter zur Verfügung. Diese Einrichtungen unterscheiden sich hinsichtlich folgender Kriterien:

- Auslösestrom: strom- und zeitabhängiges Schalten der Einrichtung,
- Ausschaltvermögen: maximaler Strom, bei dem die Einrichtung noch schaltet,

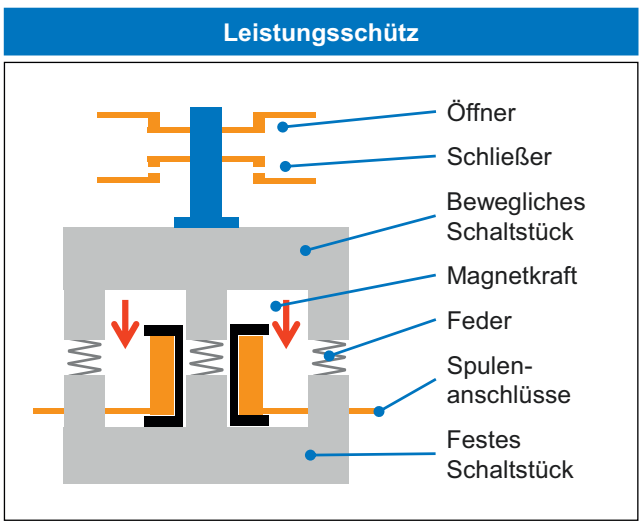


Bild 15.42 Leistungsschütz

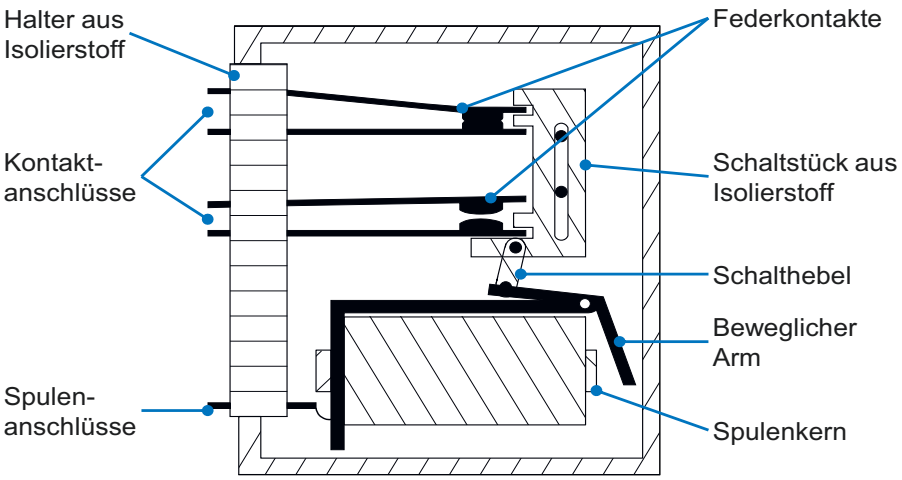


Bild 15.43 Aufbau eines Relais

- Selektivität: gezieltes Schalten der Einrichtung in einem Stromkreis, bevor eine Einrichtung im übergeordneten Stromkreis mit höherem Auslösestrom schaltet,
- Durchlassstrom: maximaler Strom, der über die Einrichtung fließt, bevor sie schaltet.

Im Maschinen- und Anlagenbau werden als Schmelzsicherung zum Schutz von Leitungen in der Regel NH-Systeme (Niederspannungs-Hochleistungs-Sicherungssysteme) eingesetzt.

Sie bestehen aus einem Metalldraht, der bei Überschreiten des Auslösestroms schmilzt und so den Stromkreis sicher unterbricht. NH-Sicherungen können für Stromstärken zwischen 2 und 400 A eingesetzt werden. Zum Schutz von Geräten bei Überlast und Kurzschluss können Geräteschutzsicherungen eingesetzt werden. Wie die NH-Systeme sind diese ebenfalls Schmelzsicherungen. Es gibt sie jedoch nur für Stromstärken von 0,032 bis 6,3 A.

Der Nachteil von Schmelzsicherungen besteht darin, dass sie nach einmaligem Auslösen ersetzt werden müssen. Auch ist nicht immer direkt ersichtlich, welche Sicherung durchgeschmolzen ist.

Leitungsschutzschalter dienen dem Schutz von Leitungen bei Überlast und Kurzschluss. Sie haben ein Ausschaltvermögen von 3 bis 10 kA.

Leistungsschalter werden unter anderem zum Schutz von Motoren und Leitungen eingesetzt und haben ein Ausschaltvermögen von 10 bis 100 kA.

Beide Schutzeinrichtungen verfügen über einen thermischen Auslöser für kleinere Überströme und einen magnetischen Auslöser für hohe Überströme oder Kurzschlüsse.

Der thermische Auslöser wird mit einem Bimetall realisiert, der überlastzeitabhängig schaltet. Sowohl der Leitungsschutzschalter als auch der Leistungsschalter können schnell wieder einsatzfähig gemacht werden. Allerdings besteht die Gefahr des Verschweißens der Kontakte, die ihn funktionsunfähig machen kann. Deshalb darf er nicht zum Personenschutz eingesetzt werden.

Fehlerstromschutzschalter werden zum Schutz von Personen eingesetzt. Sie stellen hierzu fest, ob alle Ströme vom Außenleiter („Phase“) zum Neutralleiter fließen. Ist dies nicht der Fall, so liegt ein Körper- oder Erdschluss und damit eine Gefährdung von Personen vor. Die Prinziplösung des Fehlerstromschutzschalters ist eine um mehrere Leitungen gelegte Ringspule, die den Summenstrom misst. Dieser beträgt im Normalfall null. Tritt ein Fehler (Körper- oder Erdschluss) auf, ist der Summenstrom von Null verschieden. Durch den entstehenden Summenstrom wird ein Schalter betätigt, der die Anlage abschaltet.

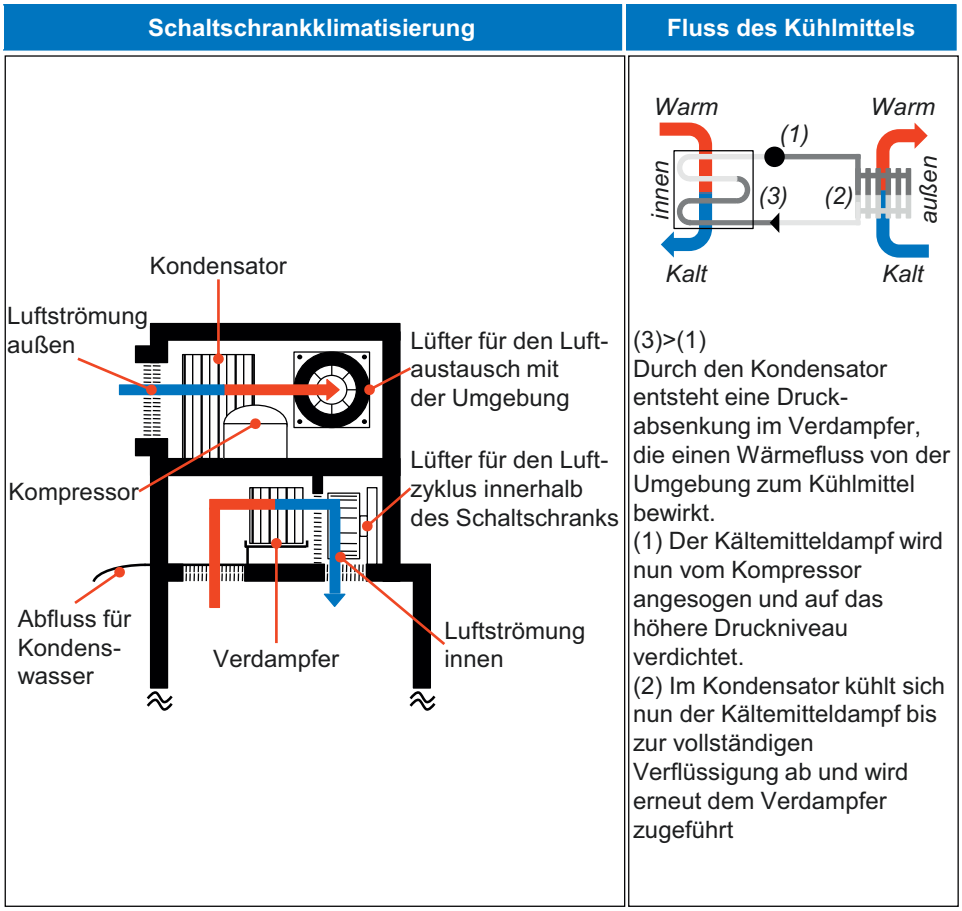
Grundsätzlich müssen Sicherungen im Schaltschrank so angebracht werden, dass sie jederzeit leicht zugänglich sind, um einen Austausch bzw. ein Wiedereinschalten einfach zu ermöglichen.

Steuerungen beinhalten eine Reihe von Wärmeerzeugern. Andererseits enthalten sie Elemente, die sehr empfindlich auf Wärme und elektrische Felder reagieren, sodass sie zu Fehlfunktionen führen können. Deshalb müssen diese Komponenten entfernt von den Transformatoren und der Hochspannungsseite im Schaltschrank untergebracht werden.

Um alle Komponenten zu verbinden bzw. mit Strom zu versorgen, ist bei heutigen Maschinen eine Vielzahl von Kabeln notwendig. Ein Kabelbruch kann daher häufig nur mit hohem Aufwand lokalisiert werden und so einen Teil der Produktion zum Stillstand bringen. Um einen Kabelfehler schnell zu finden und den Draht zu ersetzen, muss jeder Draht bzw. jedes Kabel markiert und jede Anschlussklemme bezeichnet werden. Die Kabelmarkierung wird durch Farb- oder Zahlenaufdrucke auf der Isolationsummantelung dargestellt.

Im Schaltschrank und auch in der Maschine dienen Klemmleisten als übersichtliche Zwischen- oder Verteilerstationen, an denen leicht geprüft werden kann, an welcher Stelle im Stromfluss defekte Bauteile liegen. Klemmleisten sind dann vorgeschrieben, wenn mehr als zehn Leiter in ein Gehäuse eingeführt werden. Die Verlegung der Kabel von

Bild 15.45 Aufbau eines Kühlgeräts



den Klemmleisten aus sollte so erfolgen, dass die Kabel zu Strängen zusammengefasst und in Kabelkanälen geführt werden. Quer durch den Schaltschrank gespannte Kabel sind zu vermeiden, da sie Wartung und Reparatur erschweren. Die Kabel dürfen im Schaltschrank keinen mechanischen Zugbelastungen ausgesetzt werden, nicht in der Nähe heißer Bauteile liegen und auch nicht an E-Feld-empfindlichen Baugruppen vorbei geführt werden.

Die standardisierte Farbgebung hilft dem Elektrotechniker, das Kabel der Verwendung direkt zuzuordnen [DIN03a]. Schwarz kennzeichnet die Hauptstromkreise, Blau den Mittelleiter von Hauptstromkreisen, Rot die Steuerstromkreise für Wechselspannung, Blau die Steuerstromkreise für Gleichspannung, Orange die Verriegelungsstromkreise und Grün/Gelb den Schutzleiter. Kabelstecker, die aus dem Schaltschrank hinausführen, müssen durch eine Verschraubung gesichert sein.

Schaltschrankklimatisierung

Da viele der im Schaltschrank untergebrachten Komponenten mehr oder weniger große Verlustleistungen in Form von Wärme abgeben, andererseits eine Reihe von Komponenten gegen hohe Temperaturen empfindlich sind, ist oft eine Schaltschrankklimatisierung unumgänglich. Sie hat nicht

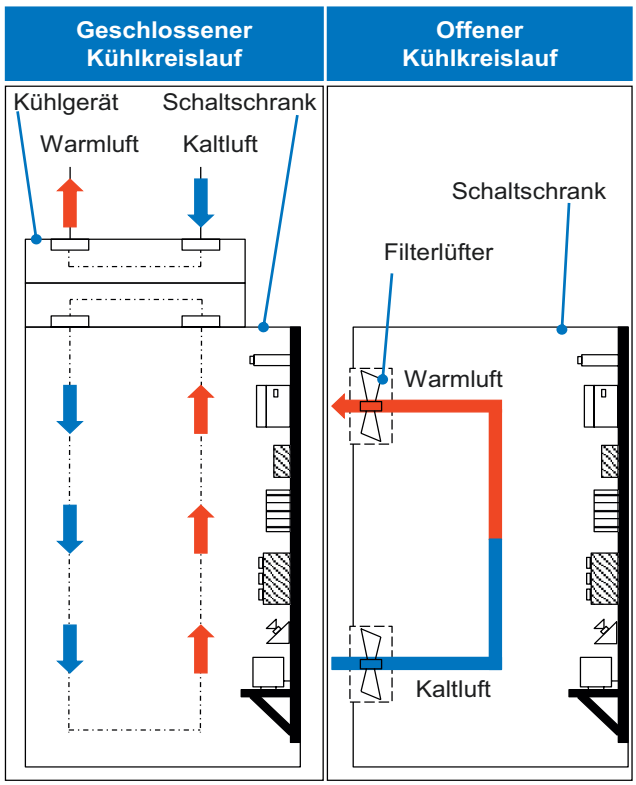


Bild 15.44 Schaltschrankklimatisierung

nur den Zweck der Kühlung, sondern sorgt auch für eine vorgeschriebene Luftfeuchtigkeit im Schrank, die zum Betrieb bestimmter Bauteile eingehalten werden muss.

Steuerungen, die in klimatisch ungünstigen Umgebungen eingesetzt werden, sind vollkommen gekapselt, sodass keine Außenluft in den empfindlichen Teil der Steuerung eindringen kann. Solch geschlossene Schaltschränke benötigen zur Abfuhr der Wärmeenergie Wärmetauscher oder Kühlkompressoren, ◘ Bild 15.44. Im Falle geringer Verlustleistung und bei nicht völlig geschlossenen Schränken reichen einfache Lüfter aus. Die Luft ist jedoch zu filtern. Innerhalb des Schrankes können an besonders empfindlichen Baugruppen zusätzlich Ventilatoren angebracht sein. Bei der Auslegung des Schaltschrankes ist die abzuführende Wärme abzuschätzen, sodass ein geeignetes Klimatisierungsgerät ausgewählt werden kann, ◘ Bild 15.45.

Literaturverzeichnis

[BRAN15] Brandt-Pook, H.; Kollmeier, R.: Softwareentwicklung kompakt und verständlich. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015

[BUND15] Gesetz ArbSchG, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2015). Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit

[DGUV97] Satzung DGUV Vorschrift 3 (01.01.1997). Unfallverhütungsvorschrift Elektrische Anlagen und Betriebsmittel (bisher: BGV A3)

[DIN02] Norm DIN EN 50274, VDE 0660-514 (2002). Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Schutz gegen elektrischen Schlag – Schutz gegen unabsichtliches direktes Berühren gefährlicher aktiver Teile

[DIN03a] Norm DIN 40108 (2003). Elektrische Energietechnik – Stromsysteme – Begriffe, Größen, Formelzeichen

[DIN03b] Norm DIN EN 60073, VDE 0199 (2003). Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle, Kennzeichnung – Codierungsgrundsätze für Anzeigengeräte und Bedienteile

[DIN04a] Norm DIN EN ISO 7200 (2004). Technische Produktdokumentation – Datenfelder in Schriftfeldern und Dokumentenstammdaten

[DIN04b] Norm DIN EN 61131-1 (2004). Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Informationen

[DIN08] Norm DIN EN 1037 (2008). Sicherheit von Maschinen – Vermeidung von unerwartetem Anlauf

[DIN09a] Norm VDE 0100-100, VDE 0100-100 (2009). Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe

[DIN09b] Norm EN 12417 (2009). Werkzeugmaschinen – Sicherheit – Bearbeitungszentren

[DIN10] Norm DIN EN 50370-1, VDE 0875-370-1 (2010). Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Produktfamiliennorm für Werkzeugmaschinen – Teil 1 Störaussendung

[DIN12] Norm DIN EN ISO 10218 (2012). Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen

[DIN13] Norm DIN EN ISO 12100 (2013). Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung

[DIN14a] Norm DIN EN ISO 14119 (2014). Sicherheit von Maschinen – Verriegelungseinrichtungen in Verbindung mit trennenden Schutzeinrichtungen – Leitsätze für Gestaltung und Auswahl

[DIN14b] Norm DIN EN 61131-3 (2014). Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 3: Programmiersprachen

[DIN14c] Norm DIN IEC 60050-351 (2014). Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik

[DIN14d] Norm DIN EN 60848 (2014). GRAFCET – Spezifikationssprache für Funktionspläne der Ablaufsteuerung

[DIN15] Norm DIN EN 61131-2, VDE 0411-500 (2015). Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 2: Betriebsmittelanforderungen und Prüfungen

[DIN16a] Norm DIN EN 61140, VDE 0140-1 (2016). Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel

[DIN16b] Norm DIN EN 61082, VDE 0040 (2016). Dokumente der Elektrotechnik

[DIN16c] Norm DIN EN ISO 13850 (2016). Sicherheit von Maschinen – Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleitsätze

[DIN17a] Norm DIN EN 81346-2 (2017). Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung – Teil 2: Klassifizierung von Objekten und Kennbuchstaben von Klassen

[DIN17b] Norm DIN EN 55014-2, VDE 0875-14-2 (2017). Elektromagnetische Verträglichkeit – Anforderungen an Haushaltgeräte, Elektrowerkzeuge und ähnliche Elektrogeräte – Teil 2: Störfestigkeit – Produktfamiliennorm

[DIN18a] Norm DIN VDE 0100-410, VDE 0100-410 (2018). Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag

[DIN18b] Norm DIN EN ISO 13857 (2018). Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen

[DIN18c] Norm DIN EN 60947-1, VDE 0660-100 (2018). Niederspannungsschaltgeräte – Teil 1: Allgemeine Festlegungen

[DIN19a] Norm DIN EN 61439-1, VDE 0660-600-1 (2019). Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Teil 1: Allgemeine Festlegungen

[DIN19b] Norm EN 60204-1, VDE 0113-1 (2019). Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen

[DIN19c] Norm DIN EN 60529, VDE 0470-1 (2019). Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code)

[DIN19d] Norm DIN EN 60034, VDE 0530 (2019). Drehende elektrische Maschinen

[DIN75] Norm DIN 66217 (1975). Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen

[DIN83a] Norm DIN 66001 (1983). Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung

[DIN83b] Norm DIN 66025-1 (1983). Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen

[DIN97] Norm DIN EN 60617 (1997). Graphische Symbole für Schaltpläne

[DIN98] Norm DIN EN 50178, VDE 0160 (1998). Ausrüstung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln

[FEST16] Festo Didactic: Näherungsschalter, induktiv. URL: http://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/00271055001075223623.pdf. [Stand: 28.09.2017]

[GÖRN13] Görnemann, O.; Stubenrauch, H.-J.: Whitepaper – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS) für sichere Maschinen. Waldkirch, 2013

[GREC10] Grechenig, T.: Softwaretechnik. (Reihe: IT Informatik). München: Pearson Studium, 2010

[HANS10] Hanser, E.: Agile Prozesse: Von XP über Scrum bis MAP. Berlin: Springer, 2010

[HARW12] Harwardt, M.: Wasserfallmodell versus Scrum. Saarbrücken: Akademikerverlag, 2012

[HEIN15] Heinrich, H.: Systemisches Projektmanagement. München: Hanser, 2015

[JOHN09] John, K.-H.; Tiegelkamp, M.: SPS-Programmierung mit IEC 61131-3. (Reihe: VDI). 4., neubearbeitete Aufl. Dordrecht: Springer, 2009

[LITZ13] Litz, L.: Grundlagen der Automatisierungstechnik. 2., aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2013

[OEST09] Oestereich, B.; Bremer, S.: Analyse und Design mit UML 2.3. 9., aktualisierte und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2009

[RUMP11] Rumpe, B.: Modellierung mit UML. (Reihe: Xpert.press). Dordrecht: Springer, 2011

[STAH12] Stahl, T.; Völter, M.; Efftinge, S.; Haase, A.: Modellgetriebene Softwareentwicklung. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2012

[STET04] Stetter, R.: Software im Maschinenbau – lästiges Anhängsel oder Chance zur Marktführerschaft? URL: http://www.software-kompetenz.de/servlet/is/21700/Stetter-SW_im_Maschinenbau.pdf?command=downloadContent&filename=Stetter-SW_im_Maschinenbau.pdf. [Stand: 28.09.2017]

[THIE10] Thieme, J.; Hanisch, H.-M.: Model-based generation of modular PLC code using IEC61131 function blocks. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE-02, 2010. S. 199–204

[TSUB13] Tsubaki Kabelschlepp GmbH: Betriebss- und Wartungsanleitung für Energieführungsketten aus Kunststoff. URL: http://kabelschlepp.de/fileadmin/img/downloads/BW_Energiefuehrungen_Kunststoff_DE.pdf. [Stand: 28.09.2017]

[UHLI06] Uhlig, R.: SPS – modellbasierter Steuerungsentwurf für die Praxis. München: Oldenbourg, 2006

[VDI04a] Richtlinie VDI 2206 (2004). Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

[VDI04b] Richtlinie VDI 2223 (2004). Methodisches Entwerfen technischer Produkte

[VDI10] Richtlinie VDI/VDE 3695 (2010). Engineering von Anlagen – Evaluieren und optimieren des Engineerings

[VDI91] Richtlinie VDI 2854 (1991). Sicherheitstechnische Anforderungen an automatisierte Fertigungssysteme

[WEIL14] Weilkiens, T.; Soley, R. M.: Systems Engineering mit SysML/UML. 3., überarb. und aktualisierte. Aufl. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2014

Serviceteil

Stichwortverzeichnis – 712

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021
C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1

1

Stichwortverzeichnis

A

Ablaufsprache 374, 383 f., 391 f.
Ablaufsteuerung 288, 372, 374, 376, 383, 391 f., 414, 419
Abnutzungsvorrat 260 f., 263
Abrichten
– Überwachung 251
Abrichthäufigkeit 251
Abschneidversuch 151
Absolutgenauigkeit 565
Abtast
– einheit 61 f., 63, 66, 77, 84 f., 485
– frequenz 208 f.
– gitter 62 ff., 68, 72
– hebel 307 f., 312
– rate 18, 20
– schritte 128, 135
– strategien 487, 489
– system 127, 131, 135
– theorem 208 f.
Abtasten 488 ff., 493 f.
Abtastung 62 f., 66, 84, 127, 208 ff.
– inkremental-absolute 68
Abtragrate 252, 255 f.
Achtspindler 312
Acoustic Emission (AE) 232
Adaptive Control 205, 288
Addierer 354
Addierwerk 344
A/D-Wandler 348
Agile Softwareentwicklung 674
Aktionsplaner 601
Aktor-/Sensorebene 420, 640 f.
Aliasing 209
Amplitudenreserve 124
AND 334 f.
Anregelzeit 25
Anregungsfrequenz 145, 157, 159
Antrieb 86, 116 ff., 136 f., 140, 142 ff., 149, 151, 153, 155 ff.
– direkt- 26
– Lineardirekt- 12, 181, 183, 187
– Vorschub- 116, 135, 137, 138, 140, 143 ff., 149, 153 ff., 180 ff., 188 f.
Antriebs
– einheit 12, 24, 89
– schnittstelle 20
– signal 203, 227 f.
– verstärker 14, 51, 58
– welle 313, 322
Anweisungsliste 383, 384, 386, 387, 390, 392
Application Specific Integrated Circuits 352
APT 455, 459, 461, 467
Arbeitsbereich 563
Arbeitsfolge 310, 312, 638
Arbeitsweg 310, 312
Arithmetic Logic Unit 356
ASCII-Code 333
Assembler 677
– aufgabenorientierte 590
Auflichtverfahren 62, 64, 65
Aufschaltelement 132
Auftragsverwaltung 420, 430, 661
Augmented Reality 506, 507
Ausfallrate 264
Ausgangsgleichung 133
Ausgangsmatrix 134
Ausgleichszeit 125, 127, 130
Ausrichtetisch 553
austauschprogrammierbar 372
Automat 284
– Halb- 284
– Teil- 284
– Voll- 284
Automatisierung 284, 656 ff., 663 f.
Automatisierungspyramide 640 f., 663

B

Bahn
– abweichung 169, 170, 171, 173, 174, 175
– äquidistante 448
– fehler 132
– fehlerkorrektur 132
– korrektur 448, 607
– planung 601
– steuerung 416, 417
Basiszahl 330
Baustein 376, 383, 385, 389, 390, 407, 408
BCD-Code 333
BDE-Terminal 655 f., 661
Bearbeitungsqualität 24
Bearbeitungsvorgänge 447, 457, 597
Bedienerschnittstelle 699
Bedienfeld 701
Bedienoberfläche 435, 438, 454, 502, 596, 644, 653, 659
Bedientafel 418, 500
Benutzerschnittstelle 168, 428, 433, 497, 500
Beobachterstruktur 152, 158
Beschleunigungssensor 226, 228
– piezoelektrischer 228
Betrieb
– Dauer- 49, 91
– Halbschritt- 51, 53
– Kurzzeit- 49
Betriebsdaten 419
– erfassung 639, 653, 655 f., 661
Betriebssystem 422 f., 428, 627
Beugung 64, 69
Bewegungsarten 588
Bezugsmaßprogrammierung 447
Bildbereich 118
Bildverarbeitungssysteme 611
Binärzähler 343
Blechpaket 53
Blockschaltbild 134, 142, 158
Bode-Diagramm 120 f., 124, 189
Bohren
– Prozessüberwachung 244
– Tief- 248
Bohrerbruchüberwachung 244
Bolzen 102, 104
Boolsche Algebra 334
Bremse 13, 17, 25, 40, 44, 56
bürsten 38
Bürsten 26, 27, 30, 31, 32, 51
Busarchitektur 359
Bussystem 396, 405

C

CAD 441 f., 459 ff., 472 f., 483 f., 494, 497, 595, 638 f., 648, 658, 664 f.
CAM 441 f., 459 f., 463 f., 466, 470, 472, 477, 484, 529, 536, 638 f., 648
CAN-Bus 610
CAP 459 f., 463 f., 466, 472, 484, 638 f., 641
CAQ 463, 639
Carrier-Sense-Multiple-Access-Verfahren 359
CAx-Systeme 695
CCD-Kamera 245
CE-Zeichen 683
CIM 636 f.
CMOS 341
Code-Generator 679
Cogging 54
Collision
– Avoidance 360
– Detection 360
Compilezyklen 436, 437
Cyclo-Getriebe 102, 103

D

Dämpfung 117 f., 120, 134 f., 139 f., 145, 148, 151, 157 f., 160, 209
– aktive 158
Dämpfungsgrad 120, 136, 139, 140, 159
Datencodes 332
Datenkomprimiereinrichtung 485
Datenreduktion 494, 495
Datenspeicher 380
Datenverarbeitung 298
D/A-Wandler 351
Dead-Beat-Entwurf 135
Decodierer 347
Definitionsphase 675
Dehnmessstreifen 228
– aktiver 216
– passiver 216
Dehntransformator 229
Denavit-Hartenberg-Verfahren 584
Dezimalsystem 330
D-Flip-Flop 343
Diagnose 420, 427, 662
– aufgaben 206, 268
– system 197, 268
Differenzengleichung 128 ff.
Differenzialgleichung 118, 120 f., 123 f., 128, 130, 132 ff., 141
Differenzialgleichungen 118
Digitalisierung 206, 208, 210, 484 ff., 491
DIN 66025 423, 425, 434, 439, 446 f., 449, 455, 458, 460, 470, 482, 601
Direktantrieb
– linearer 147 f., 151, 154 f., 157 f., 161
Direktes Berühren 683
Disjunktionen 337
disjunktive Normalform 337
Diskette 441
Division, ganzzahligen 330
DNC 415, 417, 420, 441, 472, 641, 648, 656, 661
Doppelexzenter 103
Doppelkammanordnung 54
Doppelmutter 88
Drehautomat 304 ff., 308, 309, 312, 322
Drehbearbeitung 216
– Drehmomentregelung 218
– Kraftregelung 218
– Leistungsregelung 218

– Prozessüberwachung 216
– Sensorsysteme 216
Drehgeber 136, 149, 150, 292, 309, 322
– digital-absoluter 68
– inkrementaler 31, 63
Drehmoment 218
– anpassung 97
– dynamisches 231
– messung 216
– messvorrichtung 203
– regelung (Drehbearbeitung) 218
– sensor 228
– Spitzenwert 220, 229, 236
Drehmomentregelung
– Regelbereich 236
Drehzahl 117, 126, 137, 143, 153, 155, 158
– änderungsstrategie 241
– biegekritische 143
– regelung 19, 31, 41
Drehzahlregelung 292
dreikanalig 399
Druckknopf 700
Druckköltasche 94
Drucktaster 700
Druckwächter 697
DTL 341
Dualsystem 330
Durchlichtverfahren 62, 63
D-Verhalten 121
Dynamic Spline 101

E

Ebenenmodell 420 f.
ECAD-System 695
Echtzeitfähigkeit 396, 404
Eckenverrundung 171
Eigenfrequenz 117, 144 f., 148 f., 157, 160
– des Lageregelkreises 145
Eigenschwingung 151, 158
– hochfrequente 151
– mechanische 151, 158
Eilgang 183 f.
Ein-/Ausgänge 611
Eingangsmatrix 134
Eingriffsbreite 552 f.
Eingriffsgrenzen (OEG,UEG) 260
Einlegegeräte 562
Einmassenschwinger 118 ff., 134 f.
Ein-Rampen-Verfahrens 349
Einschaltverzögerung 387
Einspindeldrehautomat 304 f., 307, 312
Einstellen 432
Einstellregeln 125, 129, 130
Einzelkammanordnung 54
Einzelpunktantastung 488, 489
Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory 352
Elektronische Identifikationssysteme 295
Empfindlichkeit 209, 216 f., 223, 228 f., 257
Energie, dynamischer Anteil 231
Energiekette 698
Enterprise Resource Planning 286
Entgraten 237
Entwurfsphase 675
ereignisgesteuert 382 f.
ERP 638, 641 ff.
Ersatzsteifigkeit, dynamische 159
Ethernet 421, 610, 648, 656, 657, 658
Events 437
Expertensystem 272
Exzenter 97, 103
Exzentergetriebe 102, 103

F

Fähigkeitsindex 259
Fail-Safe-Ausgang 403
Federsteifigkeit 105
Feedforward-Controller 131 f.
Fehler 168, 174 f., 428, 441, 458, 478, 507, 545, 546, 551, 553, 656, 659, 662
– geometrischer 168
– kinematischer 144
Fehlerstromschutzschalter 706
Feinplanung 638, 645, 647, 659, 661
Feldbus 360, 381, 397, 404 f.
Feldbussystem 421, 590
Feldschwächbereich 43
Feldschwächung 29, 37, 51
Ferraris-Sensor 152 f.
Fertigungsaufträge 420, 430, 638 f., 647, 651, 661
Fertigungseinrichtung 479, 503
Fertigungsfehler 551 f.
Fertigungshilfsmittelorganisation 432
Fertigungsleitrechner 641, 647 f., 656, 661
Fertigungsleitsystem 639, 644, 646 f.
Fertigungsprozess 427, 480, 483, 499 f., 504, 645, 649, 653, 662
Fertigungssysteme 294
Fertigungszelle, flexible 647
Festkommazahl 332
Field Programmable Gate Array 352
Flächenrückführung 496 f.
Flankensteilheit (Filter) 209
Flexspline 99
Flip-Flop 342, 385 f.
Flüssigkeitskühlung 57
Flussregler 43
Fourieranalyse 189
FPGA 352
Fräsbearbeitung
– Prozessregelung 233
– Prozessüberwachung 229
Fräserabdrängung 552, 553
Frequenz
– Eigen- 181 ff.
– Eigenkreis- 188 f.
– gang 120, 123 f., 128, 137, 146, 156, 158 ff.
– komplexe 118, 120
– modulator 13
– Resonanz- 181 f., 190
– umrichter 14, 86
Frequenzvervielfachung 80
Fügeplaner 601
Führungs
– größe 116 f., 122, 136, 144, 168 f.
Funkenerosionsanlage 252
Funkenspannung
– Regelung 253, 255
Funktionsabläufe 288
Funktionsbeschreibung 415
Funktionsfolge 289
Funktionsplan 374, 383 ff., 685
Funktionstest 262

G

Gatter 336
Gegenkopplung 123
Gegenspannung, induzierte 137, 143
Gelenkkoordinaten 577
Genauigkeit 116, 136, 144, 153
– Positionier- 181
– stationäre 135, 158
Geometriedaten 168
– verarbeitung 514, 515
Geradeninterpolation 526
Gesamtanlageneffektivität 264
Gesamtsteigung
– Rollengewindetrieb 89
Geschwindigkeits
– aufschaltung 175
– regler 136 f., 148, 158 ff.
– rückführung 136
– verstärkung 137 f., 140, 148, 158 f.
Geschwindigkeitsführung 516 ff., 520 ff., 536 f., 544, 555, 607
Getriebe
– Übersetzungs- 183
– Überwachung 273
– Vorschub- 86, 97
– Zahnriemen- 180
Gewindespindellagerung 90
Gitterteilung 64, 69, 71
Gleitkommazahl 332
Glockenankerläufer 26
Gray-Code 67, 333
Greifhänden 619
Greifplanung 601
Grenzfrequenz 140, 154
Grenztaster 696
Grenzwert
– fester 213
Grundfunktion 607
Grundprogrammiersprachen 383
Gütemaß, quadratisches 135

H

Halbaddierer 344
Halteglied 127, 128, 131
Handbediengerät 564
Handhabungsgeräte 562
Hardware-in-the-Loop 383, 394 f.
Hardwarekomponenten 380
Harmonic-Drive 99, 104
Hartgewebeschicht 57
Harvard-Architektur 356
Hauptantriebsmotor 313, 321
Hauptsteuerwelle 305 ff.
Hexadezimal-Code 333
Hexadezimalsystem 330
Hexapod 170
Hexapodroboter 573
Hilfsphase 80
Hochlaufzeitkonstante 184
Hohlkolben 94
Hohlläufer 26
Hohlschaftkegel 295
Hüllkurvensignal 210, 223, 274

I

IC 352
Identer 354
IEC 61131-3 384
IGBT 143
Implementierungsphase 676
Indexbolzen 307, 309
Indexiereinrichtung 318
Indirektes Berühren 683
Inductosyn 73, 75
Industrial Ethernet 361
Industrie-PC 380
Industrieroboter 562
Informationsfluss 648, 653
Inspektion 261 ff., 268
Installationsplan 688
Instandhaltung 260

– ausfallbedingte 261
– vorbeugende 261
– zeitabhängige 261
– zustandsorientierte 261
Instandhaltungsstrategie 261, 264
Instandsetzung 197, 261
Integerzahl 332
Integralanteil 137, 156, 159 f.
Integrierte Schaltkreise 352
Interferenz 72 f.
Interferometer 18, 71 f.
Interpolation 18, 22, 63, 65, 72, 77 ff., 168, 514 f., 517 f., 526 f., 531, 533, 537, 579
– Kreis- 168
– Spline- 168
Interpolations
– fehler 168
– tabelle 82
– takt 18
– verfahren 79
Interpolator 168 f., 171
Interpretersprache 678
Inversstabilität 132
IP-Schutzklassen 683
Istwert 117, 122
I-Verhalten 121

J

Johnson-Drive 94
Joystick 591

K

Kabelkanäle 707
Kabelzuführung 698
Kalibrierung 613
Karnaugh-Veitch-Diagramm 337
Kennkreisfrequenz 158
Klassifikation 212
– mehrdimensionale 213
– Mustererkennung 231, 272
Klemmenplan 694
Klemmleiste 706
Knickung 181
Koexistenzmanagement 363
Kollektorlamelle 27
Kollision 199 f., 213, 221, 223, 256
Kollisions
– punkt 258
– raum 257 f.
– rechner 258
– schaden 106
– schutzsystem 256, 258
– ursache 256 f.
Kommunikation 637, 640 ff., 648, 657 ff., 661, 662, 664
Kommunikationsschnittstellen 433
Kommutierung 31, 38
Kompensation 18, 82, 515, 545 ff.
– Faserabdrängung 552 f.
– Fräserabdrändung 552
– Fräserabdrängung 553
– steuerungstechnische 547
Kompensationsfunktion 154
Komplettbearbeitung 313
Komponente
– mechanische 180 f., 183 f.
Konstruktionsarbeitsablauf 286
Kontaktplan 383 ff., 389, 392
Konturabweichung 553
Konturfehler 553
Koordinatensystem
– Feld- 43
– Läufer- 42
– Stator- 42
– Statorwicklungs- 42
Koordinatensystemen 577
Koordinatentransformation 417
Körperschall 210, 223 f., 229, 232, 246, 251, 273 f.
– Histogramm 215
– Schwingungen 247
– Streubreite 247
Körperschallsensor 232, 251
Körperströme 683
Korrespondenztafel 118
Kostenreduktion, Potenzial 244
Kraft
– fluss 53, 86, 105, 117, 145, 154 ff.
– messlager 247 f.
– regelung (Drehbearbeitung) 218
– welligkeit 54
Kraftrückführung 569
Kraftsensor 229, 257
– piezoelektrischer 229
– Quarzsensor 217
Kreis
– umfahrfrequenz 172
Kreisform
– abweichung 171
– test 173
Kreisinterpolation 527, 588
Kreuzschlitten 322
Kugel
– gewindespindel 87, 90, 105
– gewindetrieb 53, 86, 87
– rückführung 87
– umlenkung 87
Künstliche Intelligenz 272
Kupllung
– Rutsch- 107
– Sicherheits- 106
Kupplung 84, 86, 104 f.
– Ausgleichs- 97
– Balg- 84, 105
– drehstarre, biegeelastische 105
– Formschluss- 107
– Klauen- 106
Kurvenabschnitt 310
Kurvenberechnungsblatt 310 f.
Kurvenscheibe 305 ff., 310 ff., 318, 321 f., 324
Kurvenscheiben
– berechnung 309
– kontur 309
Kurventrommel 306
Kurzschlussläufer 38, 39
Kurzstatorbauweise 54
KV-Diagramm 337
KV-Faktor 137, 171, 173, 189, 190

L

Ladungsverstärker 229
Lage
– regelkreis 116, 117, 118, 131, 132, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 148, 149, 150, 151, 158, 159, 168, 169, 170, 171, 173, 174, 175
– regler 168, 169, 171
– rückführung 117
– signal 136, 151
Lager 545, 547, 552
Lageregelung 515, 552, 611
Längenmessgerät 83
– gekapseltes 84
– offenes 84
Langsamläufer 26
Längsbearbeitungsblock 313, 319
Längsschlitten 312, 313, 315, 316, 318, 319, 321
Längsschlittenantrieb 318, 319
Laplace-Transformation 118, 127, 130, 131, 159
Lasten- und Pflichtenheft 286
Lastmoment 137
Läuferkoordinatensystem 42
LCD-Anzeige 354
Least-Square-Verfahren 131
Leistungsmessung 218, 226
Leistungsregelkreis (Drehbearbeitung) 219
Leistungsregelung (Drehbearbeitung) 218
Leitebene 640, 641, 649, 657
Leitstand 638, 646, 659, 661
– elektronischer 659
Leitsystem 627, 655, 664
Leitungsschutzschalter 706
Lernprogrammierung 590
Lernregel 215
Lichtgitter 703
Lichtschnittverfahren 611
Lichtschranke 703
Lichtschrankensystem 203, 244
Lichtvorhang 703
Lineardirektantrieb 158
– elektrischer 155, 156
Linear-Inductosyn 73
Logikanalysator 276
Logikbaustein 385
Logiknetzwerke 334
logischer Funktionen 607
Look-Ahead-Funktion 424, 525, 526, 555
Losekompensation 546

M

Maltesertrieb 306, 309, 317
Manipulatoren 562
Maschinencode 677
Maschinendatenerfassung 429, 639, 649, 654
Maschinenfähigkeit 259
Maschinenhauptschalter 696
Maschinen-Nullpunkt M 444
Maschinenrichtlinie 397
Maschinenzustandsgrößen 206
Maßabweichung 547, 550
Maßstab 16, 23, 60, 62, 66, 68, 72, 75 f., 81 ff.
Master-Slave-Verfahren 359
Materialfluss 431
Materialflusses 420
Materialflusssteuerung 649, 661
Materialhandhabung 613
Materialverwaltung 288
MATLAB 141 f.
Matrix 134
Mean Time To Failure 398
Mehrdeutigkeit 587
Mehrmaschinensysteme 647
Mehrmassenschwinger 145 ff.
Mehrspindeldrehautomat 305, 312, 322
Mehrspindler 304 f., 312, 319 ff.
Mensch-Maschine-Schnittstelle 381, 503, 507
Merker 380, 385, 401
Merkmalvektor 208, 214 f., 274
MES 645 f., 662, 664
Messfehler 61, 66, 71 f., 82, 492
Messgenauigkeit 60 f., 66, 68, 72, 83 f.
Messregelung 554
Messsystem 117, 136 f., 142, 144, 148 f., 151, 153 f., 156, 158
– digitales 59
– direktes 186
– indirektes 149, 155

– Weg- 54, 62, 69, 75 f.
Messung
– zyklisch-absolute 62, 73
Messwert 60, 66 f., 104
Messwerterfassung
– absolute 61
– analoge 61
– digitale 61
– indirekte 60
– inkrementale 61
Michelson-Interferometer 73
Mikroschrittbetrieb 51, 53
Mittelwert, gleitender 212
Modalanalyse 145, 148
Modell
– der Regelkreise 137
– steuergröße 131
modellbasierte Softwareentwicklung 679
Modulbauweise 380
Moiré-Verfahren 493
Moment
– Bescheunigungs- 184 f.
– Last- 184
– Massenträgheits- 181 ff.
– Trägheits- 180 ff.
Montage 612
Montagezelle 664 f.
MOS-FET 341
Motion Control 404 ff.
Motor
– Antriebs- 181, 183
– Asynchron- 14, 38, 41, 43, 45, 51, 55, 76
– Gehäuse-Linear- 54
– Gleichstrom- 13, 27, 31, 45, 50, 53, 58
– Hybrid- 51
– Hydraulik- 25
– Langstator- 54
– Linear- 56, 57
– messsystem 186
– moment 137, 143, 181, 183 f.
– Reluktanzschritt- 51
– Schritt- 25, 51, 116 f.
– Servo- 13, 25 f., 38, 50, 86
– Solenoid- 54
– Synchron- 14, 16, 27, 32 f., 35 ff., 51, 54 f., 117, 143, 183
– Vorschub- 183 f.
– wicklung 137, 143
Multiplizierer 354
Mustererkennungssystem 206, 208
Mutter, hydrostatische 87, 89

N

Nachformsysteme 484
Nachgiebigkeit, dynamische 156
Nachgiebigkeitsfrequenzgänge 145
Nachstellzeit 149, 158
Näherungsschalter 696
NAND 335
Nassi-Shneiderman 676
NC-Programm 414 f., 419 ff., 423, 425 f., 430, 432, 438 f., 444, 446, 455, 457, 460, 471, 484, 514, 516, 523, 539, 556, 638 f., 647 f., 653, 659, 661
– objektorientiert 441, 477
NC-Programmierung 424, 433, 439, 444, 446, 453, 463 f., 469, 471, 478, 529, 535, 541
NC-Programmierverfahren 446, 454
NC-Satz 423, 500, 522, 533
NC-Steuerung 168
Near Field Communication 363
Nebenfunktionen 305, 321 f.
Negation 334
Negat-Multiplizierer 354
Netz, neuronales 215, 268, 272 ff.
Neuron 215, 276
Nichtlinearität 141 ff.
Nocken 291, 304 f., 307, 309, 562
Nockenleiste 291
Nockenschaltwerk 321 f.
Nockenscheibe 305, 307 f.
NOR 335
Nullpunktkorrektur 577
Nullpunktverschiebungen 515, 538 f., 547
Nutschrägung 35
Nutzfrequenzbereich 209
Nutzungsgrad 196
Nutzungsreport 656
Nyquist 124 f., 148

O

Objektorientierte Programmierung 679
Offene Steuerungssysteme 415, 432
Offenheit 428, 432, 433, 435, 436, 437, 627, 662
– äußere 433
– innere 433
Offline-Verfahren 590
Oktalsystem 330
Ölversorgungssystem 552
Online-Verfahren 590
OPC Unified Architecture 364
Optische Messgeräte 291
OR 334, 335
Ortskurve 120, 124, 125, 156
– komplexe 155
OSI-Referenzmodell 357

P

Palettentransport 294
Palettenwechsel 294
Parallele Kinematik 542, 563
Parallelumsetzer 349
Parameteridentifikationsverfahren 131
Parityprüfer 347
Passivkraft 216, 224, 231
Performance Level 398
Peripherie 432, 562
Petri-Netze 686
Phasenreserve 124 f.
Phasenshift-Verfahren 493
Photodiodenarray 203, 244
Photoelement 63, 65, 69, 71 f., 81 f.
Pipelining 356
PLA 354
Planetengetriebe 97 ff., 101, 104 f.
Planschlitten 305, 307 f., 310, 312, 321
Planschlittenantrieb 320
Planungsebene 640 f., 663
Planungsphase 675
Playback-Programmierung 591
Polvorgabe 134
Positioniergenauigkeit 12, 25, 51, 53, 59, 83 f., 88, 90, 102
Positionierunsicherheit 545 f.
Positionsbestimmung 290
Positionsinformation 291
Positionszähler 444
Postprozessor 458, 470, 472, 477, 484, 542, 598
PPS 463, 472, 638 ff., 645, 647, 649, 650, 659, 661
Primärteil 12, 53, 55
Product Lifecycle Management 286
Product Owner 675
Produktion, automatisierte 638 f., 641, 647
Profibus 361, 418, 421, 434, 610, 648, 658
Programmable Array Logic 353
Programmable Logic Device 352
programmierbare Logik 352
Programmiernorm 384, 390
Programmierschnittstelle 439, 441, 455, 516, 539
Programmiersprache 435, 439, 446, 447, 454 f., 479, 514, 590, 677
Programmiersprachen 383 f., 387, 601
Programmierung 380, 382 ff., 387, 389, 390 ff., 407 f., 414 ff., 419, 421, 423 ff., 434, 439, 441, 444, 446, 453 f., 458, 460, 465, 471 f., 474, 478, 482, 499, 504, 514, 516, 528, 532, 539
Programmierung von Steuerbefehlen 289
Programmierverfahren 383, 386, 391, 394
Programmspeicher 371, 380 f.
Programmtest 392, 396, 555, 594
Programmzyklus 382
Projektierung 374, 407, 408
Projektierungsaufgabe 694
protokolle 661
Protokolle 658, 659, 662, 664
Prozess 425, 428, 459, 480, 488, 639 ff., 647, 649, 653, 658, 662 ff.
Prozesskräfte 144, 154
Prozessor 417, 456, 464, 514, 516, 630
Prozessregelkarte 260
Prozessregelung 545
– Drehen 221
– Drehmomentregelung 235
– Fräsen 233 f.
– Gussputzen 237
– Möglichkeiten 206
– Prinzipien 205
– Schleifen 249
– statistische 259
– Tiefbohren 248, 249
Prozessüberwachung 298, 436, 454, 502, 504 ff., 610, 649
– Abgrenzung zur Maschinendiagnose 202
– Bohren 244
– Drehen 223
– Fräsen 229
– steuerungsintegriert 226, 229
– steuerungsintern 230
– Tiefbohren 244
Prozessvisualisierung 661
Pseudo-Random-Code 68
PT1
– Glied 137
– Verhalten 121
PT2
– Glied 137, 160
– Verhalten 121
Pulswechselrichter 14
Punktsteuerung 416
P-Verhalten 121

Q

Quadrantenübergangsfehler 170
Qualität, Einflussgrößen 199

Qualitätssicherung 197, 198, 611, 639, 645, 656, 662
Quasi-Einfeld-Abtastung 64
Querstromkomponente 42

R

Radiusdifferenz 172 f., 175
Rampenverfahren 348
Random Access Memory 352
Rastlage 51
Rattererscheinung 223
Rattern
– automatische Beseitigung 235, 238
– Erkennung 238
Ratterschwingung 235, 238 ff., 247
Rauschen
– hörbares 151
Realzahl 332
Rechner 414, 420, 432, 441, 447, 457, 487, 514
Referenz
– marke 65, 77
– punkt 18, 107
Referenzmodell 640
Referenzpunkt 444, 445, 446, 447, 450, 556, 578
– fahrt 445, 499
Referenzpunktfahrt 556
Regel
– abweichung 117, 122, 129, 135, 136, 140
– dynamik 144, 157, 158
– größe 122, 123
– kreis 116 ff., 121 ff., 129, 132, 134, 136, 137 f., 142, 144, 148 f., 151, 154, 158 f., 161
Regelung
– analoge 16
– digitale 16, 19
– feldorientierte 41
Regelungen 404
Regelungseinrichtung, adaptive 256
Regler
– Drehzahl- 187 f.
– Lage- 187, 189
– Strom- 187
Reibung 181, 185
Reihenklemme 699
Relais 340, 705
Relaistechnik 385, 399
Reparaturdauer
– mittlere, zu erwartende 265
Resolver 73, 75 f.
Resonanzfrequenz 144 f.
Resonanzstelle 145, 148, 158
– mechanische 145
Revolverdrehautomat 305 f.
Revolverkopf 307, 310 ff.
Revolverkurve 306
Revolverschlitten 310
Revolverschlitten 309
RFID 295, 364
Riccati-Gleichung 135
Richtungserkennung 73, 79, 82
Ring-Architektur 359
Ripple-Carry-Addierer 344
Ritzeldurchmesser 183, 185
Roboter 432
Robotertypen 563
Rohteilaufmaß 219, 221
Rollengewindetrieb 89
Rollenhebel 307
Ruck 140, 143, 155
Rückmoment 155 f.
Rückwärtstransformation 587

S

Satzaufbereitung 168
Scanning-Betrieb 487, 488
SCARA 570
Schalter 309, 315, 427 f., 504, 507, 562
– elektrische 289
– elektrischer 309
– hydraulische 291
– pneumatische 291
Schalterauswertung 401
Schaltfunktion 291, 305 ff., 310, 321
Schaltfunktionen 415, 420, 424, 432
Schaltgetriebe 307, 309
Schaltglieder 354
Schaltinformationen 421
Schaltkontakte 340
Schaltschrank 704
Schaltungsunterlagen 688
Scheibenläufer 26
Schleifbearbeitung, Prozessregelung 249
Schleifkontakt 51
Schlepp
– abstand 137 f.
– fehler 18, 53, 131, 142, 171, 173
– fehlerkorrektur 131
Schneideneingriffsfrequenz 233
Schnellläufer 26
Schnellschaltkupplung 305 ff.
Schnellspanneinrichtung 295
Schnittaufteilung
– automatische 221, 223, 235 f., 240
Schnittkraft
– messung 216
– regelstrecke 219
– sensor 216
Schnittkraftkomponenten 551
Schnitttiefenreduzierung 222 f., 235, 240, 244
Schrittfrequenz 53
Schrittweite 153 f.
Schütz 705
Schutzfunktionen 682
Schutzisolation 683
Schwelle
– mitlaufende 213, 224, 226, 230 f., 264
Schwingung
– Maschinen- 210, 239, 249
– selbsterregte 235, 238 f., 241
Schwingversuch 126 f., 130
SCRUM 674
Sechsspindler 304, 313 f.
Segmentierung 488 f.
Sekundärteil 12, 53 ff.
Selbsthaltung 374, 375, 400
Selbsthemmung 154 f.
Sensor
– magnetoresistiver 76 f.
– mechanischer 203, 244
– optischer 203, 244, 245, 257
– Ringinduktiver 248 f.
Sensorführung 238
Sensorsystem 492, 495, 607
– Drehbearbeitung 216
– Erkennung von Ratterschwingungen 238, 243
– kraftbasiertes 226
– Prozessr. Gussputzen 237
– Prozessüb. Fräsen 237
SERCOS 14, 18 f., 21, 23
SERCOS-Bus 658
seriellen Kinematik 542
Serienaddierer 344
Servo
– achsen 14
– antrieb 50 f.
– motor 13, 25 f., 38, 86, 109
– system 20
– verstärker 13, 19, 21 f., 31, 38
Sicherheitsschaltung 416
Sicherheitssteuerungen 396
Sigma-Delta-A/D-Wandler 350
Signal
– dynamik 209
– rauschen 208 f.
Signalglied 696
Signalverarbeitung 371
– analoge 208, 210
Simulation 140 ff., 149
Simulationsumgebung 395 f.
Simulink 142
Sinusansteuerung 33
SISO-System 133 f.
Software 415, 419, 421, 432 ff., 455, 458, 487, 497
Softwarebausteine 423
Softwareendschalter 17
Softwareerstellung 393
Softwarefehler 392 f.
Software-in-the-Loop 395 f.
Softwarekosten 392
Sondervorschubgetriebe 99
Spaltweitenregelung 255 f.
Spandickenmodulation 238, 242 f.
Späneflusserkennung 248
Späneförderung 298
Spanformerkennung 248
Spannfehler 553, 554
Speicherbausteine 372, 385 f.
Speicherkettensystemen 297
Speichermedium 441
speicherprogrammierbar 562
Speicherverhalten 372 f.
Speisung
– blockförmige 14, 33, 35
– sinusförmige 13, 33, 35
Sperr
– dämpfung 209
– frequenz 209
Spiel 116 f., 136, 144
Spielfreiheit 181
– hydrostatische 89
– Kugelgewindetrieb 88, 90
– Zahnradgetriebe 97
– Zahnriemenantrieb 95
– Zahnriementrieb 99
Spindel
– Kugelgewinde- 180
– moment 184
– steigung 183 ff.
Spindeldrehzahl 305, 310, 321, 415, 425, 427, 439 f., 454, 498, 515
Spindellagerung 90 f.
Spindelposition 305, 312 f., 315
Spindelsteigungsfehler 18, 425, 428, 545 f.
Spindeltrommel 305, 312 f., 315, 317 f., 321
Spindeltrommelschaltung 315, 317
Spindeltrommelverriegelung 318
Spline-Interpolation 425, 528, 533
Sprache, domänenspezifische 679
Spracheingabe 507
Sprint 675
Sprung
– Drehzahl- 188
– funktion 187
Sprunganweisung 381, 386 f.
Sprungfunktion 118, 128
SPS 416, 418 f., 432, 647
Stabilität 123 f., 129, 132
Stabilitäts
– karte 240 ff.

– kriterien 124 f.
– minima 240 f.
– rand 124 f., 127, 130
Stabläufer 26
Stangenlademagazin 293
Stangenvorschub- und Spanneinheit 316
Steifigkeit 116 f., 144, 154 ff.
– dynamische 151, 153, 156 f., 159 ff.
– statische 144 f., 155 f.
Steilkegel 295
Stellglied 122, 125
Stellgröße 117, 122, 129, 135 ff., 154
Stellgrößenbegrenzung 135
Stellgrößenbegrenzungen 135
STEP-NC 423, 441, 477
Step-Response-Test 153
Sternarchitektur 359
Steuerbefehle 289
Steuerfunktionen 309, 313, 315
Steuerkette
– offene 116
Steuertrommel 309
Steuerung 116, 122, 126, 132, 137, 140, 144, 153 f., 309, 321, 324, 414 ff., 422, 424 f., 430, 435, 438, 441 f., 447 ff., 453 f., 487, 498 f., 503, 507, 516 ff., 523, 526, 538 ff., 542, 545, 547, 550, 555 f.
– Ablauf- 661
– Maschinen- 321
– mechanische 304 ff.
– NC 514 ff., 528 ff., 533, 536, 539, 541, 552
– NC- 322
– numerisch (NC) 414 ff., 420 ff., 432 f., 439, 450, 471, 478, 498
– speicherprogrammierbare 370 f., 376, 378, 380, 397
– speicherprogrammierbare (SPS) 416
– verbindungsprogrammierte 371, 374, 376, 378
Steuerungsaufgabe 370, 374, 376, 378, 383, 386, 392 f.
Steuerungsebene 640, 641, 658
Steuerungslogik 370
Steuerungsprogramm 373, 378, 380 f., 383, 395
Steuerungssysteme 370, 396 f.
Steuerwellen 315, 321
Steuerwellenantrieb 321
Stichprobe 208, 214, 260
Stick-Slip-Effekt 181
Stirnverzahnung 307, 318
Störfrequenzgang 160
Störgröße 116, 122, 123, 131, 144, 157
Störkraft 151, 157, 159, 161
Störquelle 86
störungsfreie Zeit, mittlere 264
Störverhalten 132, 151, 158
– des Lineardirektantriebes 158
Streckensteuerung 416
Streifenprojektionsverfahren 492
Strom, sinusförmiger 33
Stromanstiegsgeschwindigkeit 143
Stromlaufplan 688
Strommessung, Motor- 218, 248, 262
Strompfad 689
Struktogramm 676
Strukturierter Text 390
Strukturverformung 154 f.
– elastische 156
Stückzeit 305, 310, 312, 427
Subsysteme 438
System
– dämpfung 139
– instabiles 123
– matrix 134
– schwingungsfähiges 142, 151
– zeitdiskretes 126, 127, 129
System-Feldbus 657, 658
Systemspeicher 380

T

Tachogenerator 136
taktgesteuert 379
Tastkugelradius-Korrektur 494
Tastsysteme 485, 487, 489
– messende 489
– optoelektronische 489 f.
– schaltende 489
TCP/IP-Protokoll 662
Teach-In
– Programmierung 591
– Verfahren (Überwachung) 225
Teilfunktion 423 f., 649
Teleoperator 569
Testsignal 187
Testverfahren 394, 395
Tetraden 332
Tiefpassfilterung 209 f., 247
Token-Passing-Verfahren 359
Token Ring 359
Toleranz
– Messsystem 84
– Montage Messsystem 72
Toleranzband 213, 226, 251
Toleranzbereich 495
Toleranzschlauch 495
Totalbruchüberwachung 230
Transferelement
– mechanisches 136
Transferstraße 417
Transformation 423, 436, 458, 496, 503, 514, 538, 541, 542 f., 545, 579
– geometrisch 538
– geometrische 424
– kinematisch 541
– kinematische 425, 438
Transistor 341
Transistortechnik 414
Transition 374, 391, 686
Transportsteuerung 649 f.
Transportsystem 292
– fahrerloses 431
Trapezgewindespindel 87
Trennfunktion 214 f.
Triangulationssensoren 490, 492
Triangulationswinkel 491 f.
TTL 341

U

Übergangsfunktion 118, 121, 123, 125, 127, 129, 131, 159, 160
Überlastbereich 32
Überlastung 205, 217 f., 221, 223, 236
Überschleifen 589
Überschwingen 117, 125, 136, 139 f., 189
Übertragungs
– faktor 124 f., 130
– fehler 144 f.
– funktion 118, 120 ff., 124, 130 ff., 134, 142, 188 ff.
Übertragungselement 150
– mechanische 142, 144 ff., 154, 158
– mechanisches 116 f., 142
– nichtlineare 142
Übertragungshebel 321
Übertragungsverhalten 116, 118, 132, 137, 142, 144, 147, 149, 151, 160
– der Mechanik 116, 142
– dynamisches 116, 127, 144 f.
– kinematisches 144
– statisches 144
Überwachung 16 ff., 20, 24, 59
– Abrichten 251
Überwachungs
– strategie 200 ff., 257
– system 196, 200 f., 204, 214, 226, 248
Ultrapräzisions
– maschine 57, 69, 79, 89
Umfangfräsen, Sensorsystem 237
Umrichter 12, 14 ff., 32, 50, 55, 143
Umrissabtasten 488
Untersetzer 343
USB-Stick 415, 439, 441

V

V-Abtastung 67
Verfahr
– geschwindigkeit 181, 184
– weg 181
Verformung 547, 549, 550, 552, 554
– thermoelastisch 554
Verformungsenergie 106
Verfügbarkeit 197, 202, 260, 264 f.
Vergleicher 347
Verknüpfungssteuerungen 372, 376
Verlagerung 144, 155, 157
Verriegelung 372, 374, 376 f.
Verschleifen 171
Verspannmoment 94
Verstärkung 118, 126, 137, 140, 152, 158 ff., 209, 219, 220, 226, 235, 236, 256
Vertikal-Knickarmroboter 567
Verzahnungsfehler 94
Verzögerungsglied 137, 160
Verzugszeit 125, 130
Vierfeld-Abtastung 63, 69
Vier-Quadranten-Diode 551
Vierspindler 312
VLSI 352
V-Modell 673
Volladdierer 344
Vollschrittbetrieb 51
Von-Neumann-Architektur 356
Vorfiltermatrix 134
Vorschaltgetriebe 97
Vorschub 305, 310, 313, 317 f., 321, 427, 440, 452, 498, 515, 554, 555 f., 579
– achse 116, 136 f., 141 ff., 151, 153 ff., 157
– antrieb 12 f., 19, 24, 27, 33, 53, 56, 87, 89, 90 f., 93, 97, 99, 101, 105 f., 108, 116, 135 ff., 140, 143 ff., 149 f., 153 ff.
– bewegung 86 f., 94
– geschwindigkeit 182
– getriebe 97 ff., 182 f., 185
– kraft 183 f., 214, 218, 224, 247, 249
– regelkreis 117
Vorschubantrieb 55
Vorschubrichtungswinkel 233
Vorschubsteuerung 375
Vorspannung
– hydrostatischer Gewindetrieb 90

– Kugelgewindetrieb 88
– Ritzel-Zahnstange-Antrieb 94
– Zahnriemenantrieb 95, 99

W

Wägeverfahren 349
Wälzlagerüberwachung 213
Wartung 196 ff., 260 ff., 265
Wasserfall-Modell 673
Wave Generator 99 ff.
Weginformation 439, 484
Wegmesssystem 149
– direktes 156, 158
– indirektes 149
Wegmessung 59 f., 63, 72
Wegrasterverfahren 517
Weiterschaltbedingung 686
Weltkoordinaten 577
Werkstattsteuerungssysteme 647, 659
Werkstofftransport 292
Werkstück 414 f., 420, 424, 428, 430 f., 439, 441, 444 ff., 451, 457 f., 470, 482, 485, 489
Werkstückabdrängung 552
Werkstückfehler 169, 173
Werkstücknullpunkt 417, 424, 444, 447, 465, 538
Werkstückwechsel 295
Werkzeugabdrängung 552, 553
Werkzeugbewirtschaftung 650, 652
Werkzeugbezugspunkt 444 f., 538
Werkzeugdisposition 650, 651
Werkzeugfolgeplan 310, 312
Werkzeugidentifikation 296
Werkzeugkoordinatensystems 577
Werkzeugkorrektur 424, 440, 444, 471, 539, 542, 577
Werkzeugmanagement 645, 661
Werkzeugplanung 650 f.
Werkzeugrevolver 306, 309, 312
Werkzeugschlitten 312 f., 322
Werkzeugschneidenbruch, totaler 230
Werkzeugspeicher 296
Werkzeugträgerblock 312
Werkzeugüberwachung
– Kolkverscheiß 224, 231
– Verschleißmarkenbreite 231, 245
Werkzeugverschleiß 425, 427, 428, 545
Werkzeugwechsel 296, 420, 424, 426, 431, 439, 591
Wertetabelle 335
Wertigkeit 330

Wiederholgenauigkeit 565
Wiederverwendbarkeit 514
Winkel
– lage 41, 59, 76
– schritt 51, 53, 60
Winkelfehler 553 f.
Wirbelstromband 152
Wirbelströme 152
Wireless Communication 362
Wirkleistung 223
Wirkmechanismen 614
Wirkungsgrad 184 f.
Wirkungsplan 123, 137 f., 141, 158
Wirkverhältnis 252, 255 f.
Wissensakquisition 273
Wortbreite 208
Wortverarbeitung 389

X

XML 638, 659
XNOR 335
XOR 335

Z

Zahlensystem 330
Zähler 382, 385 f., 388, 389
Zahnradgetriebe 97 f.
Zahnriemen
– antrieb 94, 99
– getriebe 98, 99
– trieb 79, 86, 87
z-Bereich 128
zeitgesteuert 382
Zeitrasterverfahren 517, 519
Zellenrechner 610, 641, 658
Zentralwelle 315
Zerspanarbeit 233
z-Transformation 127 f., 130 f.
z-Übertragungsfunktion 130 ff.
Zustands
– differenzialgleichung 133
– erfassung 197, 212, 265
– gleichung 133
– größe 132, 133 ff.
– raum 214, 268
– raumdarstellung 132 ff.
– regelung 116, 132, 158
– regler 131, 134 f.
– vektor 133
– vergleich 197
Zweierkomplement 331
Zweihandschaltung 703
zweikanalig 398 f.
Zwei-Rampen-Verfahren 349
Zwischengröße 132 f.
Zwischenkreis 143
Zwischenkreisspannung 13 ff., 143
Zyklus 317, 323, 453
Zykluszeit 20, 23 f., 370, 380, 382, 386, 423, 595
– Steuerungen 20, 23