

VDI-Buch

Christian Brecher
Manfred Weck

Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3

Mechatronische Systeme,
Steuerungstechnik und Automatisierung

9. Auflage

VDI

 Springer Vieweg

Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3

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 1: 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 benötig-

ten 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 Messwernerfassung 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 Differenzgleichungen	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 (Gewindespindeltrieb)	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	Steuerunginterne 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 Relais-technik	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	Werkstatorientierte 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 Bremsesetzpunkterkennung.....	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

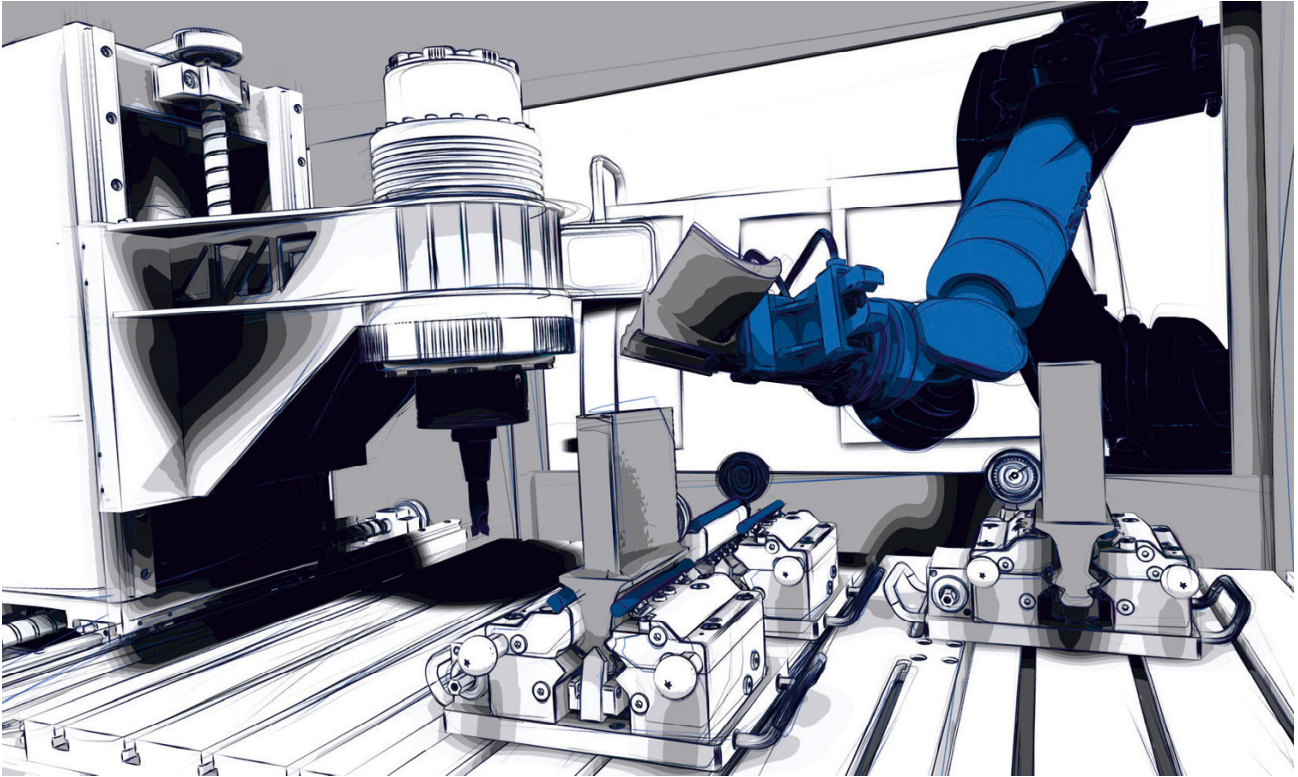
12.3 Externe Lage- und Geschwindigkeitsbeeinflussung	545
12.3.1 Kompensation geometrischer Fehler	545
12.3.1.1 Kompensation geometrischer Fehler von Vorschubantrieben	545
12.3.1.2 Kompensation thermischer Verlagerungen	546
12.3.1.3 Kompensation statischer Prozesslasten	550
12.3.1.4 Messregelung für Schleifprozesse	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	Fertigungsleitreehner	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

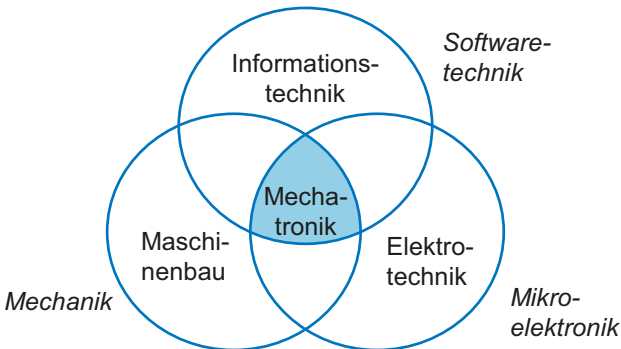
1.3 Aktuelle Entwicklungen – 6

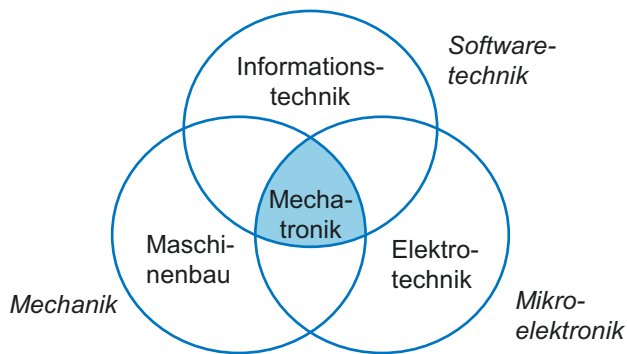
Abkürzungsverzeichnis – 7


Literaturverzeichnis – 7

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

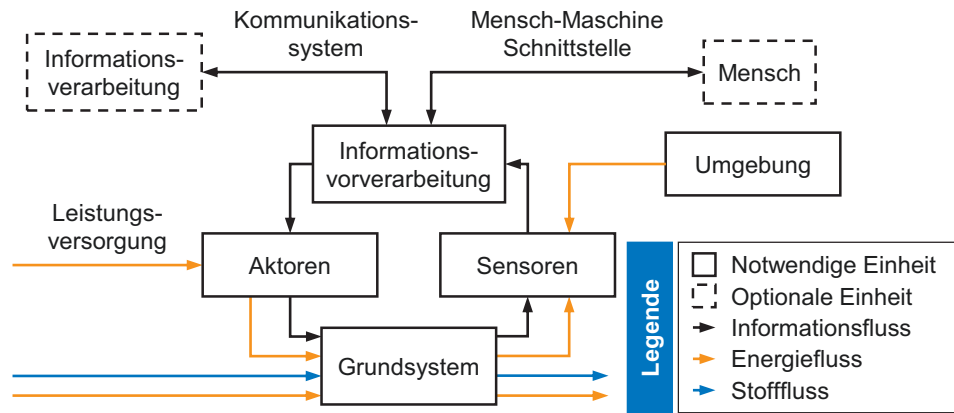
Systemfunktionen indem es den externen Stoff- und Energiefluss beeinflusst. Innerhalb des Systems beruht diese Manipulation auf der Ansteuerung von Aktoren, d. h. den Stellgliedern des Systems, die über eine separate Energiezuführung mit Leistung zur Funktionsausführung versorgt werden. Informationen 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.

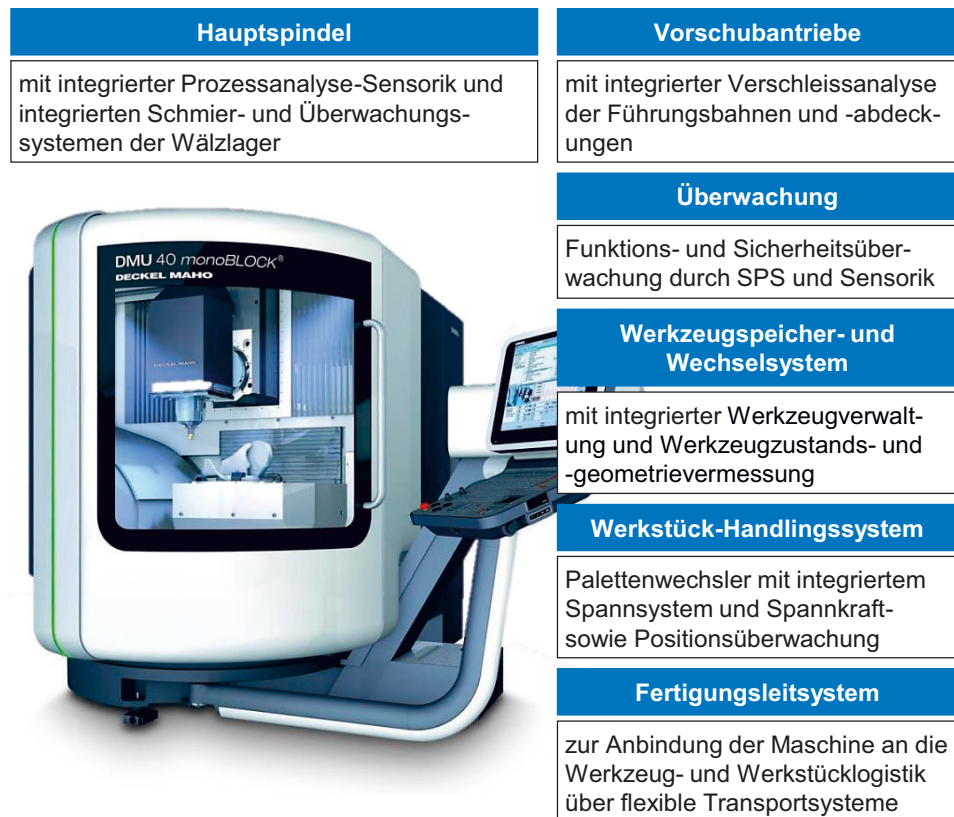
Neben der industriellen Maschine-zu-Maschine-Kommunikation über industrielle Kommunikationsprotokolle können auch Eingabemöglichkeiten für den Bediener einer Anlage vorgesehen werden. Die Eingabe kann dabei direkt mit der mechatronischen Komponente erfolgen, wie z. B. durch Betätigen eines Zustimmungstasters 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 ei-

nerseits 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.

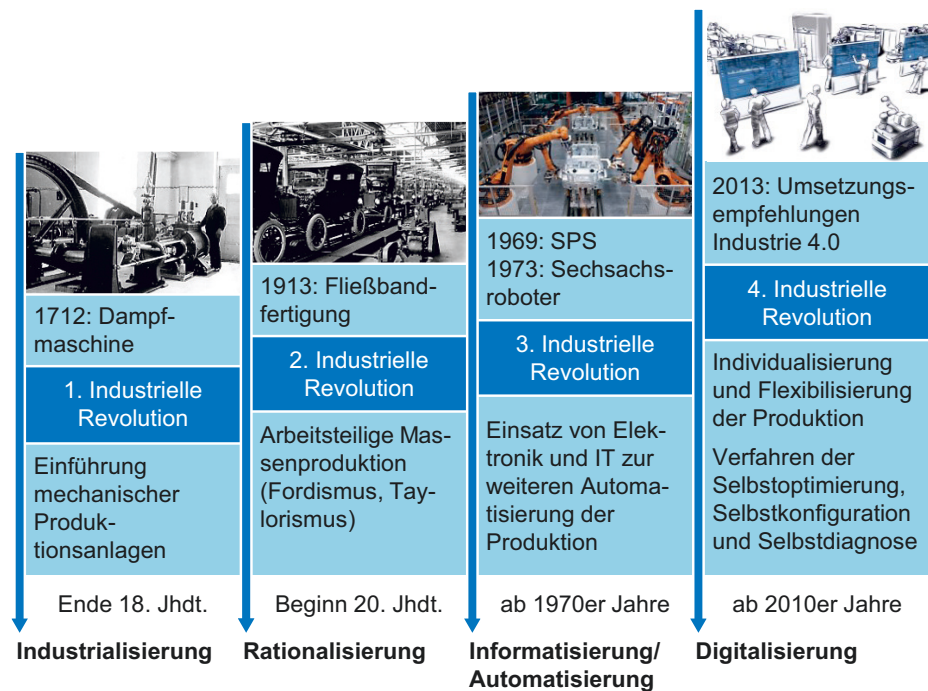
Mit der Weiterentwicklung der Informationstechnologien sind viele Vorgehensmodelle für die Entwicklung entstanden, z. B. Spiralmmodell, V-, W-, Doppel-W- und Y-Modelle und Software-Lösungen für einzelne Bereiche und spezifische Probleme [VOGE03; BOEH88].

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 ein-

geführt 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

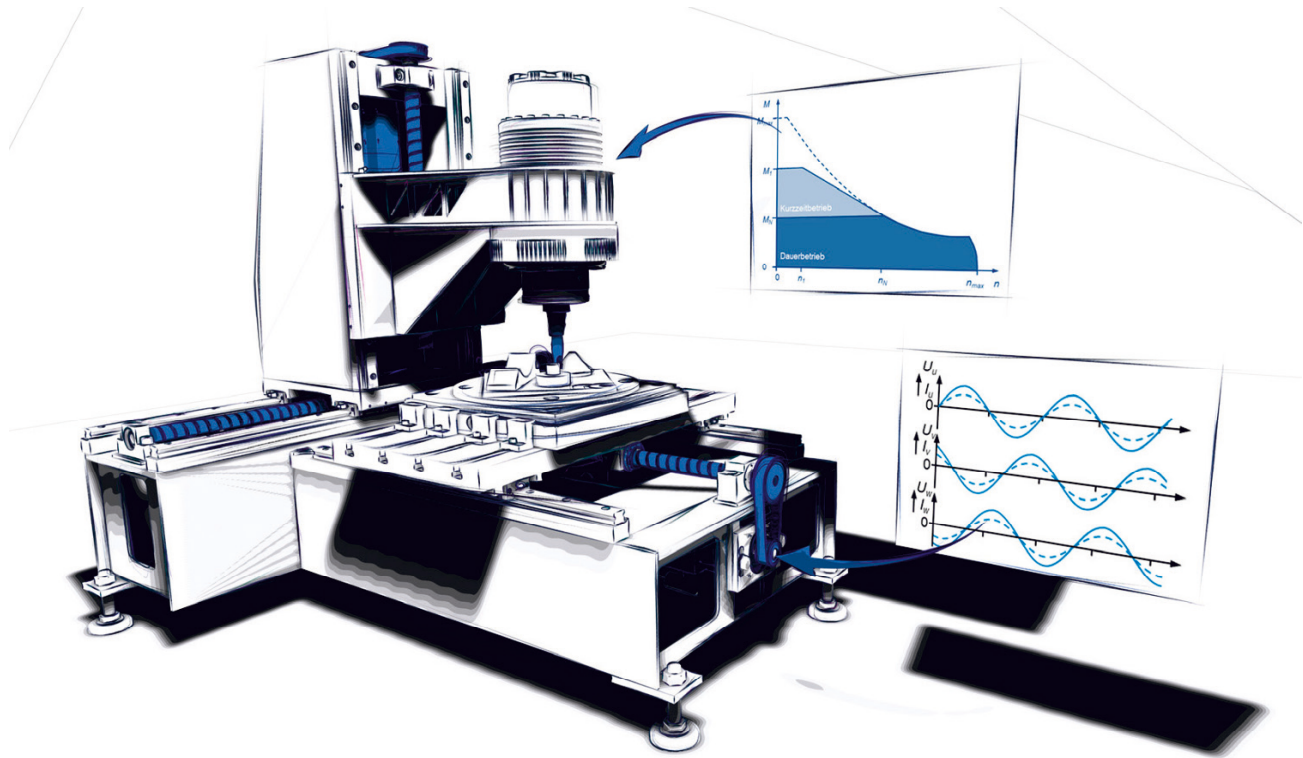
- [ABRA05] Abramovici, M.; Schulte, S.: PLM-Neue Bezeichnung für alte CIM-Ansätze oder Weiterentwicklung von PDM. In: Konstruktion. 1. Jg., 2005, Nr. 1, S. 2
- [BOEH88] Boehm, B. W.: A spiral model of software development and enhancement. In: Computer. 21. Jg., 1988, Nr. 5, S. 61–72
- [BRÖH95] Bröhl, 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.