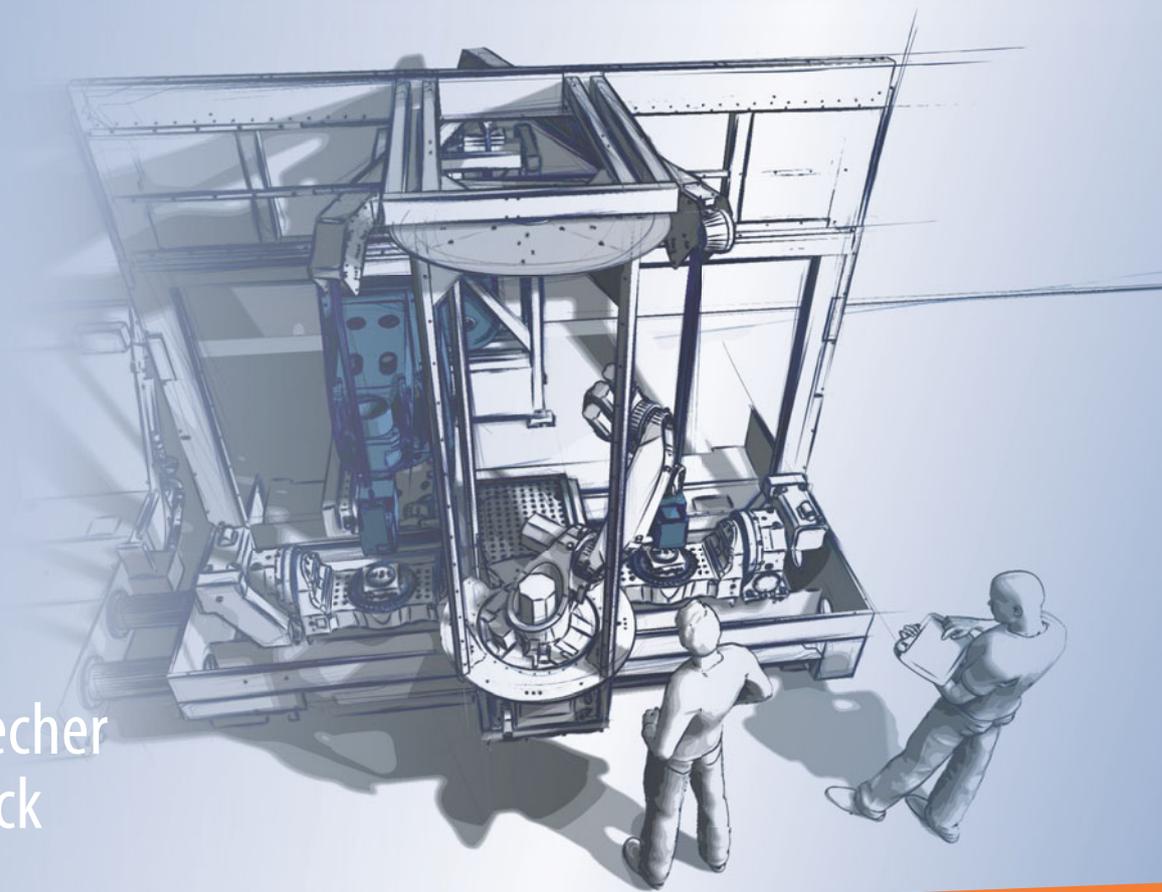


VDI-Buch



Christian Brecher
Manfred Weck

Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2

Konstruktion, Berechnung und
messtechnische Beurteilung

9. Auflage

VDI

 Springer Vieweg

Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme
Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung
Band 2

Christian Brecher, Aachen
Manfred Weck, Aachen

Christian Brecher
Manfred Weck

Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme

Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung
Band 2

Christian Brecher
Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
der RWTH Aachen University
Aachen

Manfred Weck
Werkzeugmaschinenlabor (WZL)
der RWTH Aachen University
Aachen

ISBN 978-3-662-46566-0
DOI 10.1007/978-3-662-46567-7

ISBN 978-3-662-46567-7 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist „Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg“

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 6,8% der Beschäftigten des Maschinenbaus sind im Werkzeugmaschinenbau tätig (VDW, Stand 2015).

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 Mai 2017

Vorwort zum Band 2

Der erste Teil dieses Bandes soll den Konstrukteur bei der Auslegung und Berechnung von Werkzeugmaschinen-Strukturen und -Komponenten hinsichtlich ihres statischen, dynamischen und thermischen Verhaltens unterstützen. Betrachtet werden zunächst Strukturbauteile und die Aufstellungen von Werkzeugmaschinen. Es werden unter anderem die Einflüsse konventioneller und alternativer Werkstoffe auf die Maschineneigenschaften beschrieben. Rechnergestützte Berechnungsmethoden und Optimierungsansätze bilden die Grundlage zur optimalen Auslegung von Strukturbauteilen. Im Anschluss daran werden hydraulische Systeme sowie die leistungs- und genauigkeitsbestimmenden Komponenten wie Führungen, Lagerungen und Vorschubsysteme behandelt sowie Methoden zu ihrer Auslegung vorgestellt. Den auch heute noch in Werkzeugmaschinen vorkommenden Getrieben ist ein gesondertes Kapitel gewidmet. Weiterhin gewinnen Aspekte des Industriedesigns zunehmend an Bedeutung. Ebenso muss ein Konstrukteur die gültigen Richtlinien zur Maschinengestaltung beherrschen. Beides wird in der überarbeiteten Ausgabe ausführlich behandelt.

Der zweite Teil dieses Bandes widmet sich der messtechnischen Untersuchung und Beurteilung der gesamten Werkzeugmaschine bzw. deren Komponenten hinsichtlich der Eigenschaften, die im ersten Teil dieses Bandes behandelt werden. Nach einer Abhandlung der messtechnischen Grundlagen werden die konventionellen und neueren Messgeräte und Messmethoden zur Erfassung von Wegen, Winkeln, Kräften, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Temperaturen und der Schalleistung vorgestellt. In den folgenden Kapiteln wird die Vorgehensweise zur Erfassung des geometrischen, kinematischen, statischen, dynamischen, thermischen und akustischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen beschrieben. Ein gesondertes Kapitel widmet sich der Beurteilung der Maschinengenauigkeit an Hand von gefertigten Prüfwerkstücken. Auch auf die Wechselwirkung zwischen Prozess und Maschine wird gesondert eingegangen. Dies ist insbesondere für das Schwingungsverhalten (Rattern) spanender Werkzeugmaschinen von Bedeutung. Für alle betrachteten Eigenschaften werden jeweils Methoden und Maßnahmen zur Beurteilung und zur Verbesserung des Werkzeugmaschinenverhaltens vorgestellt.

Der Inhalt dieses Bandes gliedert sich im Einzelnen wie folgt:

Nach einer kurzen Einleitung (*Kapitel 1*), welche allgemein die Hilfsmittel des Konstrukteurs umreißt, werden in *Kapitel 2* allgemeine Anforderungen an Gestelle und Gestellbauteile kurz erläutert.

Im folgenden *Kapitel 3* kann sich der Leser sehr eingehend über die Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei statischer, dynamischer und thermischer Belastung informieren. Heute wird im gesamten Konstruktions- und Entwicklungsprozess auf rechnergestützte Prozesse und leistungsfähige Berechnungsprogramme zurückgegriffen. Aus diesem Grund werden die mathematischen Grundlagen der Finite-Elemente-Methode erläutert und an Beispielen der Dimensionierung, Form- und Topologieoptimierung deren Anwendungsbereiche im Werkzeugmaschinenbau aufgezeigt. Auf gängige Werkstoffe für Gestellbauteile sowie die werkstoffgerechte Konstruktion wird abschließend gesondert eingegangen. Dabei werden auch die alternativen Werkstoffe Zementbeton, Reaktionsharzbeton und faserverstärkter Kunststoff behandelt.

Der Aufstellung und Fundamentierung von Werkzeugmaschinen ist *Kapitel 4* gewidmet. Zwar werden kleinere Maschinen häufig direkt auf dem Hallenboden oder auf Geschossdecken aufgestellt, mittlere und große, schwere Maschinen ohne ausreichende Eigensteifigkeit erfordern dagegen eine eigene Fundamentauslegung. Häufig sind auch schwingungsisolierte Aufstellungen notwendig. Es werden die Komponenten unterschiedlicher Maschinenaufstellungen gegenübergestellt und die Fundamentauslegung nach statischen und dynamischen Gesichtspunkten erörtert.

Neben der sorgfältigen Auslegung von Gestellbauteilen sind für die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmaschinen ebenso die Antriebselemente zur Erzeugung der Hauptarbeitsbewegungen bedeutungsvoll. Da die Elektrokonstruktion und mit ihr die Beschreibung elektromechanischer Antriebe Teil des Bandes 3 dieses Kompendiums sind, werden im *Kapitel 5* rein hydraulische Antriebselemente und -konzepte ausführlich behandelt.

Von zentraler Bedeutung für die Bearbeitungsgenauigkeit einer Werkzeugmaschine sind die im Kraftfluss liegenden Führungen, Lagerungen und

Vorschubsysteme. Diese werden sehr ausführlich in *Kapitel 6* behandelt. Nach Erläuterung der tribologischen Grundlagen wird zunächst die Funktion und Wirkungsweise hydrodynamischer Gleitführungen und Gleitlager vorgestellt, da diese Führungsprinzipien im Werkzeugmaschinenbau immer noch Verwendung finden. Ebenso werden hydrostatische Gleitführungen und Gleitlager betrachtet, wobei der Schwerpunkt auf die Auslegung und Gestaltung dieser Lagertypen gelegt und auch deren Einsatz in Präzisionsmaschinen beispielhaft aufgezeigt wird. Danach wird der Hochpräzisionsbearbeitung bzw. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung Rechnung getragen, indem die dafür wichtigen aerostatischen Lager und Führungen sowie elektromagnetische Lager behandelt werden. Entsprechend ihrer sehr großen Verbreitung und Bedeutung für die Praxis werden Wälzführungen und -lager ausführlich behandelt. Nach der Vorstellung der konstruktiven Gestaltung von Wälzführungen folgt die ausführliche Betrachtung des Einsatzes von Wälzlager in Spindel-Lager-Systemen. Neuartige Wälzlagerkonstruktionen für hochdrehende Hauptspindeln werden vorgestellt. Anhand zahlreicher Beispiele werden Konstruktionsprinzipien, Auslegungskriterien und die notwendigen Berechnungsverfahren erarbeitet. Als gebräuchliche Systeme zur Übertragung von Vorschubbewegungen in Linearachsen werden Kugelgewindetriebe und Rollengewindetriebe vorgestellt. Auf die wichtige Schmierung und Abdichtung der einzelnen Maschinenkomponenten wird in jedem Unterkapitel separat eingegangen. Das Kapitel 6 schließt mit möglichen Maßnahmen zum Schutz von Führungselementen und Beispielen für die Abdeckung von Führungsbahnen.

Die zur Realisierung von Verfahrbewegungen und zur Bearbeitung nötigen Maschinenkomponenten und Hauptantriebe von Werkzeugmaschinen werden auch heute noch oft durch den Einsatz von Getrieben vervollständigt. Daher werden dem Leser in *Kapitel 7* die wesentlichen Grundlagen und Gestaltungskriterien für gleichförmig und ungleichförmig übersetzende Getriebe vermittelt.

Nicht zuletzt die Forderung des modernen Werkzeugmaschinenbaus nach einer Verbesserung der Gebrauchseigenschaften hat dazu geführt, dem Industriedesign als Aufgabe im Entwicklungsprozess das eigenständige *Kapitel 8* zu widmen. Hier wird auf die Maschinenverkleidung, die ergonomische Gestaltung und Anordnung von Bedienelementen und die Stellung des Designprozesses in der Entwicklung eingegangen. Außerdem wird

detailliert auf gültige Richtlinien zur Maschinen-gestaltung eingegangen.

Nachdem alle wichtigen Aspekte bezüglich der Konstruktion und Berechnung von Werkzeugmaschinen behandelt wurden, wird in *Kapitel 9* ein Überblick über die zur Beurteilung von Werkzeugmaschinen erforderlichen Messgeräte und Messmethoden gegeben. Die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Vorgehensweisen bei der Durchführung der Messungen greifen auf diese Darstellung zurück.

Einen bedeutenden Einfluss auf die Maßhaltigkeit der auf Werkzeugmaschinen hergestellten Werkstücke haben die Abweichungen der Ist-Relativbewegung (bzw. der Ist-Position) zwischen Werkzeug und Werkstück von der vorgegebenen Soll-Relativbewegung (bzw. Soll-Position). Die Vorgehensweise zur messtechnischen Erfassung dieser geometrischen und kinematischen Abweichungen wird in *Kapitel 10* behandelt.

In *Kapitel 11* wird auf die Messtechniken und Auswertemethoden zur Untersuchung der Maschinenverformungen unter statischen Belastungen (Werkstückgewichtskräfte und Prozesskräfte) eingegangen.

Kapitel 12 beschäftigt sich mit der Messung der geometrischen und kinematischen Maschinenabweichungen auf Grund thermischer Verformungseinflüsse. Das thermische Verhalten ist, insbesondere vor dem Hintergrund ständig steigender Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten sowie Achsbeschleunigungen und der damit verbundenen Wärmeeinbringung in die Maschinenstruktur, ein zunehmend wichtiger Faktor für die erzielbaren Genauigkeiten von Werkzeugmaschinen. Dieser Entwicklung wird durch Einführung neuer Messverfahren zur einfachen Erfassung thermoelastischer Strukturverformungen an Werkzeugmaschinen Rechnung getragen. Außerdem wird auf sensorgestützte Korrekturmethode eingegangen.

Schwingungserscheinungen an Werkzeugmaschinen hängen meist mit dem dynamischen Nachgiebigkeitsverhalten der Maschinenstruktur zusammen. *Kapitel 13* behandelt diese Thematik ausführlich. Im Einzelnen wird auf die Untersuchung des dynamischen Verhaltens, die theoretischen Grundlagen bei der Messung, die Zusammenhänge bei der Entstehung von Ratterschwingungen und die Möglichkeiten zur Verbesserung des dynamischen Maschinenverhal-

tens durch geeignete Wahl der Prozessparameter eingegangen.

Das *Kapitel 14* zeigt indirekte Wege zur Erfassung der geometrischen und kinematischen Maschinenmerkmale an Hand von Bearbeitungstests auf. Hier wird die Güte der Maschine durch die maßliche Bewertung von Prüfwerkstücken bestimmt. Es werden die Vorgehensweise bei und die Bedeutung von Fähigkeitsuntersuchungen zur Abnahme von Sondermaschinen erläutert sowie eine hierzu erarbeitete Richtlinie vorgestellt.

In *Kapitel 15* wird abschließend auf das Geräuschverhalten von Werkzeugmaschinen, welches ein sehr wichtiges Abnahmekriterium darstellt, eingegangen. Nach einer Einführung in die Grundbegriffe der Akustik werden Möglichkeiten zur Geräuschmessung, -beurteilung und -analyse aufgezeigt und die aktuellen Messrichtlinien dargestellt. Außerdem wird auf die geräuscharme Maschinenkonstruktion, die im Hinblick auf eine

Humanisierung der Arbeitsplätze von zunehmender Bedeutung ist, eingegangen. Die verschiedenen Maschinengeräuschquellen werden beschrieben und es werden konkrete konstruktive Maßnahmen zur Geräuschminderung erläutert.

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. Simo Schmidt besonders danken.

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

Christian Brecher
Aachen, im Mai 2017

Inhalt

1	Einführung	3
2	Anforderungen und Bauformen	11
3	Strukturbauteile und -Baugruppen	19
3.1	Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei statischer Belastung	20
3.1.1	Statische Belastungen	20
3.1.2	Statische Kenngrößen	20
3.1.3	Kraftfluss- und Verformungsanalyse	22
3.1.4	Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung	23
3.1.4.1	Steifigkeiten stabförmiger Bauteile	23
3.1.4.2	Verrippungen	29
3.1.4.3	Krafteinleitung	33
3.1.4.4	Fügestellen	36
3.1.4.4.1	Anzahl und Anordnung der Schrauben im Flansch	36
3.1.4.4.2	Steifigkeit einzelner Schraubenverbindungen	37
3.1.4.4.3	Flanschgestaltung	41
3.1.5	Konstruktionsbeispiele	42
3.2	Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei dynamischer Belastung	42
3.2.1	Grundlagen des dynamischen Verhaltens	43
3.2.2	Dynamische Kenngrößen	45
3.2.3	Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung	45
3.2.3.1	Massen und Massenverteilung	48
3.2.3.2	Dämpfung in Gestellen	48
3.3	Auslegungs- und Gestaltungskriterien bei thermischer Belastung	51
3.3.1	Thermische Kenngrößen	51
3.3.2	Konstruktive Gesichtspunkte bei der Gestaltung	53
3.4	Berechnung und Optimierung von Gestellbauteilen	58
3.4.1	Berechnung von Gestellbauteilen	58
3.4.1.1	Einführung in die Finite-Elemente-Methode	59
3.4.1.2	Berechnung des statischen Verhaltens von Strukturbauteilen	62
3.4.1.2.1	Herleitung einer Elementsteifigkeitsmatrix	62
3.4.1.2.2	Überlagerung der Elementsteifigkeitsmatrizen zur Gesamtsteifigkeitsmatrix	64
3.4.1.3	Berechnung des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen	66
3.4.1.3.1	Modalanalyse	66
3.4.1.3.2	Berechnung des Frequenzgangs aus modalen Parametern	68
3.4.1.3.3	Statische Kondensation	68
3.4.1.4	Berechnung der Kinematik von Werkzeugmaschinen	70
3.4.1.4.1	Flexible Mehrkörpersimulation	71
3.4.1.5	Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Strukturdynamik und Maschinensteuerung	72
3.4.1.6	Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Strukturdynamik und Bearbeitungsprozess	72
3.4.1.7	Berechnung des thermischen Verhaltens	74
3.4.1.8	Berechnungsbeispiele	77
3.4.1.8.1	Berechnung des statischen Verhaltens von Gestellbauteilen	77
3.4.1.8.2	Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gestellbauteilen	78

3.4.1.8.3	Berechnung der Wechselwirkung zwischen Regelung und Struktur­dynamik	80
3.4.1.8.4	Berechnung des thermischen Verhaltens von Gestellbauteilen	82
3.4.1.9	Rechengenauigkeit und Fehlermöglichkeiten	83
3.4.2	Optimierung des mechanischen Bauteilverhaltens	84
3.4.2.1	Grundlagen der Optimierung	84
3.4.2.2	Strukturoptimierung im Werkzeugmaschinenbau	87
3.4.2.3	Dimensionierung	88
3.4.2.3.1	Massen-Steifigkeitsoptimierung von Bauteilen mittels Anpassung von Wandstärken	89
3.4.2.3.2	Optimierung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen	91
3.4.2.4	Formoptimierung	94
3.4.2.4.1	Spannungsreduktion an offenen Ausrundungen mittels Kerb­spannungslehre	95
3.4.2.4.2	Allgemeiner Ansatz zur Formoptimierung von Bauteilen mittels Basis­formen	96
3.4.2.4.3	Formoptimierung von Bauteilen mit Berücksichtigung geometrischer Restriktionen	98
3.4.2.5	Topologieoptimierung	98
3.4.2.5.1	Zweidimensionale Steifigkeitsoptimierung von Bauteilquerschnitten ...	100
3.4.2.5.2	Topologieoptimierung umfangreicher dreidimensionaler Bauteile	101
3.4.2.6	Rücktransformation von Designvorschlägen in die CAD-Umgebung	101
3.5	Werkstoffgerechte Konstruktion	103
3.5.1	Materialeigenschaften von Stahl- und Gusseisenwerkstoffen	104
3.5.2	Konstruktion mit Stahlwerkstoffen	106
3.5.2.1	Schweißkonstruktionen	106
3.5.2.2	Konstruktion mit Gusseisen	109
3.5.3	Materialeigenschaften von Betonen	112
3.5.3.1	Zementbeton	112
3.5.3.2	Reaktionsharzbeton	113
3.5.4	Konstruktion mit Betonwerkstoffen	114
3.5.4.1	Schalung von Betonbauteilen	115
3.5.4.2	Verbindungstechniken zwischen Beton und Stahl	117
3.5.5	Faserverbundkunststoffe	119
3.5.5.1	Werkstoffeigenschaften	119
3.5.5.2	Einsatzkriterien und -möglichkeiten für hochbelastete Maschinen- elemente aus faserverstärkten Kunststoffen	122
3.5.5.3	Konstruktion und Fertigung von FVK-Bauteilen, Anwendungsbeispiele ..	122
3.5.5.3.1	Krafteinleitungen	122
3.5.5.3.2	Fertigungsverfahren	124
3.5.5.3.3	Verarbeitung von duroplastischen Kunststoffen	124
3.5.5.3.4	Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen	125
3.5.5.3.5	Anwendungsbeispiele	126
	Abkürzungsverzeichnis	128
	Formelzeichenverzeichnis	129
	Literaturverzeichnis	131
4	Aufstellung und Fundamentierung von Werkzeugmaschinen	137
4.1	Komponenten der Maschinenaufstellung	140
4.1.1	Aufstellelemente	140
4.1.2	Fundament	141
4.1.3	Baugrund	142
4.2	Fundamentauslegung unter statischen Gesichtspunkten	144

4.3	Fundamentalauslegung unter dynamischen Gesichtspunkten	147
4.3.1	Beurteilungskriterien für Erschütterungen	149
4.3.2	Auslegung aktiver Schwingungsisolierungen	151
4.3.3	Auslegung passiver Schwingungsisolierungen	153
	Formelzeichenverzeichnis	154
	Literaturverzeichnis	154
5	Hydraulik	157
5.1	Grundlagen der Hydraulik	158
5.1.1	Grundgleichungen für den Betrieb einer Hydraulikmaschine	159
5.1.2	Pumpenkennlinie	161
5.1.3	Begriff der Viskosität	162
5.2	Hydraulische Maschinen	163
5.2.1	Zahnrad- und Zahnringpumpe	163
5.2.2	Flügelzellenpumpe	166
5.2.3	Kolbenverdrängereinheiten	167
5.2.3.1	Axialkolbenpumpe	168
5.2.3.2	Radialkolbenpumpe	169
5.3	Hydraulische Antriebe	171
5.3.1	Lineare hydraulische Antriebe	171
5.3.2	Drehzahlverstellung von Hydraulikmaschinen	174
5.3.2.1	Drehzahländerung mit Pumpen- und Motorvolumenverstellung	174
5.3.2.1.1	Primär- bzw. Pumpenverstellung	174
5.3.2.1.2	Sekundär- bzw. Motorverstellung	175
5.3.2.2	Motordrehzahlverstellung durch Drosselung des Volumenstromes	176
5.4	Schaltungen	179
5.4.1	Steuerungsarten	179
5.4.1.1	Widerstandssteuerung	180
5.4.1.2	Verdrängersteuerung	180
5.4.2	Regelungsarten	182
5.4.2.1	Zweipunktregelung	182
5.4.2.2	Bypass-Regelung	182
5.4.2.3	Druck- und Förderstromregelung mittels Schwenkwinkelverstellung	182
5.4.2.4	Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter	183
5.5	Ventile	183
5.5.1	Ventilfunktionen und deren Wirkprinzipien	183
5.5.2	Wegeventile	185
5.5.2.1	Unstetige Ventile	185
5.5.2.2	Stetige Ventile	187
5.5.2.2.1	Funktionsweise des Servoventils	188
5.5.2.2.2	Funktionsweise des Proportionalregelventils	188
5.5.2.2.3	Funktionsweise des Piezoventils	189
5.5.3	Druckventile	190
5.5.4	Stromventile	192
5.5.5	Sperrventile	194
5.6	Druckflüssigkeitsspeicher	194
5.7	Zylinder	196
5.8	Filter	198

5.9	Kompakt-Pumpenaggregate	199
	Abkürzungsverzeichnis	200
	Formelzeichenverzeichnis	200
	Literaturverzeichnis	202
6	Führungen, Lagerungen und Vorschubsysteme	205
6.1	Grundlagen der Tribologie	211
6.1.1	Hydrodynamische Druckbildung	211
6.1.2	Reibungsarten	216
6.1.3	Stribeck-Kurve	216
6.1.4	Stick-Slip-Effekt	218
6.2	Hydrodynamische Gleitführungen und Gleitlager	218
6.2.1	Hydrodynamische Gleitführungen	219
6.2.1.1	Werkstoffe für Gleitführungen	219
6.2.1.2	Tribologische Eigenschaften	222
6.2.1.3	Bauformen	226
6.2.1.4	Klemmeinrichtungen	231
6.2.1.5	Kompensation von Führungsfehlern	234
6.2.1.6	Statisches und dynamisches Verhalten	234
6.2.2	Hydrodynamische Gleitlager	235
6.2.2.1	Druckaufbau und Anlaufvorgang	236
6.2.2.2	Bauformen	237
6.2.2.3	Hydrodynamische Spindel-Lager-Systeme in Werkzeugmaschinen	239
6.2.2.4	Berechnung von Mehrflächenlagern	240
6.3	Hydrostatische Gleitführungen und Gleitlager	243
6.3.1	Grundlagen, Funktionsprinzip und Begriffe	243
6.3.1.1	Ölversorgungssysteme	244
6.3.1.2	Lagerberechnung	249
6.3.1.2.1	Ölversorgungssystem „eine Pumpe pro Tasche“ ohne Umgriff	250
6.3.1.2.2	Ölversorgungssystem „Pumpe mit Vordrosseln“ ohne Umgriff	251
6.3.1.2.3	Ölversorgungssystem „eine Pumpe pro Tasche“ mit Umgriff	253
6.3.1.2.4	Ölversorgungssystem „Pumpe mit Vordrosseln“ mit Umgriff	254
6.3.1.2.5	Berechnungsbeispiel	257
6.3.1.3	Dämpfung an einer hydrostatischen Tasche	258
6.3.1.4	Energiebedarf und hydraulischer Kreis	259
6.3.2	Hydrostatische Linearführungen	261
6.3.2.1	Konstruktionsmerkmale und Ausführungsformen	261
6.3.2.2	Anwendungsbeispiele	263
6.3.3	Hydrostatische Lager	265
6.3.3.1	Bauformen	265
6.3.3.2	Druckaufbau	266
6.3.3.3	Lager mit strukturierten Lageroberflächen	267
6.3.3.4	Lagerauslegung	269
6.3.3.5	Abdichtung	273
6.3.4	Hydrostatische Spindel-Lager-Systeme	274
6.3.5	Kombinierte hydrostatische Radial-Axiallager	274
6.3.6	Hydrostatische Spindel-Mutter-Systeme	275
6.4	Aerostatische Gleitführungen und Gleitlager	278
6.4.1	Grundlagen, Funktionsprinzip und Begriffe	278
6.4.2	Auslegung und Berechnung	280

6.4.3	Anwendungsbeispiele.....	285
6.4.3.1	Aerostatisch gelagerte Rundtische.....	285
6.4.3.2	Aerostatisch gelagerte Spindel-Lager-Systeme.....	286
6.4.3.3	Aerostatische Linearführung.....	288
6.5	Elektromagnetische Lager.....	289
6.5.1	Grundlagen, Funktionsprinzip und Begriffe.....	289
6.5.2	Anwendungsbeispiel.....	290
6.6	Wälzführungen und Wälzlager.....	291
6.6.1	Wälzführungen.....	291
6.6.1.1	Bauformen der Wälzführungen.....	291
6.6.1.2	Längsführung.....	291
6.6.1.3	Profilschienenführung mit Rollen oder Kugeln.....	292
6.6.1.3.1	Dichtungstechnik und Schmierung von Profilschienenführungen.....	298
6.6.1.3.2	Integrierte Wegmesssysteme.....	300
6.6.1.3.3	Klemm- und Bremsenlemente.....	301
6.6.1.4	Rollenumlaufschuh.....	302
6.6.1.5	Linear-Kugellager.....	303
6.6.1.6	Laufrollenführung.....	303
6.6.2	Wälzlager für Hauptspindelanwendungen.....	303
6.6.2.1	Lagerbauformen und ihre Eigenschaften.....	303
6.6.2.2	Gestaltung der Lagerumbauteile.....	307
6.6.2.3	Lagerspiel und Steifigkeit.....	308
6.6.2.3.1	Lagerspiel.....	308
6.6.2.3.2	Steifigkeit und Vorspannung.....	310
6.6.2.3.3	Steifigkeitskennlinien ausgewählter Lager.....	315
6.6.2.4	Betriebsverhalten.....	315
6.6.2.4.1	Kinematisches Verhalten.....	316
6.6.2.4.2	Lagerreibung.....	317
6.6.2.4.3	Veränderung der Kinematik eines Spindellagers im Betrieb.....	318
6.6.2.4.4	Schlupf- und Beschleunigungsverhalten.....	319
6.6.2.5	Dämpfung in Wälzlagern.....	320
6.6.2.6	Wälzlager als Schwingungserreger.....	322
6.6.2.7	Berechnung der Wälzlagerlebensdauer.....	322
6.6.2.8	Schmierung von Spindellagern.....	329
6.6.2.8.1	Schmierungsarten.....	329
6.6.2.8.2	Schmierstoffzuführsysteme.....	330
6.6.2.9	Dichtungen für Lager und rotierende Maschinenelemente.....	336
6.6.2.9.1	Berührende Dichtungen.....	338
6.6.2.9.2	Berührungsfreie Dichtungen.....	338
6.6.3	Wälzgelagerte Hauptspindeln.....	346
6.6.3.1	Aufbau und Verhalten der Lagerung.....	347
6.6.3.1.1	Lageranordnung und -anstellung.....	347
6.6.3.1.2	Gestaltung der Loslagerung.....	351
6.6.3.1.3	Thermisches und kinematisches Verhalten.....	352
6.6.3.2	Systemverhalten.....	354
6.6.3.2.1	Thermisches und kinematisches Verhalten.....	354
6.6.3.2.2	Statisches Verhalten.....	361
6.6.3.2.3	Dynamisches Verhalten.....	365
6.6.3.3	Berechnung des Systemverhaltens.....	368
6.6.3.4	Maßnahmen zur Optimierung des Betriebs- und Systemverhaltens.....	372
6.6.3.4.1	Statisches und dynamisches Systemverhalten.....	372
6.6.3.4.2	Modifizierte Spindellager für hohe Drehzahlen.....	376
6.6.3.4.3	Modifizierte Radiallager für hohe Drehzahlen.....	380
6.6.3.5	Drehdurchführungen.....	381
6.6.4	Kugelgewindetriebe.....	385
6.6.4.1	Grundlagen, Funktionsprinzip und Begriffe.....	385
6.6.4.2	Auslegung und Berechnung.....	387

6.6.4.2.1	Tragfähigkeit und Lebensdauer von Kugelgewindetrieben	390
6.6.4.3	Dichtung und Schmierung	391
6.6.5	Rollengewindetriebe	392
6.6.5.1	Planetenrollengewindtrieb	392
6.6.5.2	Rollengewindtrieb mit Rollenrückführung	393
6.7	Abdeckung von Führungselementen	394
	Abkürzungsverzeichnis	398
	Formelzeichenverzeichnis	398
	Literaturverzeichnis	402
7	Getriebe	407
7.1	Gleichförmig übersetzende Getriebe	408
7.1.1	Getriebe mit stufenweise verstellbaren Abtriebsdrehzahlen	408
7.1.1.1	Prinzipielle Bauformen von Schaltgetrieben	409
7.1.1.2	Grundlagen zur Berechnung von Stufengetrieben	411
7.1.2	Getriebe mit stufenlos verstellbaren Abtriebsdrehzahlen	414
7.1.2.1	Elektrische Getriebe	414
7.1.2.2	Hydraulische Getriebe	415
7.1.2.3	Mechanische Getriebe	416
7.1.3	Kombination von gestuften Getrieben mit stufenlosen Antriebsmotoren	419
7.1.4	Anwendungsbeispiele für gleichförmig übersetzende Getriebe	420
7.2	Ungleichförmig übersetzende Getriebe	420
7.2.1	Schwingende Kurbelschleife	421
7.2.2	Schubkurbel	421
7.2.3	Kniehebel	423
7.2.4	Kurvenscheiben	423
7.2.5	Unrunde Zahnräder	425
7.2.6	Gleitkeil- und Zykloidgetriebe	426
	Formelzeichenverzeichnis	426
	Literaturverzeichnis	427
8	Industriedesign und Richtlinien zur Maschinengestaltung	431
8.1	Industriedesign	432
8.1.1	Maschinenverkleidung	432
8.1.1.1	Corporate Design	433
8.1.1.2	Gestaltungsrichtlinien	433
8.1.2	Ergonomie	435
8.1.3	Entwicklungsabfolge des Designprozesses	436
8.2	Richtlinien zur Maschinengestaltung am Beispiel der EG-Maschinenrichtlinie	437
8.2.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	438
8.2.1.1	Begriffserklärungen im Zusammenhang mit der Maschinenrichtlinie	438
8.2.1.2	Das Produkthaftungsgesetz	438
8.2.1.3	Vorrangprinzip von Spezialrichtlinien	439
8.2.1.4	Konformitätsvermutung	439
8.2.1.5	Das CE-Kennzeichen	439
8.2.1.6	Umweltrichtlinien	440

8.2.2	Übersicht über die EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG	440
8.2.2.1	Geltungsbereich der Maschinenrichtlinie.....	440
8.2.2.2	Herstellerpflichten vor dem Inverkehrbringen von Maschinen	441
8.2.2.3	Herstellerrelevante Anhänge zur Maschinenrichtlinie.....	441
8.2.3	Durchführung der Risikobeurteilung	443
8.2.3.1	Festlegung der Maschinengrenzen.....	443
8.2.3.2	Identifizierung von Gefährdungen	444
8.2.3.3	Risikoeinschätzung.....	444
8.2.3.4	Risikobewertung	447
8.2.3.5	Risikominderung	448
8.2.3.6	Ergebnisdokumentation.....	449
	Abkürzungsverzeichnis	449
	Literaturverzeichnis	450
9	Methoden und Messgeräte zur Erfassung der Maschineneigenschaften	453
9.1	Bedeutung der Maschinenbeurteilung und -abnahme	454
9.2	Anforderungen an die Messverfahren und Vorgehensweise bei der Durchführung	454
9.3	Direkte Erfassung der Maschineneigenschaften	457
9.4	Indirekte Erfassung der Maschineneigenschaften	458
9.5	Normen, Normungsgremien	459
9.6	Methodische Grundlagen	459
9.6.1	Beschreibung linearer, zeitinvarianter Systeme (LTI - Systeme).....	459
9.6.1.1	Faltung und Korrelation	459
9.6.1.2	Laplace-Transformation.....	460
9.6.1.3	Fourier-Reihe und Fourier-Integral	461
9.6.2	Behandlung diskreter Signale	463
9.6.2.1	Analog/Digital-Wandlung	463
9.6.2.2	Shannon-Theorem und Aliasing	464
9.6.2.3	Diskrete Fourier-Transformation	465
9.6.2.4	Fast Fourier-Transformation.....	470
9.7	Geräte zur Messung von Wegen	471
9.7.1	Mechanische Wegmessgeräte	471
9.7.2	Potentiometer-Weggeber.....	472
9.7.3	Kapazitive Weggeber	473
9.7.4	Wirbelstrom-Weggeber	474
9.7.5	Induktive Weggeber	474
9.7.6	Optische Wegmessgeräte	477
9.7.6.1	Laser-Interferometer	477
9.7.6.2	Positionempfindliche Dioden	482
9.7.6.3	Triangulationssensor	483
9.7.6.4	Konfokale Sensortechnik	483
9.7.6.5	Das Tracking-Interferometer	484
9.7.6.6	Inkrementeller Linearmaßstab	486
9.7.6.7	Photogrammetrie	487
9.8	Geräte zur Messung von Winkeln	488
9.8.1	Elektronische Neigungswaage	488

9.8.2	Optische Winkelgeber	488
9.8.2.1	Autokollimator	488
9.8.2.2	Inkrementeller Winkelschrittgeber	490
9.9	Geräte zur Messung von Geschwindigkeiten	490
9.9.1	Elektrodynamischer Geber	490
9.9.2	Laser-Doppler-Vibrometer	491
9.10	Geräte zur Messung von Beschleunigungen	492
9.11	Geräte zur Messung von Kräften	494
9.11.1	Dehnungsmessstreifen	494
9.11.2	Piezoquarze	496
9.12	Sensoren zur Messung von Temperaturen	501
9.12.1	Berührende Temperaturmessung	501
9.12.2	Berührungslose Temperaturmessung	503
9.13	Strom- und Leistungsmessung	504
	Abkürzungsverzeichnis	505
	Formelzeichenverzeichnis	506
	Literaturverzeichnis	507
10	Geometrisches und kinematisches Verhalten von Werkzeugmaschinen	511
10.1	Geometrische Abweichungen	513
10.1.1	Allgemeine Beschreibung der systematischen Abweichungen	513
10.1.1.1	Bewegung in einer Achse	513
10.1.1.2	Bewegung in mehreren Achsen	515
10.1.2	Statistische Beschreibung der Abweichungen	519
10.1.2.1	Statistische Auswertung	519
10.1.2.2	Betrachtungen der Messunsicherheit	521
10.1.2.3	Bestimmung der Werkstückmaßfehler aus den geometrischen Maschinenabweichungen	525
10.1.3	Messverfahren zur Ermittlung der geometrischen Maschinen- eigenschaften	526
10.1.3.1	Allgemeine Zusammenhänge zur messtechnischen Erfassung der Maschineneigenschaften	528
10.1.3.2	Vermessung von Linearachsen	530
10.1.3.3	Vermessung der Tischgeradheit bzw. -ebenheit	539
10.1.3.4	Vermessung von Rotationsachsen	542
10.1.3.5	Volumetrische Vermessung von geometrischen Fehlern	551
10.2	Kinematische Abweichungen	554
10.2.1	Messverfahren zur Ermittlung der kinematischen Maschinen- eigenschaften	554
10.2.1.1	Zeitbasismessungen mit Raumfrequenzanalyse	554
10.2.1.2	Vorschubfehlermessung an einer Drehmaschine (rotatorisch- translatorische Bewegungen)	556
10.2.1.3	Dreh- und Vorschubfehlermessung an einer Wälzfräsmaschine (rotatorisch-rotatorisch-translatorische Bewegungen)	557
10.2.1.4	Messung einer Zweiachsen- Interpolation (translatorisch- translatorische Bewegungen)	559
10.2.1.5	Kreisformtest	559
10.2.1.6	Mehrachstests nach ISO 10791-6	560
	Abkürzungsverzeichnis	563

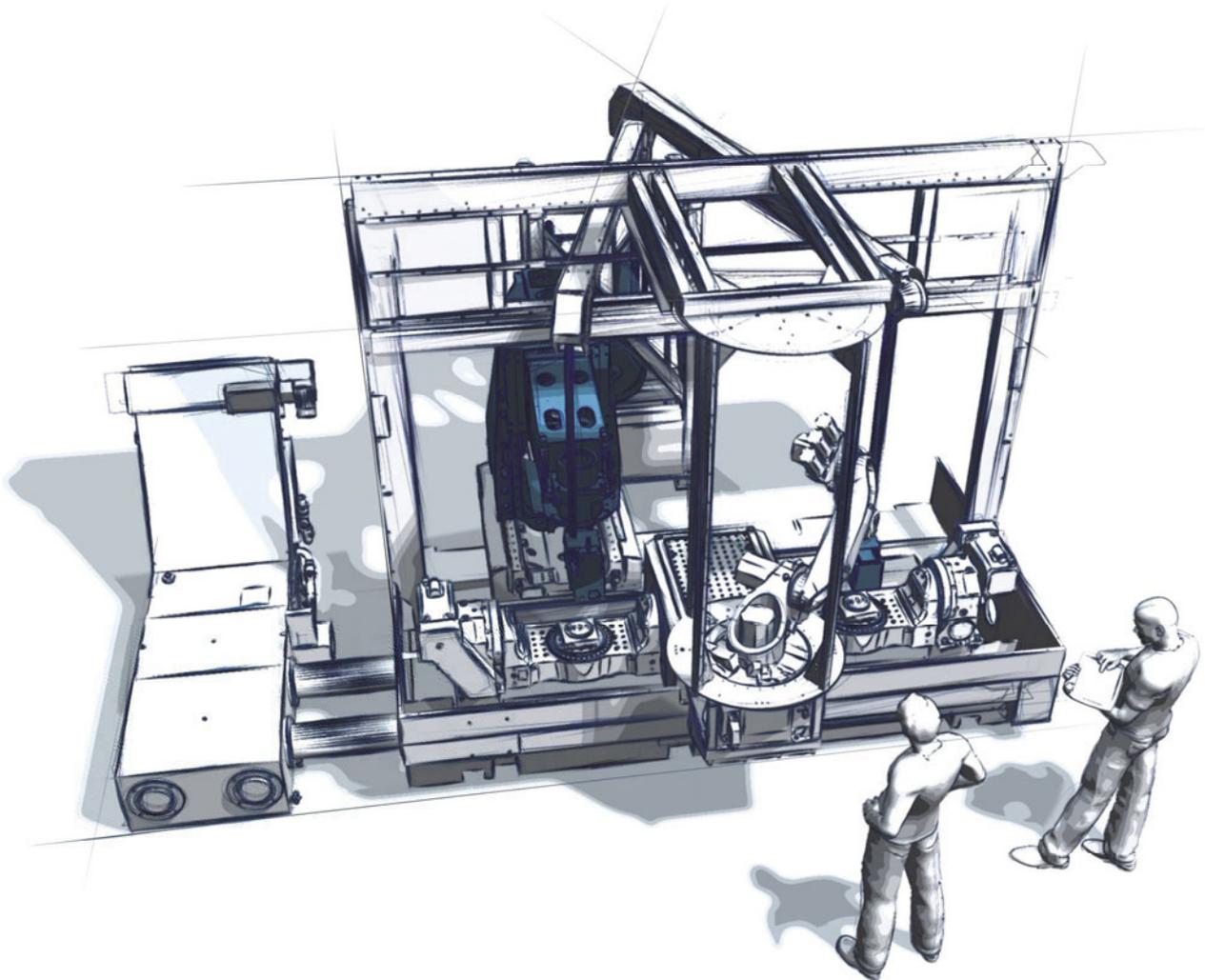
Formelzeichenverzeichnis.....	563
Literaturverzeichnis.....	563
11 Statisches Verhalten von Werkzeugmaschinen.....	567
11.1 Messtechnische Erfassung des Werkstückgewichtseinflusses.....	568
11.2 Messtechnische Erfassung des statischen Prozesslasteinflusses.....	570
11.3 Schwachstellenanalyse statisch belasteter Maschinenbauteile.....	572
11.4 Quasi-statische Last-Verformungsanalyse.....	572
Formelzeichenverzeichnis.....	576
Literaturverzeichnis.....	576
12 Thermo-elastisches Verhalten von Werkzeugmaschinen.....	579
12.1 Thermische Einflüsse auf Werkzeugmaschinen.....	580
12.2 Messtechnische Untersuchung des thermo-elastischen Verformungsverhaltens.....	582
12.2.1 Erfassung thermo-elastischer Verlagerungen an der Zerspanstelle.....	582
12.2.2 Erfassung thermo-elastischer Strukturverformungen.....	585
12.3 Temperaturentwicklung und Verformungsverhalten.....	586
12.3.1 Temperaturentwicklung und Verformungsverhalten an der Zerspanstelle durch innere Wärmequellen.....	586
12.3.2 Temperaturentwicklung und Verformungsverhalten an der Zerspanstelle durch externe Wärmequellen.....	591
12.4 Korrektur und Kompensation thermo-elastischer Verlagerungen.....	591
Abkürzungsverzeichnis.....	593
Formelzeichenverzeichnis.....	593
Literaturverzeichnis.....	594
13 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen.....	597
13.1 Schwingungsarten und -ursachen.....	598
13.2 Frequenzgangermittlung.....	601
13.2.1 H1, H2-Schätzungen.....	602
13.2.2 Kohärenz.....	603
13.2.3 Testsignal- und Erregerarten.....	604
13.2.3.1 Anregungsformen.....	604
13.2.3.2 Erregerarten.....	605
13.2.4 Vorschrift zur FRF-Messung.....	611
13.2.5 Stand der Technik der Maschinennachgiebigkeiten.....	613
13.3 Experimentelle Modalanalyse.....	620
13.3.1 Bestimmung der Dämpfung bei ausgeprägtem Einmassen- schwingerverhalten.....	621
13.3.1.1 Wurzel-2-Methode.....	621
13.3.1.2 Abklingkurve.....	623
13.3.1.3 SIMO und MIMO-Identifikationsverfahren.....	624
13.4 Vorgehensweise zur Identifikation lokaler Dämpfungseigenschaften ..	628

13.5	Dynamisches Maschinenverhalten bei der Zerspanung mit definierter Schneidengeometrie	631
13.5.1	Wirkungskreis bei der regenerativen Krafrückkopplung span- nender Werkzeugmaschinen	631
13.5.2	Selbsterregte Schwingungen durch Lagekopplung	638
13.5.3	Experimentelle Beurteilung des statischen und dynamischen Maschinenverhaltens während der Bearbeitung	640
13.5.3.1	Verfahren zur Bestimmung der Grenzspanleistung	640
13.5.3.2	Praktisches Beispiel für eine rationelle Vorgehensweise zur experimentellen Bestimmung der statischen Maschinenverformung und der Grenzspanleistung	642
13.5.4	Berechnung des Stabilitätsverhaltens mithilfe gemessener Nachgiebigkeitsfrequenzgänge	643
13.5.4.1	Grundlagen der simulativen Stabilitätsprognose für den allgemeinen Prozessanwendungsfall	643
13.5.4.2	Berechnung der Prozessstabilität im Frequenzbereich	651
13.5.4.3	Simulation der Prozessstabilität im Zeitbereich	658
13.6	Fremderregte Schwingungen bei der Zerspanung mit definierter Schneidengeometrie	668
13.6.1	Maß - und Formabweichungen beim Ausspindeln von Bohrungen durch das dynamische Nachgiebigkeitsverhalten	668
13.6.1.1	Bohrungsmaß- und Bohrungsformabweichungen durch den Schnittkrafteinfluss	668
13.6.1.2	Bohrungsmaß- und Bohrungsformabweichungen durch Unwuchtkräfte	676
13.7	Prozessstabilität bei der Zerspanung mit undefinierter Schneiden- geometrie (Schleifen)	677
13.7.1	Beschreibung des Regenerativeffektes bei der Zerspanung mit undefinierter Schneidengeometrie	677
13.7.2	Systemnachgiebigkeitsverhalten Schleifmaschine-Schleif- scheibe-Werkstück	678
13.7.3	Geometrie dynamischer Eingriffsverhältnisse beim Schleifen	680
13.7.4	Ermittlung der Übergangs- und Abhebefrequenz	682
13.7.5	Darstellung des dynamischen Zeitspannungsvolumens in der komplexen Ebene	684
13.7.6	Wellenbildung auf dem Werkstück	687
13.7.7	Grenzphasenkurve für werkstückseitiges Rattern	689
13.7.8	Wellenbildung auf der Schleifscheibe	692
13.7.9	Grenzphasenkurve für das schleifscheibenseitige Rattern	693
13.7.10	Grenzphasenbeziehung für den Längsschleifprozess	694
13.7.11	Grenzphasenbeziehung für das spitzenlose Durchlaufschleifen ...	696
13.8	Maßnahmen zur Steigerung der Prozessstabilität	698
13.8.1	Einflussfaktoren auf das Ratterverhalten	698
13.8.2	Konstruktive Maßnahmen	699
13.8.3	Dynamische Zusatzsysteme	702
13.8.3.1	Übersicht dynamischer Zusatzsysteme	702
13.8.3.2	Passive Zusatzsysteme	704
13.8.3.3	Aktive Zusatzsysteme	711

13.8.4	Prozesseitige Maßnahmen.....	716
13.8.4.1	Optimierung der Prozessparameter.....	716
13.8.4.2	Werkzeuge mit ungleicher Teilung.....	716
13.8.4.3	Drehzahlvariation.....	717
13.8.4.4	Besonderheiten beim Schleifen.....	718
	Formelzeichenverzeichnis.....	720
	Literaturverzeichnis.....	722
14	Maschinenabnahme mit Prüfwerkstücken.....	727
14.1	Abnahme- und Prüfwerkstücke.....	729
14.1.1	Prüfwerkstücke zur Ermittlung der Arbeits- und Positionsge- nauigkeit.....	730
14.1.2	Prüfwerkstücke für Maschinen zur Hochgeschwindigkeits- und Mikrobearbeitung.....	730
14.2	Methoden zur Durchführung von Fähigkeitsuntersuchungen.....	732
14.2.1	Grundlagen und Vorgehen.....	733
14.2.2	Einflussfaktoren.....	735
14.2.3	Messmittel zur Ermittlung der Bauteilqualität.....	737
14.2.4	Statistische Methoden.....	739
14.2.5	Vereinheitliche Abnahmerichtlinie VDMA 8669.....	740
	Abkürzungsverzeichnis.....	742
	Formelzeichenverzeichnis.....	743
	Literaturverzeichnis.....	743
15	Geräuschverhalten von Werkzeugmaschinen.....	747
15.1	Grundbegriffe der Akustik.....	748
15.1.1	Schallkennwerte.....	748
15.1.2	Spektrale Zusammensetzung des Schalls.....	750
15.2	Analyse und Bewertung von Geräuschen.....	750
15.2.1	Zeitbewertung.....	750
15.2.2	Frequenzbewertung.....	751
15.2.3	Beurteilung zeitlich schwankender Geräusche.....	752
15.3	Schallmesstechnik zur Ermittlung der Geräuschemissionen von Maschinen.....	753
15.3.1	Analysemesstechnik.....	753
15.3.2	Geräuschmessungen nach DIN 45635.....	754
15.3.3	Schalldruckmessung.....	756
15.3.4	Schallintensitätsmessung.....	757
15.3.5	Akustische Kamera.....	760
15.4	Ortung von Schallanteilen und Rückschlüsse auf die Geräusch- anregung bei Maschinen.....	761
15.4.1	Rundummessung im Fernfeld.....	761
15.4.2	Rundummessung im Nahfeld.....	761
15.4.3	Messung des Körperschalls.....	762
15.4.4	Ermittlung von Schallanteilen.....	763

15.4.5	Schmalbandanalysen.....	763
15.4.6	Kohärenzanalysen	764
15.5	Beurteilung des Geräuschverhaltens von Werkzeugmaschinen	765
15.6	Gehörgerechte Geräuschbeurteilung.....	770
15.6.1	Lautstärke und Lautheit.....	771
15.6.2	Tonalität und Tonhaltigkeit	771
15.6.3	Schärfe	771
15.6.4	Schwankungsstärke und Rauigkeit	771
15.6.5	Anwendbarkeit psychoakustischer Kenngrößen	772
15.6.6	Messtechnische Realisierung der gehörgerechten Geräusch- beurteilung	773
15.7	Geräuscharme Maschinenkonstruktion	773
15.7.1	Grundlagen	773
15.7.2	Beispiele für Geräuschminderung.....	776
15.7.2.1	Maschinentechnische Aspekte.....	777
15.7.2.2	Prozesstechnische Aspekte	783
	Abkürzungsverzeichnis	783
	Formelzeichenverzeichnis	783
	Literaturverzeichnis	784
16	 Serviceteil	787

Kapitel 1



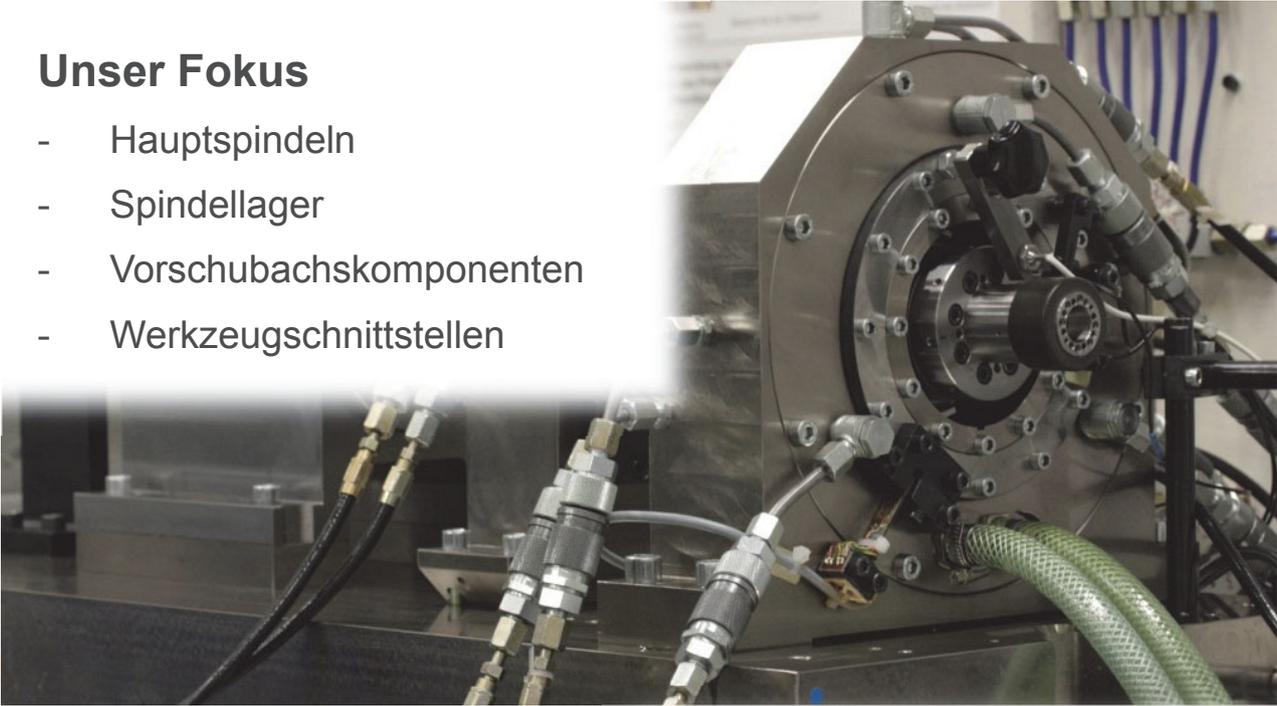
Einführung

Ich danke meinen Mitarbeitern Dr.-Ing. Marcel Fey und Dipl.-Ing. Simo Schmidt für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.

Maschinenelemente

Unser Fokus

- Hauptspindeln
- Spindellager
- Vorschubachskomponenten
- Werkzeugschnittstellen



Unsere Leistungen

- Auslegung und Berechnung
- Prüfstandsbaue und -betrieb
- Beratung
- Software



Einführung

Abkürzungsverzeichnis – 7

Electronic Supplementary Material The online version of this chapter (DOI:10.1007/978-3-662-46567-7_1) contains supplementary material, which is available to authorized users.

Die Arbeitsgenauigkeit, die Leistungsfähigkeit und das Umweltverhalten einer Produktionseinrichtung beeinflussen wesentlich die Qualität der herzustellenden Produkte sowie die Einsatzbreite der Maschine für eine wirtschaftliche Fertigung.

Für den Konstrukteur ist relevant, die Eigenschaften der Maschine entsprechend den gestellten Anforderungen und den zu erwartenden Betriebsbedingungen zu garantieren. Die Möglichkeit, das Verhalten der Maschine bereits im Konstruktionsstadium vorausbestimmen zu können, ist für die Dauer und die Kosten der Entwicklungsphase von ausschlaggebender Bedeutung.

Der Konstruktionsablauf ist in Bild 1.1 schematisch in den Entwicklungsprozess eingebettet dargestellt. Die einzelnen Phasen sind – ausgehend von vorhandenen Ideen – die Erstellung des Lastenheftes, der Entwurf des Maschinenkonzepts, die Gestaltung und Berechnung sowie die Detaillierung und Bereitstellung der Fertigungsunterlagen. Für die einzelnen Phasen stehen unterschiedliche Hilfsmittel zur Verfügung. Im Bereich „Gestaltung und Berechnung“ werden folgende Hilfsmittel genutzt:

- Software und Analyseverfahren für die Berechnung und Optimierung des Verhaltens von Maschinenbauteilen und von gesamten Maschinen (► s. Kap. 3 – Kap. 7),
- Mess- und Analyseverfahren zur Bestimmung des realen Maschinenverhaltens (► s. Kap. 9),
- Kataloge als Nachschlagewerke zur schnellen und einfachen Grobauslegung einer der Aufgabenstellung optimal angepassten Konstruktion,
- Maßstäbe zur Beurteilung der erreichten Maschineneigenschaften (► s. Kap. 8, Kap. 10 – 15).

Je nach Art und Umfang der zu bearbeitenden Aufgabenstellung greifen Konstruktions- und Berechnungsingenieure heute sowohl für die Bearbeitung alltäglicher Routinetätigkeiten als auch für umfangreiche Berechnungsaufgaben auf leistungsstarke PCs zurück. Zusätzlich werden die am Werkzeugma-

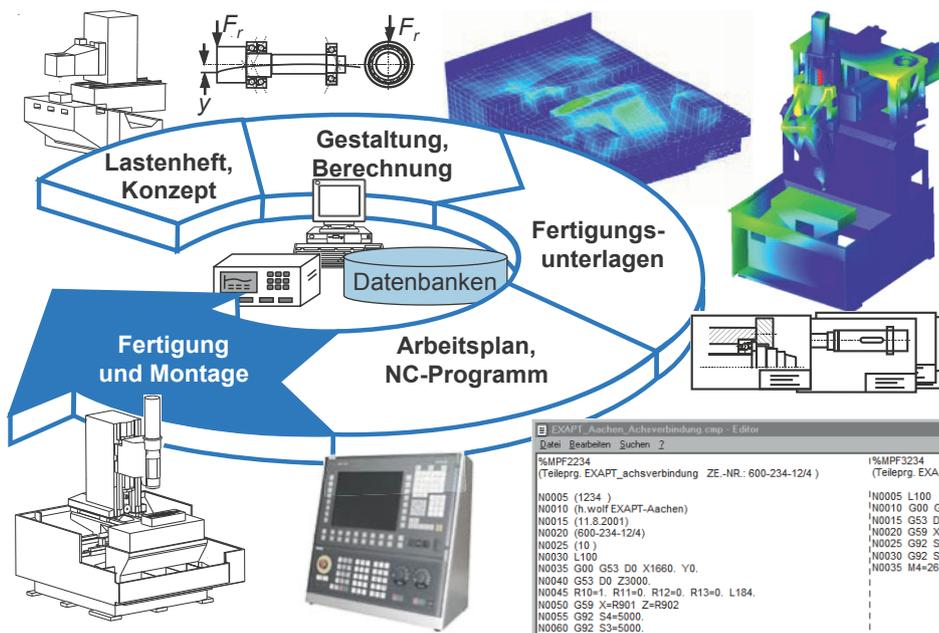
schinenlabor (WZL) der RWTH Aachen aus vielen Maschinenuntersuchungen aufbereiteten Messergebnisse dem Konstrukteur als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt. Die Daten repräsentieren den Stand der Technik.

Relevante Kriterien zur Beurteilung einer Werkzeugmaschine sind in Bild 1.2 in den Zeilen der Matrix eingetragen. Die Arbeitsgenauigkeit und Leistungsfähigkeit werden im Wesentlichen durch die bekannten Kenngrößen der Kinematik, der Statik, der Dynamik, der Thermoelastik und der Festigkeitseigenschaften bestimmt. Die steuerungstechnischen Aspekte sowie der Einfluss des Automatisierungsgrades auf den wirtschaftlichen Anwendungsbereich der Maschine werden in Band 3 dieses Kompendiums behandelt.

In zunehmendem Maße sind heute für den Verkaufserfolg einer Maschine auch solche Kenngrößen zu berücksichtigen, die sich auf das Arbeitsplatz- und Umweltverhalten beziehen. Dies sind einerseits das Geräuschverhalten und die Verursachung von Erschütterungen, andererseits die Sicherheit und Ergonomie der Maschine.

Die Hilfsmittel, die zur Ermittlung der Kenngrößen zur Verfügung stehen, sind in den Spalten der Matrix aufgetragen. Werden die Hilfsmittel den einzelnen Kenngrößen zugeordnet, so ist eine unterschiedliche Verfügbarkeit festzustellen. Insgesamt finden die einzelnen Hilfsmittel zunehmend Eingang in die Konstruktion und Berechnung.

Insbesondere im Werkzeugmaschinenbau, der eine Schlüsselstellung in der Produktionstechnik für den Standort Deutschland einnimmt, ergibt sich jedoch eine zwingende Notwendigkeit zur Anwendung moderner Verfahren und Hilfsmittel im Bereich der Entwicklung und Konstruktion. Die Marktsituation fordert hier in besonderem Maße eine flexible Anpassung der zu entwickelnden Produktionseinrichtungen an sich ständig ändernde Gegebenheiten. Hierbei



■ Bild 1.1 Gestaltung und Berechnung von Werkzeugmaschinen im Entwicklungsprozess

■ Bild 1.2 Verfügbarkeit von Hilfsmitteln für die Konstruktion

Hilfsmittel des Konstrukteurs zur Ermittlung und Bewertung der Eigenschaften einer Konstruktion		Berechnungsverfahren: Auslegung, Nachrechnung, Simulation, Optimierung	Messverfahren: Modelluntersuchungen, Prototypen-, Serienmessungen	Lösungskataloge: Prinziplösungen für fertigungs- und montagegerechte Konstruktionen	Beurteilungsmaßstäbe u. -verfahren: Stand der Technik, Richtlinien, Vorschriften, Gesetze
Arbeitsgenauigkeit und Leistungsfähigkeit	Geometrie, Kinematik 	◐	◐	◐	◐
	Stat. Verhalten 	●	●	◐	◐
	Dynam. Verhalten 	◐	◐	◐	◐
	Temperaturverhalten 	◐	◐	◐	○
	Festigkeit, Spannungen 	●	◐	◐	◐
Arbeitsplatz- und Umweltverhalten	Geräuschverhalten 	◐	◐	◐	◐
	Erschütterungen 	◐	◐	◐	◐
	Sicherheit 	◐	◐	◐	◐
	Ergonomie 	◐	◐	◐	◐

Verfügbarkeit der Mittel: gering ○ ◐ ◑ ◒ ● umfassend →

spielen die Herstellungskosten der angestrebten Lösungen letztlich eine – wenn nicht sogar die entscheidende – Rolle.

Ein heute notwendiges und allgegenwärtiges Hilfsmittel in der Entwicklungs- und Erprobungsphase ist die rechnergestützte Konstruktion (Computer-Aided Design, CAD) und Berechnung (Computer-Aided Engineering, CAE). Voraussetzung für den effektiven Einsatz des Rechners sind entsprechend leistungsfähige Programmsysteme, wie beispielsweise Konstruktions- und Berechnungsprogramme sowie Datenbank- und Netzwerksysteme.

Betrachtet man die heute verfügbaren Programme im Bereich des Werkzeugmaschinenbaus unter dem Aspekt ihres Einsatzgebietes, so lassen sich diese generell in drei Gruppen einordnen, wie ■ Bild 1.3 verdeutlicht. Die im linken Bildteil aufgeführten Programme sind universell einsetzbar. Sie erfordern jedoch im Allgemeinen eine aufwendige Datenaufbereitung und -eingabe sowie Ergebnisauswertung.

Ganz anders verhält es sich mit den bauteilabhängigen Programmen in der Bildmitte. Diese sind auf bestimmte Bauteile und Baueinheiten zugeschnitten, wie z. B. auf die

Rechnergestützte Konstruktion und Berechnung im Werkzeugmaschinenbau		
Bauteilunabhängig	Bauteilabhängig	Tätigkeitsabhängig
Berechnung des <ul style="list-style-type: none"> • statischen • dynamischen • thermischen oder • Geräuschübertragungsverhaltens Nutzwertanalyse Normteildatenbanken	Auswahl & Auslegung von <ul style="list-style-type: none"> • Getrieben • Welle-Nabe-Verbindungen • Schraubenverbindungen • Lagerungen • Kupplungen • Elektr. Hauptantrieben • Elektr. Steuerungen • Hydraulik-Steuerblöcken Variantenkonstruktion von <ul style="list-style-type: none"> • Spindelstöcken • Drehtischen • Vorschubschlitteneinheiten Gestaltung und Auslegung von <ul style="list-style-type: none"> • Werkstückzufuhr- und Spannsystemen • Maschinenteilen und Baugruppen 	Zeichnungserstellung <ul style="list-style-type: none"> • Einzelteile • Baugruppen Stücklistengenerierung Arbeitsplanerstellung <ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsvorgangfolgen • Maschinen • Werkzeuge • Vorgabezeiten Erstellung von Relativkosten- und Werkstoffkatalogen NC-Programmerstellung Ermittlung von Maschineneinstelldaten Eigene Postprozessoren

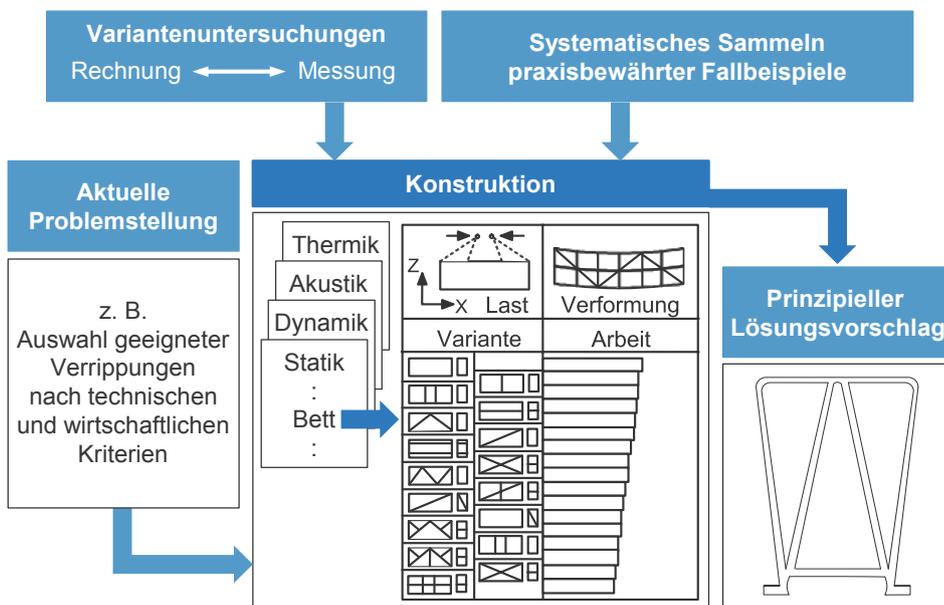
■ Bild 1.3 Programme für die rechnergestützte Konstruktion und Berechnung

Berechnung von Spindel-Lager-Systemen, die Auswahl und Berechnung von Getrieben, Lagerungen usw. Sie sind hinsichtlich der Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe ganz auf die jeweiligen Bauelemente abgestimmt. Dies gilt besonders für die Programme der Variantenkonstruktion, die vom Anwender auf die betriebsspezifischen Belange hin angepasst werden müssen.

Ein breites Einsatzfeld finden die tätigkeitsabhängigen Programme, mit denen eine Automatisierung der „einfachen“ Konstruktionstätigkeiten erreicht werden soll. Einsatzgebiete solcher Programme sind beispielsweise die Zeichnungserstellung für Einzelteile und Zusammenstellungen, das Generieren von Stücklisten sowie das Erstellen von Arbeitsplänen und Steuerprogrammen für die NC-Bearbeitung.

Rechner und Software werden bereits während des Entwurfsstadiums eingesetzt. Die Messtechnik benötigt hingegen ein gefertigtes Testobjekt, welches entweder ein Modell, ein Prototyp oder aber eine Serienmaschine sein kann. Alle notwendigen Beurteilungskriterien sind einer messtechnischen Analyse zugänglich. Der gerätetechnische Aufwand ist jedoch teilweise erheblich (► s. Kap. 9).

Ein weiteres Hilfsmittel für die Konstruktion, welches in der Gestaltungs- und Berechnungsphase seinen Einsatz findet, ist der Konstruktionskatalog. Er wird vom Konstrukteur bzw. Berechnungsingenieur in Form eines Nachschlagewerkes benutzt. In Konstruktionskatalogen sind nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertete Lösungen aufgelistet. Diese können, wie ■ Bild 1.4 verdeutlicht, durch systematische Variantenuntersuchungen auf der Basis von



■ Bild 1.4 Entwicklung und Anwendung von Konstruktionskatalogen

Berechnungen oder durch messtechnische Modelluntersuchungen ermittelt werden. Darüber hinaus werden die Ergebnisse von Fallbeispielen ausgewertet, systematisch aufbereitet und ebenfalls in Form von Konstruktionskatalogen bereitgestellt. Die Nutzung dieser Kataloge führt dazu, dass sich für eine aktuelle Problemstellung ein prinzipieller Lösungsvorschlag finden lässt. Hierauf aufbauend leitet man dann die endgültige Konstruktion ab, wobei in vielen Fällen Übertragungsregeln eine endgültige Dimensionierung erlauben.

Auch Kenntnisse über die Elektrokonstruktion sind heute sehr wichtig, um aus der Vielfalt der Lösungsmöglichkeiten die bestgeeignete Alternative auswählen zu können. Im „Mechatronik-Zeitalter“ besteht die optimale Lösung i.d.R. aus einer Integration der Disziplinen Mechanik, Elektrik/Elektronik und Informatik.

In diesem zweiten Band des Kompendiums „Werkzeugmaschinen – Fertigungssysteme“ werden im ersten Teil die grundlegenden Gestaltungskriterien, Auslegungsberechnungen und Zusammenhänge für die rechnerische Analyse der einzelnen Maschinenkomponenten hinsichtlich ihrer wichtigsten Eigenschaften dargelegt und an Beispielen erläutert. Eine systematische Gegenüberstellung und Diskussion von Lösungsalternativen soll Konstrukteuren und Berechnungsingenieuren Anregungen bieten, geeignete Wege zur Lösung ihrer eigenen, ständig wechselnden Problemstellungen zu finden. Da die Berechnungsalgorithmen größtenteils sehr aufwändig sind, stehen heute – wie schon erwähnt – umfangreiche Softwarebibliotheken zur Verfügung, die eine rechnergestützte Auslegung der Bestandteile von Werkzeugmaschinen gestatten. Diese Betrachtungen gelten nicht nur für die Gestellbauteile der Maschine, sondern insbesondere auch für die wichtigsten und leistungsbestimmenden Maschinenele-

mente (Wälzfürungen, Luftlager usw.) und Komponenten (Antriebe, Getriebe usw.).

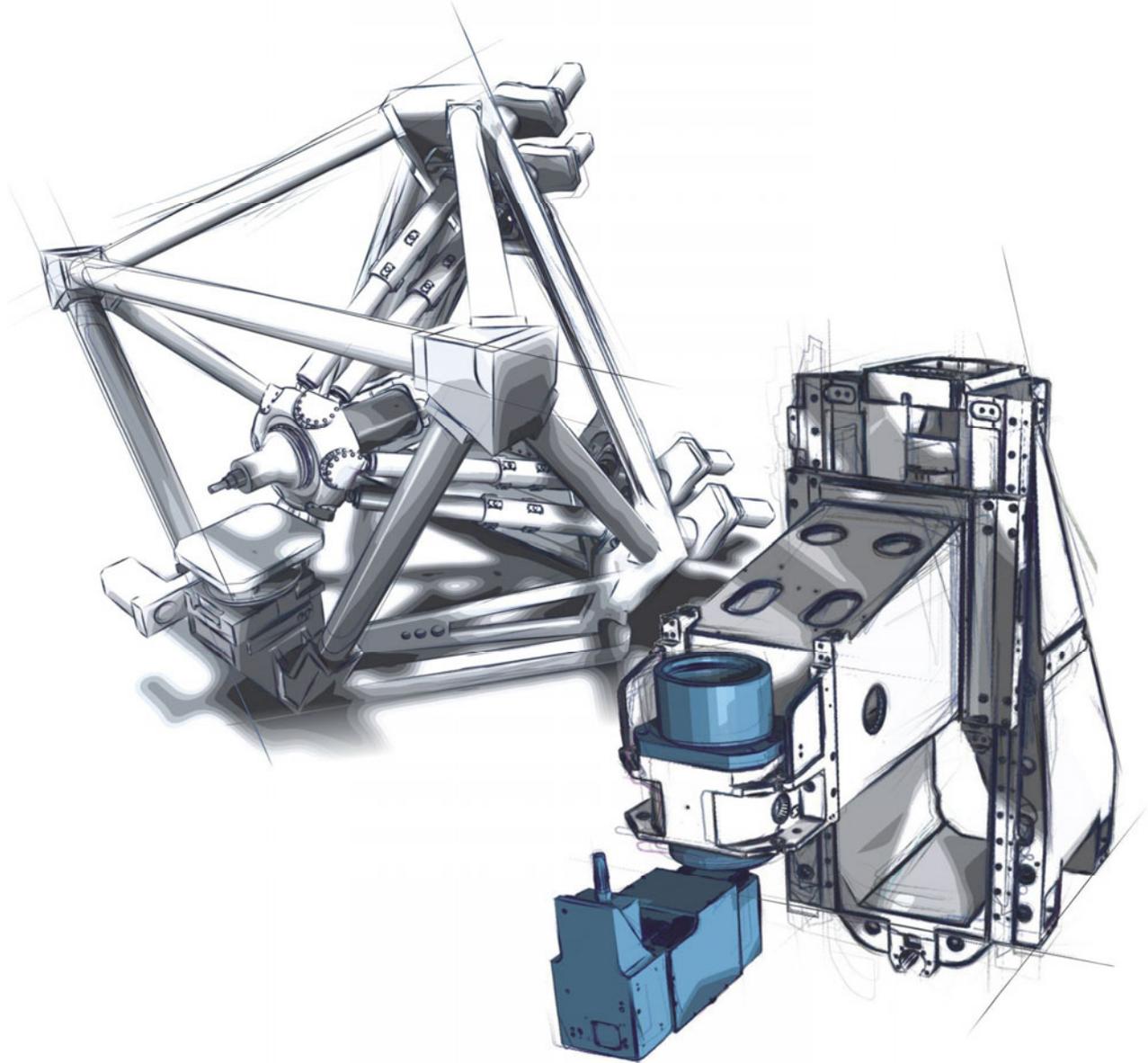
Auch in Zeiten der rechnergestützten Konstruktion und Berechnung sind messtechnische Untersuchungen weiterhin zwingend nötig und von großer Bedeutung im gesamten Entwicklungsprozess. Einerseits werden diese eingesetzt, um beispielsweise anhand von Prototypen die vorausberechneten Eigenschaften und somit die Rechenmodelle zu verifizieren. Andererseits ist man spätestens für die Qualitätskontrolle von Werkzeugmaschinen und für die Abnahme von Maschinen bei der Übernahme durch den Maschinenanwender bestrebt, alle wichtigen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen zu beschreiben und zu bewerten. Dazu sind objektive Verfahren zur Erfassung und Darstellung entsprechender Messwerte erforderlich. Die Problematik liegt darin, dass praktisch alle Maschineneigenschaften von einer Vielzahl systematischer und zufälliger Größen beeinflusst werden. Zur Maschinenbeurteilung muss man deshalb die Einzeleinflüsse erkennen und für die vergleichende Maschinenbeurteilung konstant halten.

Im zweiten Teil dieses Bandes werden daher ausgehend von der Definition der Arbeitsgenauigkeit, die Leistungsfähigkeit, das Umweltverhalten und die Zuverlässigkeit der Maschine bestimmenden Eigenschaften grundlegende Zusammenhänge dargestellt, wesentliche Einflussparameter diskutiert und der heutige Stand der Messtechnik aufgezeigt.

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering

Kapitel 2



Anforderungen und Bauformen

Ich danke meinen Mitarbeitern Dr.-Ing. Marcel Fey und Dipl.-Ing. Simo Schmidt für ihre Mitwirkung bei der Überarbeitung dieses Kapitels.



HerkulesGroup – die Spezialisten für Großwerkzeugmaschinen

Mit Leistungen bis 120kW und Durchgangshöhen und -breiten bis 10m können Portalfräsmaschinen von WaldrichSiegen Werkstücke von der Größe eines Zweifamilienhauses hochpräzise bearbeiten.

Walzen mit 400t Gewicht werden in der weltweit größten Horizontaldrehmaschine von Herkules nur von zwei Körnerspitzen gehalten.

Bohrwerke von UnionChemnitz sind für die Bearbeitung von Werkstücken mit bis zu 40m Länge, 10m Höhe und 250t Gewicht ausgelegt.

Weltweit sind die Unternehmen der Herkules-Group die absoluten Spezialisten für Großwerkzeugmaschinen. 1.500 Mitarbeiter entwickeln und produzieren an den deutschen und internationalen Standorten mit Leidenschaft und Kompetenz technologische Spitzenprodukte – von Walzenschleif- und Texturiermaschinen über Horizontal- und Vertikaldrehmaschinen, Portalfräsmaschinen und Bohrwerke bis hin zu Sondergetrieben, Mess- und Steuerungstechnik.

herkulesgroup.de

 **HERKULES**

 **WALDRICH**SIEGEN

 **UNION**CHEMNITZ

 **RS**Getriebe

 **hcckpm**

Anforderungen und Bauformen

Electronic Supplementary Material The online version of this chapter (DOI:10.1007/978-3-662-46567-7_2) contains supplementary material, which is available to authorized users.