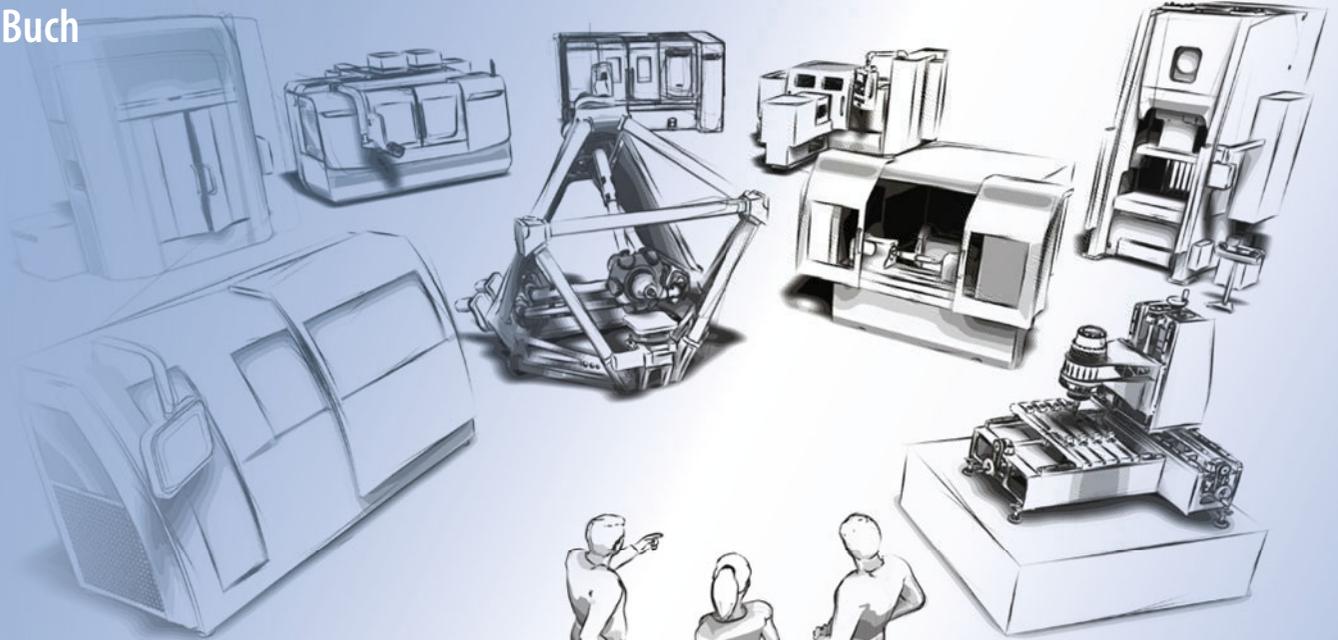


VDI-Buch



Christian Brecher  
Manfred Weck

# Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1

Maschinenarten und Anwendungsbereiche

*9. Auflage*

VDI

 Springer Vieweg

---

# VDI-Buch

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/3482>

---

Christian Brecher · Manfred Weck

# Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1

Maschinenarten und Anwendungsbereiche

9. Auflage

 Springer Vieweg

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

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

ISSN 2512-5281                      ISSN 2512-529X (electronic)  
VDI-Buch  
ISBN 978-3-662-46564-6              ISBN 978-3-662-46565-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-46565-3>

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

Ursprünglich erschienen unter Weck, M., Werkzeugmaschinen 1

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1991, 1998, 2005, 2019

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. 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 7,44 % des Produktionsvolumens des gesamten Maschinenbaus, und 6,96 % 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. Im Hinblick auf Industrie 4.0 werden zunehmend auch die Informations- und Kommunikationstechnik immer wichtiger werdende Bereiche im Werkzeugmaschinenbau.

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 Vorlesungen „Werkzeugmaschinen“ sowie „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“ 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 Automatisie-  
rung.

**Christian Brecher**  
Aachen, im August 2018

## Vorwort zum Band 1

---

Der erste Band des Kompendiums soll dem Anwender von Werkzeugmaschinen einen umfassenden Überblick über die unterschiedlichen Anwendungsbereiche und die entsprechenden Maschinentypen geben. Angelehnt an die Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 werden zunächst die unterschiedlichen Werkzeugmaschinentypen für die einzelnen Verfahrensgruppen vorgestellt. Betrachtet werden hierbei sowohl ur- und umformende sowie spanende Werkzeugmaschinen als auch abtragende Maschinen und Anlagen zur Laserstrahlbearbeitung. Anschließend werden verschiedene Einzweckmaschinen beschrieben, die speziell für ein Produkt ausgelegt sind, bevor auf unterschiedliche Arten von Mehrmaschinensystemen eingegangen wird. Im Anschluss daran folgt eine ausführliche Erläuterung unterschiedlicher Ausrüstungskomponenten für Werkzeugmaschinen in einem gesonderten Kapitel. Zum Abschluss des Bandes werden im letzten Kapitel der überarbeiteten Ausgabe detailliert verschiedene Ausführungsbeispiele ausgewählter Werkzeugmaschinen beschrieben, um dem Leser eine weitere Vertiefung und Veranschaulichung konstruktiver Maschinenausführungen zu bieten.

Der Inhalt dieses Bandes gliedert sich im Einzelnen wie folgt:

In einer kurzen Einleitung (*Kapitel 1*) wird allgemein ein Überblick über die Bedeutung, die Historie und grundlegende Anforderungen an Werkzeugmaschinen gegeben. Zudem ist eine kurze Einführung in die Gliederung der Fertigungsverfahren und der Maschinenautomatisierung enthalten.

Anschließend werden in *Kapitel 2* verschiedene Maschinen und Anlagen für die urformende Bearbeitung vorgestellt. Neben klassischen Urformverfahren wie Gießen mit verlorenen und Dauerformen sowie Sintern werden auch Anlagen für das Gießen von Reaktionsharzbeton erläutert und eine Einführung in Maschinen für die generative Fertigung gegeben.

Im *Kapitel 3* erfolgt eine ausführliche Erläuterung unterschiedlicher Typen von umformenden und zerteilenden Maschinen. Hierbei werden im Bereich der umformenden Maschinen unter anderem verschiedene Arten von Pressen (z. B. Spindel-, Kurbel-, Kniehebel- oder Keilpressen etc.) sowie Maschinen für kontinuierliche Umformprozesse wie Walz-, Biege-, Zieh- und Richtmaschinen vorgestellt. Auch auf die speziellen Schutzeinrichtungen an Umformmaschinen wird eingegangen. Im Bereich der zerteilenden Maschinen werden vor allem Scheren und Schneidpressen erläutert.

*Kapitel 4* befasst sich schließlich mit spanenden Maschinen für Werkzeuge mit geometrisch bestimmten Schneiden, einem der Kernanwendungsgebiete für Werkzeugmaschinen. Neben verschiedenen Formen von Säge- und Bohrmaschinen sowie Einführungen in Stoß-, Zieh- und Räummaschinen, wird im Hauptteil des Kapitels ausführlich auf Fräs- und Drehmaschinen als besonders verbreitete Vertreter von Werkzeugmaschinentypen eingegangen. Erläutert werden verschiedene konstruktive Bauformen und deren grundlegende Eigenschaften. Im Bereich der Fräsmaschinen wird beispielsweise zwischen Maschinen mit horizontaler und vertikaler Werkzeugspindel sowie Maschinen mit parallelkinematischen Strukturen unterschieden. Anhand von zahlreichen Abbildungen und Prinzipdarstellungen werden die einzelnen Beschreibungen veranschaulicht.

Neben den Maschinen für Werkzeuge mit geometrisch bestimmten Schneiden, bilden auch die spanenden Maschinen für Werkzeuge mit geometrisch unbestimmten Schneiden einen wichtigen Anwendungsbereich von Werkzeugmaschinen. Diese werden im *Kapitel 5* behandelt. Neben einer ausführlichen Beschreibung von unterschiedlichen Typen von Schleifmaschinen (z. B. Rund- und Planschleifmaschinen) sowie von spezifischen Vorrichtungen wie Abrichtsystemen und Messeinrichtungen, werden auch Hon- und Läppmaschinen sowie Maschinen zum mechanischen Entgraten und

Gleitschleifmaschinen behandelt. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden zudem Wasserstrahl-Schneidanlagen erläutert.

In *Kapitel 6* wird ein Überblick über abtragende Maschinen gegeben. Hier werden Formen von Werkzeugmaschinen beschrieben, mit denen Bearbeitungen durchgeführt werden, die den abtragenden Fertigungsverfahren nach DIN 8580 zugeordnet sind. Im Einzelnen wird eine kurze Einführung in chemische Ätzanlagen sowie Maschinen für die elektrochemische und funkenerosive Bearbeitung gegeben. Auch Anlagen zum Abtragen durch Elektronenstrahlen und zum thermisch-chemischen Entgraten werden vorgestellt.

Den Maschinen zur Laserstrahlbearbeitung wird aufgrund ihrer zunehmenden Bedeutung in der Produktion in dieser überarbeiteten Ausgabe von Band 1 ein eigenes Kapitel gewidmet. In *Kapitel 7* werden daher zunächst gängige Laserstrahlquellen beschrieben, bevor auf Möglichkeiten zur Umsetzung von Strahlführung und -formung eingegangen wird. Anschließend werden unterschiedliche Arten von Anlagen für die Laserstrahlbearbeitung erläutert. Beschrieben werden sowohl Laserschneid- als auch Laserabtraganlagen sowie Anlagen zur generativen Fertigung mittels Laserbearbeitung und Maschinen zur laserunterstützten Bearbeitung.

*Kapitel 8* widmet sich schließlich den Einzweckmaschinen. Diese Maschinentypen sind jeweils auf die Herstellung eines bestimmten Produkts spezialisiert. So werden verzahnende Maschinen beispielsweise nur für die Herstellung von Zahnrädern eingesetzt. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Arten von Verzahnmaschinen werden diese besonders ausführlich behandelt. Im Einzelnen werden verschiedene Typen von wälzenden und profilierenden sowie Sonder- und Umformverzahnmaschinen erläutert. Aber auch Maschinen für die Herstellung von Kurbelwellen durch Fräsen, Drehen, Schleifen oder Walzen sowie Maschinen für die Produktion von Nockenwellen und Gewindespindeln werden in diesem Kapitel behandelt.

Die stetige Forderung nach gesteigerter Leistung und Automatisierung in der Produktion führt zu einer zunehmenden Bedeutung von Mehrmaschinensystemen. *Kapitel 9* befasst sich daher mit den unterschiedlichen Möglichkeiten solche Systeme zu realisieren. Zunächst werden die Grundlagen der Maschinenverkettung erläutert, um den Leser in die Thematik einzuführen. Als Schnittstelle zwischen den einzelnen Maschinen eines Mehrmaschinensystems werden unterschiedliche Handhabungssysteme wie Einlegegeräte oder Industrieroboter kombiniert mit entsprechenden Endeffektoren (z. B. Greifer etc.) verwendet, die ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt werden. Anschließend wird auf Sonderwerkzeugmaschinen wie Rundtakt- oder Längstaktmaschinen eingegangen, bevor unterschiedliche Arten von Transferstraßen sowie flexible Fertigungszellen und -systeme erläutert werden.

Neben den grundlegenden funktionsrelevanten Bauteilen von Werkzeugmaschinen existieren auch zahlreiche, teilweise optionale Ausrüstungskomponenten, die zusätzlich in die Maschinen integriert werden können. In *Kapitel 10* werden diese Komponenten ausführlich behandelt. Nach einer kurzen Übersicht über die verschiedenen Ausrüstungskomponenten werden zunächst Peripheriegeräte für Kühlsysteme, Handhabung von Spänen und zur Schmierung sowie Hydraulikaggregate erläutert. Anschließend wird ausführlich auf unterschiedliche Werkzeugsysteme für Bohr-, Fräs- und Drehmaschinen sowie auf die mechanischen Eigenschaften von Werkzeugschnittstellen eingegangen. Zum Abschluss des Kapitels werden die Aufgaben und die verschiedenen Arten von Werkstückspan- und -zuführsystemen erläutert.

In *Kapitel 11* werden abschließend drei Ausführungsbeispiele ausgewählter Werkzeugmaschinen detailliert erläutert, um dem Leser eine vertiefte und praxisnahe Veranschaulichung unterschiedlicher Maschinentypen zu ermöglichen. Dieses Kapitel wurde neu in die überarbeitete Auflage dieses Bandes integriert und beschreibt ausführlich anhand von Zusammenbau- und Schnittzeichnungen einer Fräs-, einer Schleif- und einer Dreh-Fräsmaschine

von unterschiedlichen Firmen den konstruktiven Aufbau und die einzelnen Funktionsweisen.

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 Überar-

beitung zur neunten Auflage möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Alexander Hassis und Frau Caroline Kiesewetter-Marko M. Sc. besonders danken.

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

**Christian Brecher**

Aachen, im August 2018

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
1.1	Volkswirtschaftliche Bedeutung der Werkzeugmaschinen .....	4
1.2	Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen .....	7
1.3	Grundlegende Anforderungen an Werkzeugmaschinen .....	10
1.4	Begriffliche Gliederung der Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen .....	12
1.4.1	Einteilung der Fertigungsverfahren .....	12
1.4.2	Einteilung der Werkzeugmaschinen .....	12
1.4.3	Bezeichnung der Werkzeugmaschinen .....	13
1.5	Grundlagen der Werkzeugmaschinenautomatisierung .....	14
	Abkürzungsverzeichnis .....	19
	Literaturverzeichnis .....	20
<b>2</b>	<b>Urformende Maschinen und Anlagen</b> .....	21
2.1	Wirtschaftliche Bearbeitung von Gussteilen .....	27
2.2	Anlagen für das Gießen mit verlorenen Formen .....	27
2.3	Anlagen für das Gießen mit Dauerformen .....	29
2.3.1	Schleudergussmaschinen .....	29
2.3.2	Druckgussmaschinen .....	29
2.3.3	Stranggussmaschinen .....	31
2.3.4	Anlagen für das Gussputzen .....	33
2.4	Anlagen für das Sintern .....	34
2.5	Anlagen für das Gießen von Reaktionsharzbeton .....	36
2.6	Maschinen für die generative Fertigung .....	39
	Abkürzungsverzeichnis .....	39
	Literaturverzeichnis .....	39
<b>3</b>	<b>Umformende und zerteilende Maschinen</b> .....	41
3.1	Umformende Maschinen .....	44
3.1.1	Hämmer .....	49
3.1.2	Spindelpressen .....	54
3.1.3	Exzenter- und Kurbelpressen .....	59
3.1.4	Kniehebelpressen .....	72
3.1.5	Keilpressen .....	74
3.1.6	Hydraulische Pressen und Umformmaschinen mit hydraulischem Wirkprinzip .....	75

3.1.7	Servopressen.....	83
3.1.7.1	Servopressen in Monoblockbauweise/Zugankerbausweise (Direktantrieb).....	85
3.1.7.2	Kniehebelpressen mit Servoantrieb.....	85
3.1.8	Radialschmiedemaschinen.....	85
3.1.9	Walzmaschinen.....	87
3.1.9.1	Reckwalzmaschinen.....	87
3.1.9.2	Querwalzmaschinen.....	87
3.1.9.3	Ringwalzmaschinen.....	89
3.1.9.4	Gesenkwalzmaschinen.....	90
3.1.9.5	Drückwalzmaschinen.....	90
3.1.9.6	Gegenrollen-Drückwalzmaschinen.....	92
3.1.9.7	Drückmaschinen.....	92
3.1.10	Biegemaschinen.....	94
3.1.10.1	Gesenkbiegepressen.....	94
3.1.10.2	Automatische Biegezellen.....	94
3.1.10.3	Blechrundbiegemaschinen.....	96
3.1.10.4	Schwenkbiegemaschinen.....	98
3.1.11	Ziehmaschinen.....	98
3.1.12	Richtmaschinen.....	100
3.1.13	Schutzeinrichtungen an Umformmaschinen.....	103
3.2	<b>Zerteilende Maschinen</b> .....	104
3.2.1	Scheren.....	105
3.2.2	Schneidpressen.....	106
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	109
	<b>Formelzeichenverzeichnis</b> .....	110
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	110
4	<b>Spanende Maschinen für Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide</b> .....	113
4.1	<b>Sägemaschinen</b> .....	117
4.1.1	Bügelsägemaschinen.....	118
4.1.2	Bandsägemaschinen.....	118
4.1.3	Kreissägemaschinen.....	121
4.1.4	Sägezentren.....	122
4.2	<b>Bohrmaschinen</b> .....	123
4.2.1	Säulenbohrmaschinen.....	123
4.2.2	Auslegerbohrmaschinen.....	125
4.2.3	Tiefbohrmaschinen.....	126
4.3	<b>Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren</b> .....	131
4.3.1	Maschinen mit horizontaler Werkzeugspindel.....	134
4.3.1.1	Maschinen in Kreuzbettbauweise.....	134
4.3.1.2	Maschinen in Fahrständerbauweise.....	139

4.3.2	Maschinen mit vertikaler Werkzeugspindel .....	140
4.3.2.1	Maschinen in Fahrständerbauweise .....	140
4.3.2.2	Maschinen in Konsolenständerbauweise .....	142
4.3.2.3	Portalfräsmaschinen .....	142
4.3.2.4	Maschinen mit modifizierter Gantrybauweise .....	144
4.3.2.5	Sonderformen von Bearbeitungszentren .....	146
4.3.3	Maschinen mit parallelkinematischen Strukturen .....	147
<b>4.4</b>	<b>Drehmaschinen</b> .....	<b>151</b>
4.4.1	Universal- bzw. Werkstattdrehmaschinen .....	154
4.4.2	Drehautomaten .....	155
4.4.3	Langdrehautomaten .....	158
4.4.4	Mehrschlitten-Einstechedrehautomaten .....	158
4.4.5	Mehrspindel-Drehautomaten .....	159
4.4.6	Drehmaschinen mit vertikaler Spindel .....	163
4.4.7	Großdrehmaschinen .....	165
4.4.7.1	Waagrecht-Großdrehmaschinen .....	165
4.4.7.2	Senkrecht-Großdrehmaschinen .....	167
4.4.7.3	Drehschälmaschinen .....	168
4.4.8	Hochpräzisions- und Ultrapräzisionsdrehmaschinen .....	170
4.4.9	Kombinationsmaschinen .....	173
4.4.9.1	Fräs-Dreh-Zentrum .....	173
4.4.9.2	Dreh-Schleif-Maschine .....	174
<b>4.5</b>	<b>Stoß- und Ziehmaschinen</b> .....	<b>175</b>
<b>4.6</b>	<b>Räummaschinen</b> .....	<b>176</b>
4.6.1	Innenräummaschinen .....	178
4.6.2	Außenräummaschinen .....	181
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>183</b>
	<b>Formelzeichenverzeichnis</b> .....	<b>183</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>183</b>
<b>5</b>	<b>Spanende Maschinen für Werkzeuge mit geometrisch unbestimmten Schneiden</b> .....	<b>185</b>
<b>5.1</b>	<b>Schleifmaschinen</b> .....	<b>189</b>
5.1.1	Rundschleifmaschinen .....	191
5.1.2	Planschleifmaschinen .....	195
5.1.3	Werkzeugschleifmaschinen .....	199
5.1.4	Abrichtsysteme .....	200
5.1.5	Auswuchteinrichtungen .....	204
5.1.6	Messeinrichtungen .....	206
<b>5.2</b>	<b>Honmaschinen</b> .....	<b>207</b>
<b>5.3</b>	<b>Läppmaschinen</b> .....	<b>210</b>
5.3.1	Konventionelle Läppmaschinen .....	210
5.3.2	Ultraschallunterstützte Läppmaschinen .....	213

5.4	Maschinen zum mechanischen Entgraten .....	213
5.5	Gleitschleifmaschinen .....	214
5.6	Wasserstrahl-Schneidanlagen .....	217
	Abkürzungsverzeichnis .....	220
	Formelzeichenverzeichnis .....	220
	Literaturverzeichnis .....	220
<b>6</b>	<b>Abtragende Maschinen</b> .....	<b>221</b>
6.1	Chemische Ätzanlagen .....	224
6.2	Elektrochemische Bearbeitungsanlagen .....	225
6.3	Funkenerosive Bearbeitungsanlagen .....	230
6.3.1	Funkenerosive Senkanlagen .....	231
6.3.2	Funkenerosive Schneidanlagen .....	236
6.4	Anlagen zum thermischen Abtragen durch Elektronenstrahl .....	238
6.5	Anlagen zum thermisch-chemischen Entgraten .....	242
	Abkürzungsverzeichnis .....	244
	Formelzeichenverzeichnis .....	244
	Literaturverzeichnis .....	244
<b>7</b>	<b>Maschinen zur Laserstrahlbearbeitung</b> .....	<b>245</b>
7.1	Laserstrahlquellen .....	248
7.1.1	Gaslaser (CO <sub>2</sub> -Laser) .....	251
7.1.2	Festkörperlaser .....	253
7.1.2.1	Stablaser .....	254
7.1.2.2	Faserlaser .....	255
7.1.2.3	Scheibenlaser .....	256
7.1.3	Halbleiterlaser (Diodenlaser) .....	256
7.2	Strahlführung und -formung .....	258
7.3	Laserschneidanlagen .....	261
7.4	Laserabtraganlagen .....	262
7.5	Anlagen zur generativen Fertigung .....	263
7.6	Anlagen zur laserunterstützten Bearbeitung .....	266
7.6.1	5-Achs-Hybridmaschine zum Fräsen und generativen Fertigen von Bauteilen .....	266
7.6.1	Systemtechnik zum laserunterstützten Fräsen .....	268
	Abkürzungsverzeichnis .....	270
	Formelzeichenverzeichnis .....	270
	Literaturverzeichnis .....	270

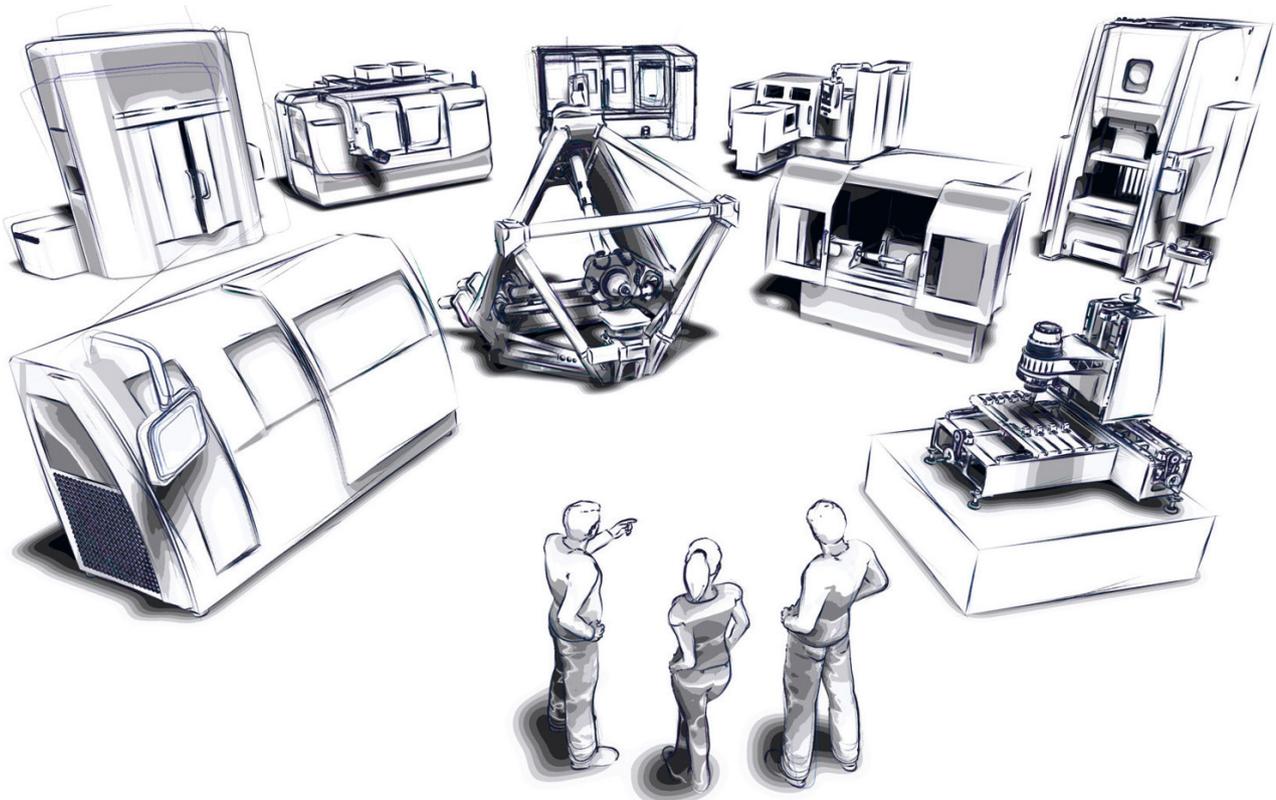
<b>8</b>	<b>Einzelzweckmaschinen</b> .....	271
<b>8.1</b>	<b>Verzahnende Maschinen</b> .....	274
8.1.1	Wälzende Verzahnmaschinen .....	277
8.1.1.1	Wälzfräsmaschinen .....	277
8.1.1.2	Wälzstoßmaschinen .....	280
8.1.1.3	Wälzschälmaschinen .....	282
8.1.1.4	Zahnradschabmaschinen .....	284
8.1.1.5	Wälzschleifmaschinen .....	285
8.1.1.6	Verzahnungshonmaschinen .....	288
8.1.2	Profilierende Verzahnmaschinen .....	290
8.1.2.1	Profilfräsmaschinen .....	290
8.1.2.2	Profilschleifmaschinen .....	291
8.1.2.3	Räummaschinen .....	293
8.1.3	Sonderverzahnmaschinen .....	294
8.1.3.1	Mechanische Kegelradfräsmaschinen .....	296
8.1.3.2	6-Achs-Universal-Fräsmaschinen .....	296
8.1.3.3	Kegelradschleifmaschinen .....	298
8.1.3.4	Kegelradlappmaschinen .....	299
8.1.3.5	5-Achs-Fräsmaschinen .....	300
8.1.4	Umformende Verzahnmaschinen .....	301
8.1.4.1	Walzmaschinen .....	301
8.1.4.2	Taumelpressen .....	302
<b>8.2</b>	<b>Maschinen zur Kurbelwellenproduktion</b> .....	302
8.2.1	Kurbelwellen-Fräsen .....	303
8.2.1.1	Innenfräsen mit feststehendem Werkstück .....	303
8.2.1.2	Innenfräsen mit drehendem Werkstück .....	305
8.2.1.3	Außenfräsen mit parallelen Achsen (Drehfräsen) .....	306
8.2.1.4	Außenfräsen (Stirndrehfräsen) .....	306
8.2.2	Kurbelwellen-Drehen und (Dreh-)Drehräumen .....	307
8.2.2.1	Drehen .....	307
8.2.2.2	Drehräumen .....	308
8.2.2.3	Dreh-Drehräumen .....	309
8.2.3	Kurbelwellen-Schleifen .....	310
8.2.4	Kurbelwellen-Walzen .....	312
<b>8.3</b>	<b>Maschinen für die Nockenwellenproduktion</b> .....	315
8.3.1	Nockenwellen-Fräsmaschinen .....	315
8.3.2	Nockenwellen-Schleifmaschinen .....	315
<b>8.4</b>	<b>Maschinen für die Produktion von Gewindespindeln</b> .....	317
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	321
	<b>Formelzeichenverzeichnis</b> .....	321
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	322

<b>9 Mehrmaschinensysteme</b> .....	323
<b>9.1 Grundlagen der Maschinenverkettung</b> .....	326
9.1.1 Fertigungsformen .....	327
9.1.2 Verkettete Maschinen in Maschinensystemen .....	328
9.1.2.1 Werkzeugmaschinen.....	329
9.1.2.2 Reinigungsmaschinen .....	332
9.1.3 Verkettungssysteme .....	333
<b>9.2 Handhabungssysteme</b> .....	335
9.2.1 Einlegegeräte und Industrieroboter.....	335
9.2.1.1 Einlegesysteme .....	335
9.2.1.2 Industrieroboter .....	336
9.2.2 Endeffektoren.....	340
9.2.2.1 Greifer .....	341
9.2.2.2 Greifsysteme .....	343
9.2.2.3 Zugeschnittene Werkzeugwechselsysteme in Mehrmaschinensystemen.....	344
<b>9.3 Sonderwerkzeugmaschinen</b> .....	346
9.3.1 Rundtaktmaschinen.....	346
9.3.2 Längstaktmaschinen .....	347
<b>9.4 Transferstraßen</b> .....	347
9.4.1 Starre Transferstraßen.....	348
9.4.2 Flexible Transferstraßen.....	348
<b>9.5 Flexible Fertigungszellen</b> .....	353
<b>9.6 Flexible Fertigungssysteme</b> .....	355
Literaturverzeichnis.....	359
<b>10 Ausrüstungskomponenten für Werkzeugmaschinen</b> .....	361
<b>10.1 Übersicht</b> .....	364
<b>10.2 Peripheriegeräte für Werkzeugmaschinen</b> .....	366
10.2.1 Kühlsysteme .....	366
10.2.2 Kühlschmierstoffversorgung.....	369
10.2.2.1 Grundlagen der Kühlschmierstoffversorgung .....	370
10.2.2.2 Systeme zur Minimalmengenkühschmierung .....	371
10.2.2.3 Trennverfahren zur Reinigung von Kühlschmierstoffen.....	375
10.2.2.4 Brandschutz beim Einsatz nicht wassermischbarer Kühlschmierstoffe .....	379
10.2.3 Systeme zur Handhabung von Spänen .....	382
10.2.3.1 Späneförderer.....	382
10.2.3.2 Spänezentrifugen .....	384
10.2.3.3 Brikettieren .....	386

10.2.4	Zentralschmieranlagen .....	386
10.2.4.1	Einleitungsanlagen .....	388
10.2.4.2	Progressivanlagen .....	389
10.2.4.3	Zweileitungsanlagen.....	390
10.2.4.4	Mehrleitungsanlagen .....	390
10.2.4.5	Drosselanlagen .....	390
10.2.4.6	Druckluftbeölungsanlagen .....	391
10.2.5	Hydraulikaggregate .....	393
10.2.5.1	Aufgaben und Bedeutung von Hydrauliksystemen.....	393
10.2.5.2	Grundsätzlicher Aufbau eines Hydrauliksystems .....	394
10.2.5.3	Ausführungsformen von Hydraulikaggregaten .....	395
<b>10.3</b>	<b>Werkzeugsysteme .....</b>	<b>396</b>
10.3.1	Werkzeugsysteme für Bohr- und Fräsmaschinen .....	396
10.3.1.1	Mechanische Schnittstelle zwischen Spindel und Werkzeug (Werkzeugschnittstelle) .....	397
10.3.1.2	Werkzeugspannsysteme .....	400
10.3.1.3	Werkzeugtypen (modulare Werkzeuge / Werkzeughalter) .....	403
10.3.1.4	Wechseleinrichtungen und Speicher für Werkzeuge .....	407
10.3.1.5	Identifikationssysteme für Werkzeuge.....	415
10.3.2	Werkzeugsysteme für Drehmaschinen.....	416
10.3.2.1	Werkzeugtypen in Drehmaschinen.....	416
10.3.2.2	Revolverschnittstelle.....	418
10.3.2.3	Werkzeugträger für Drehmaschinen .....	420
10.3.2.4	Modulare Werkzeuge .....	425
10.3.3	Mechanische Schnittstelleneigenschaften .....	427
<b>10.4</b>	<b>Werkstückspannung und -zuführsysteme .....</b>	<b>434</b>
10.4.1	Aufgaben von Werkstückspann- und -zuführsystemen .....	434
10.4.1.1	Spannen .....	436
10.4.1.2	Werkstückhandhabung .....	437
10.4.2	Werkstückspannsysteme und Vorrichtungen an Bohr- und Fräsmaschinen .....	438
10.4.2.1	Werkstückspanner und Vorrichtungen .....	438
10.4.2.2	Werkstückträger und Paletten .....	445
10.4.2.3	Palettenwechseleinrichtungen und -speicher.....	449
10.4.3	Werkstückspannung, Abstützung und Zuführung in Drehmaschinen .....	450
10.4.3.1	Spannsysteme .....	450
10.4.3.2	Abstützung langer Werkstücke .....	457
10.4.3.3	Wechseleinrichtungen und Speicher für Werkstücke .....	460
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>463</b>
	<b>Formelzeichenverzeichnis.....</b>	<b>463</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>463</b>

<b>11 Ausführungsbeispiele ausgewählter Werkzeugmaschinen</b> .....	467
<b>11.1 Bearbeitungszentrum</b> .....	470
11.1.1 Unternehmensprofil.....	470
11.1.2 Übersicht .....	470
11.1.3 Allgemeine Beschreibung .....	470
11.1.4 Maschinenverbund.....	471
11.1.5 Tischbett.....	472
11.1.6 Ständerbett .....	473
11.1.7 Ständer .....	475
11.1.8 Horizontal-Vertikal-Kopf.....	476
<b>11.2 Schleifmaschine</b> .....	480
11.2.1 Unternehmensprofil.....	480
11.2.2 Übersicht .....	480
11.2.3 Allgemeine Beschreibung .....	480
11.2.4 Vorderständer und Tisch.....	482
11.2.5 Rückenständer.....	484
11.2.6 Säule .....	484
11.2.7 Spindel.....	486
11.2.8 Abrichter .....	486
11.2.9 Technologielösungen und Produktionssysteme .....	489
<b>11.3 Drehmaschine</b> .....	490
11.3.1 Unternehmensprofil.....	490
11.3.2 Übersicht .....	491
11.3.3 Allgemeine Beschreibung .....	491
11.3.4 Maschinenbett.....	492
11.3.5 Revolverschlitten .....	493
11.3.6 Haupt- und Gegenspindel.....	493
11.3.7 Schlitten Motorfrässpindel A- und B-Achse.....	497
11.3.8 Motorfrässpindel und A-Achse.....	500
Abkürzungsverzeichnis.....	501
<b>12 Serviceteil</b> .....	503

# Kapitel 1



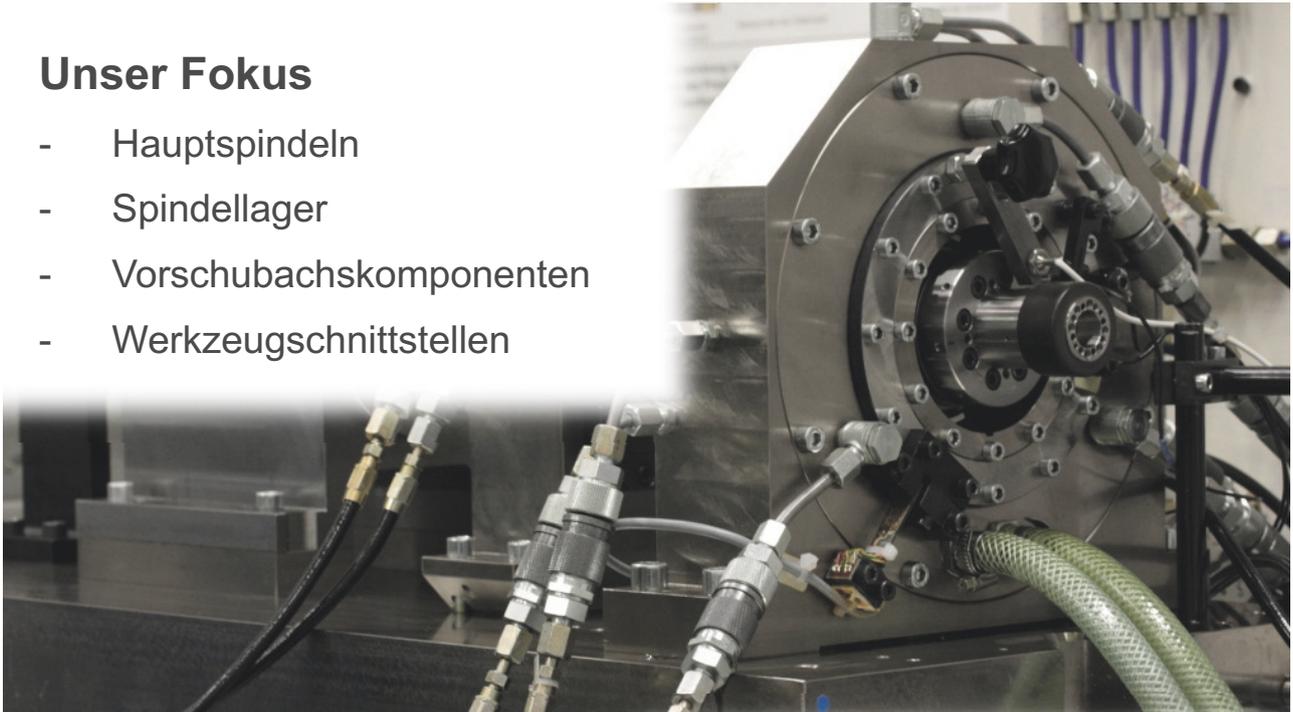
## Einführung

Ich danke meinen Mitarbeitern Alexander Hassis M.Sc. und Dipl.-Ing. David Jasper 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

- 1.1 Volkswirtschaftliche Bedeutung der Werkzeugmaschinen – 4
  - 1.2 Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen – 7
  - 1.3 Grundlegende Anforderungen an Werkzeugmaschinen – 10
  - 1.4 Begriffliche Gliederung der Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen – 12
    - 1.4.1 Einteilung der Fertigungsverfahren – 12
    - 1.4.2 Einteilung der Werkzeugmaschinen – 12
    - 1.4.3 Bezeichnung der Werkzeugmaschinen – 13
  - 1.5 Grundlagen der Werkzeugmaschinenautomatisierung – 14
- Abkürzungsverzeichnis – 19
- Literaturverzeichnis – 20

Werkzeuge und Fertigungsmittel sind seit jeher von zentraler Bedeutung für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung von Gesellschaften. Kern der im späten 18. Jahrhundert beginnenden industriellen Revolution, die zunächst in England und Europa, später auch in den USA, Japan und bis zum heutigen Tag in nahezu allen Teilen der Welt für grundlegende Änderung der gesellschaftlichen Verhältnisse und ein bis dahin ungekanntes wirtschaftliches Wachstum gesorgt hat, waren die Mechanisierung von Fertigungsprozessen sowie die Bereitstellung zunächst mechanischer und später elektrischer Energie. Zur Herstellung der dafür benötigten Fertigungs- und Energieerzeugungsanlagen sind wiederum Fertigungsmittel notwendig. Werkzeugmaschinen stellen im industriellen Umfeld die wichtigste Gruppe dieser Fertigungsmittel dar. Nicht zu Unrecht wird die Werkzeugmaschine daher auch als die „Mutter aller Maschinen“ [CIUP16; KÖHN16] bezeichnet.

Bevor in den folgenden Kapiteln ein grundlegender Überblick über die verschiedenen Arten von Werkzeugma-

schinen, ihren Aufbau und ihre Anwendung gegeben wird, werden daher hier zunächst kurz die wirtschaftliche Bedeutung der Werkzeugmaschinenbranche und die geschichtliche Entwicklung der Werkzeugmaschinen dargestellt. Anschließend folgt eine Einführung einiger wesentlicher Begriffe aus dem Bereich der maschinellen Metallbearbeitung.

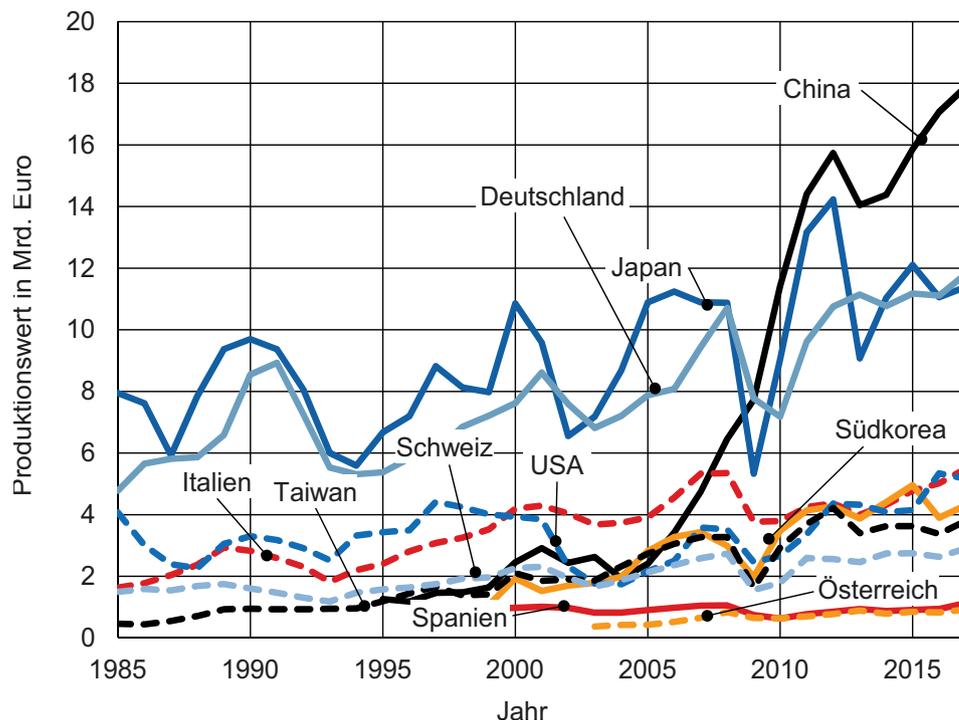
### 1.1 Volkswirtschaftliche Bedeutung der Werkzeugmaschinen

Während der Anteil der industriellen Produktion am Bruttoinlandsprodukt in den meisten westlichen Ländern und Japan seit Jahren rückläufig ist, liegt er in Deutschland mit etwa 22 % auf dem Stand von 1994 und damit gleichzeitig deutlich über dem Wert der meisten anderen europäischen Staaten [BMW16; STAT16b; STAT16a]. Der Maschinenbau wiederum ist in Deutschland nach der Automobilindustrie der zweitgrößte Industriezweig [VCI16]. Wie  Bild 1.1 zeigt,



 **Bild 1.1** Beschäftigte und Produktionswert nach Fachzweigen des Maschinenbaus (Stand 2015). Nach [VDMA15]

**Bild 1.2** Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinenproduktion der zehn führenden Herstellerländer. Nach [VDW17]



nimmt der Werkzeugmaschinenbau innerhalb dieses Sektors sowohl nach der Zahl der Beschäftigten als auch nach dem Produktionsvolumen eine führende Stellung ein, was die oben beschriebene Bedeutung der Werkzeugmaschinen für die industrielle Produktion unterstreicht. Die Fähigkeit, Produktionsmittel – und damit auch Werkzeugmaschinen – selbst herzustellen, ist für ein Land mit einem signifikanten Anteil industrieller Produktion daher von elementarer Bedeutung. **Bild 1.2** unterstreicht dies mit einer Darstellung der Entwicklung des Produktionswerts der Werkzeugmaschinenindustrie der zehn wichtigsten Herstellerländer. Deutschland und Japan sind hier seit Jahrzehnten führend und entsprechend stärker von den konjunkturellen Schwankungen betroffen als andere Länder. Neben weiteren traditionell wichtigen Werkzeugmaschinenherkunftsländern wie Italien und den USA begann Mitte der 1990er-Jahre zunächst langsam und seit Mitte des letzten Jahrzehnts mit sehr steilem Verlauf der Aufstieg Chinas zum nach Produktionswert gerechnet heute führenden Werkzeugmaschinenherstellerland.

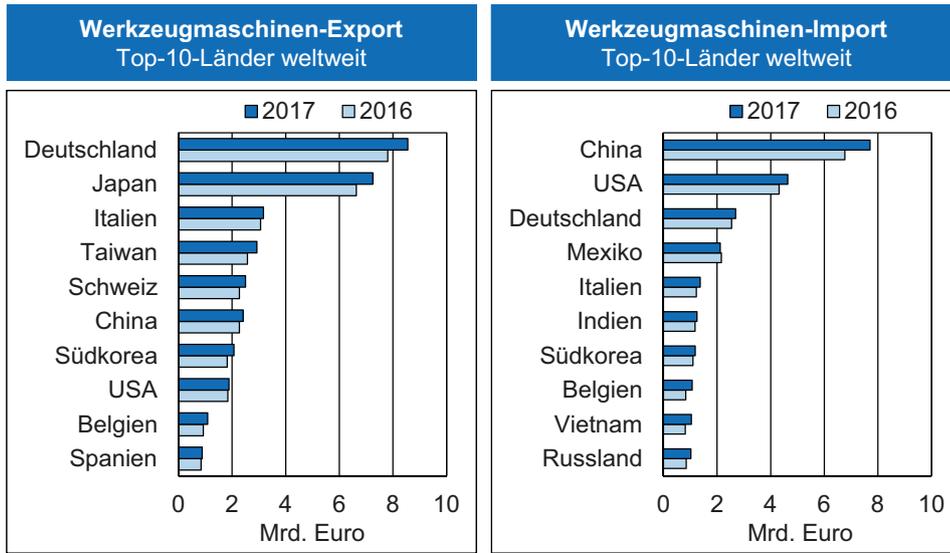
In China ist dieser Trend nur ein Aspekt des starken wirtschaftlichen Wachstums, das – wenn auch in anderen Ausmaßen – wie in den westlichen Ländern Jahrzehnte zuvor zunächst auf Industrialisierung und einem starken Ausbau der Infrastruktur basiert. Sichtbare Zeichen und gleichzeitig weitere Treiber dieser Entwicklung sind etwa die Aufnahme Chinas in die Welthandelsorganisation im Jahr 2001 und der von China in jüngster Zeit angestrebte Status einer Marktwirtschaft [DREG16] oder der Status

Chinas als größte Volkswirtschaft der Welt (Stand 2014), der sich an den kommenden Jahrzehnten weiter festigen wird [PWC16].

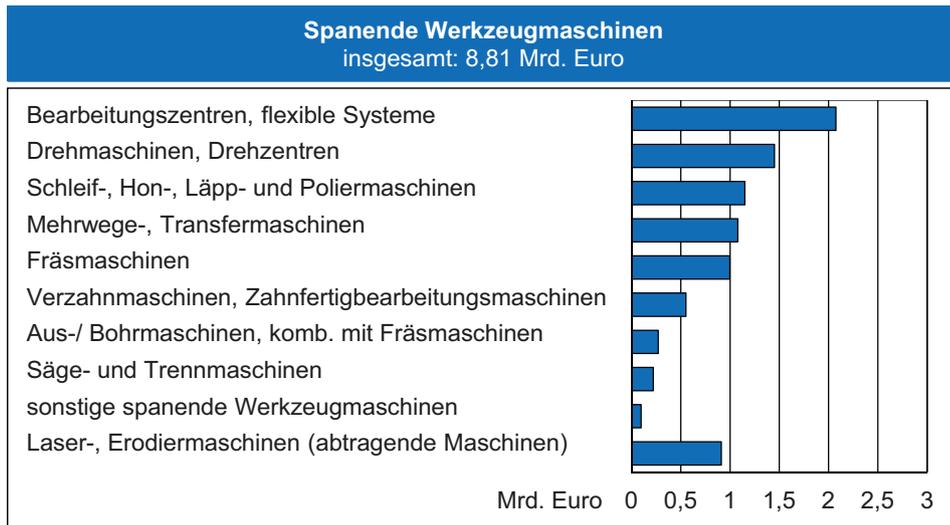
Vor allem in China und den USA ist die nationale Werkzeugmaschinenproduktion jedoch nicht ausreichend, um den heimischen Bedarf zu decken. In den USA liegt dies unter anderem in einem Trend zur Reindustrialisierung [BAIN16] und dem damit steigenden Bedarf an Werkzeugmaschinen. Neben dem – mit der allgemein stark steigenden industriellen Produktion – ansteigenden Werkzeugmaschinenbedarf in China kommt dort hinzu, dass chinesische Hersteller noch nicht das ganze Portfolio heute benötigter Werkzeugmaschinen abdecken können. Dies erklärt die führende Rolle Chinas und der USA bei dem in **Bild 1.3** dargestellten Ranking der Werkzeugmaschinenimporteure.

Weiterhin zeigt **Bild 1.3**, dass insbesondere Deutschland und Japan einen großen Teil ihrer produzierten Werkzeugmaschinen exportieren. Zusammen mit dem jeweiligen Produktionsvolumen und den vergleichsweise geringen Importen bedeutet dies, dass die Werkzeugmaschinenindustrie in diesen Ländern nicht nur der Ausrüstung der nationalen Industrie dient, sondern zum Exportvolumen beiträgt, was die wirtschaftliche Bedeutung der Branche noch verstärkt.

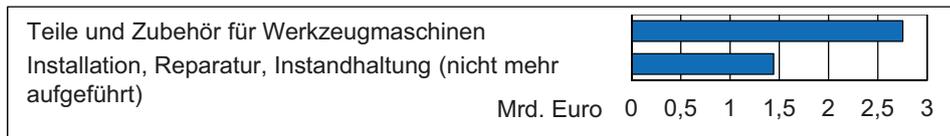
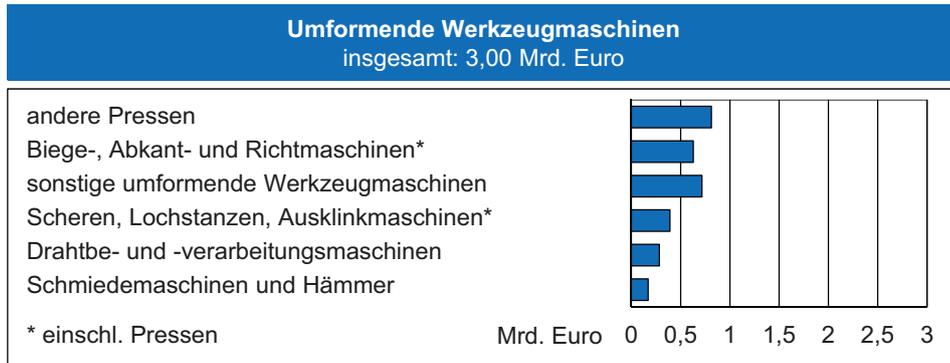
Einen tiefergehenden Einblick in die Werkzeugmaschinenindustrie in Deutschland liefert **Bild 1.4**. Dem Produktionsvolumen nach dominieren in Deutschland spanende Werkzeugmaschinen deutlich gegenüber umformenden Maschinen. Ursachen dafür sind unter anderem die viel stärkere Diversifizierung des Angebots der spanenden Werkzeugmaschinen im



**Bild 1.3** Kennzahlen des weltweiten Werkzeugmaschinenhandels. Nach [VDW17]



**Bild 1.4** Werkzeugmaschinenproduktion 2016 in Deutschland nach Maschinenart. Nach [VDW17]



Vergleich zu den umformenden Maschinen sowie der größere Bedarf an spanenden Maschinen, der sich nicht zuletzt aus der größeren Verbreitung solcher Maschinen und der größeren Nachfrage nach den damit hergestellten Bauteilen ergibt. Weiterhin zeigen die Grafiken, dass – nicht zuletzt wegen der Langlebigkeit vieler Werkzeugmaschinen als Investitionsgut – das Geschäft mit Service und Ersatzteilen ein wesentliches Standbein der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie ist.

Entsprechend der wirtschaftlichen Bedeutung der spanenden Werkzeugmaschinen in Deutschland und der großen Vielfalt in dieser Gruppe, liegt hier der Schwerpunkt bei den Beschreibungen der einzelnen Maschinentypen in den folgenden Kapiteln.

## 1.2 Historische Entwicklung der Werkzeugmaschinen

Durch zahlreiche Funde aus vorgeschichtlichen Zeitabschnitten, durch bildliche und schriftliche Überlieferungen sowie historische Sammlungsgegenstände lässt sich die Entwicklung der Bearbeitungsmaschinen rekonstruieren: Die ersten Werkzeuge waren Meißel und Schabewerkzeuge, deren Wirkung schon bald durch Hebel- und Keileffekte verstärkt wurde. Die ältesten gefundenen Bohrwerkzeuge stammen aus der Steinzeit. Bei diesen Bohrern war am Ende eines Holzstabes ein Feuerstein befestigt, der als Schneid-diente. Der Stab war von der Seele eines Fiedelbogens umwickelt, mit dem das Werkzeug durch Hin- und Herbewegen in Drehung versetzt wurde [SPRI41].

Erste Erwähnungen einer Drehmaschine in ihrer primitivsten Form finden sich schon in den homerischen Gedichten aus dem achten Jahrhundert v. Chr. Auch sie wurde über einen Fiedelbogen angetrieben, was bis zum 15. Jahrhundert eines der wichtigsten Antriebsprinzipien darstellte. Daneben erlangte die fußgetriebene Wippe als Antrieb von Bearbeitungsgeräten größere Bedeutung [WITT60].

Insgesamt schritt die Entwicklung mechanischer Bearbeitungsmaschinen vor Beginn der industriellen Revolution nur langsam voran, was nicht zuletzt im Fehlen geeigneter Werkstoffe für die Bauteile der Maschinen begründet war. Die Entwürfe Leonardo da Vincis (1452 bis 1519) waren ihrer Zeit weit voraus. Da zu seiner Zeit Gusseisen ein noch relativ selten eingesetzter Werkstoff war, wurden die meisten Maschinen in Holzbauweise ausgeführt, was unter anderem eine geringe Genauigkeit der Maschinen – bedingt durch die geringe Steifigkeit und den natürlichen Verzug – zur Folge hatte [SPRI41].

Den eigentlichen Durchbruch für die Entwicklung leistungsfähiger Werkzeugmaschinen, mit denen metallische Werkstücke bearbeitet werden konnten, brachte die Weiterentwicklung der 1712 von Thomas Newcomen erfundenen Dampfmaschine. James Watt optimierte in der zweiten

Hälfte des 18. Jahrhunderts den Wirkungsgrad der Dampfmaschinen und trug damit zur industriellen Revolution bei. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, die bisher ausschließlich mit Muskelkraft angetriebenen Maschinen motorisch anzutreiben und so deren Leistung um ein Vielfaches zu steigern.

1774 stellte der Engländer John Wilkinson auf der Grundlage einer Erfindung von John Smeaton aus dem Jahre 1765 eine Zylinderbohrmaschine vor, die als erste Metallbearbeitungsmaschine oder Werkzeugmaschine bezeichnet werden kann. Mit ihr konnte die Arbeitsgenauigkeit wesentlich gesteigert werden, sodass die ersten sinnvoll einsetzbaren Dampfmaschinenzylinder für James Watt auf dieser Maschine gebohrt wurden [WITT60]. Im Jahre 1776 schrieb Matthew Boulton an seinen Partner Watt: „Mr. Wilkinson hat uns verschiedene Zylinder fast ohne Fehler gebohrt, derjenige von 50 Zoll Durchmesser, den wir in Tipton aufgestellt haben, weicht an keiner Stelle um die Dicke eines alten Schilingsstückes ab“ [ROE26].

1794 entwickelte Henry Maudslay die erste Bett-drehmaschine. Er nutzte die Führungsbahn des Reitstockes ebenfalls zur Führung des Werkzeugträgerschlittens, dessen Lagerung bisher fest mit dem Reitstock verbunden war, wodurch die Steifigkeit der Werkzeugführung wesentlich erhöht werden konnte. Mit der Mechanisierung des Vorschubes durch eine Leitspindel konnten die Arbeitsgenauigkeit und die Produktivität gesteigert werden [WITT60].

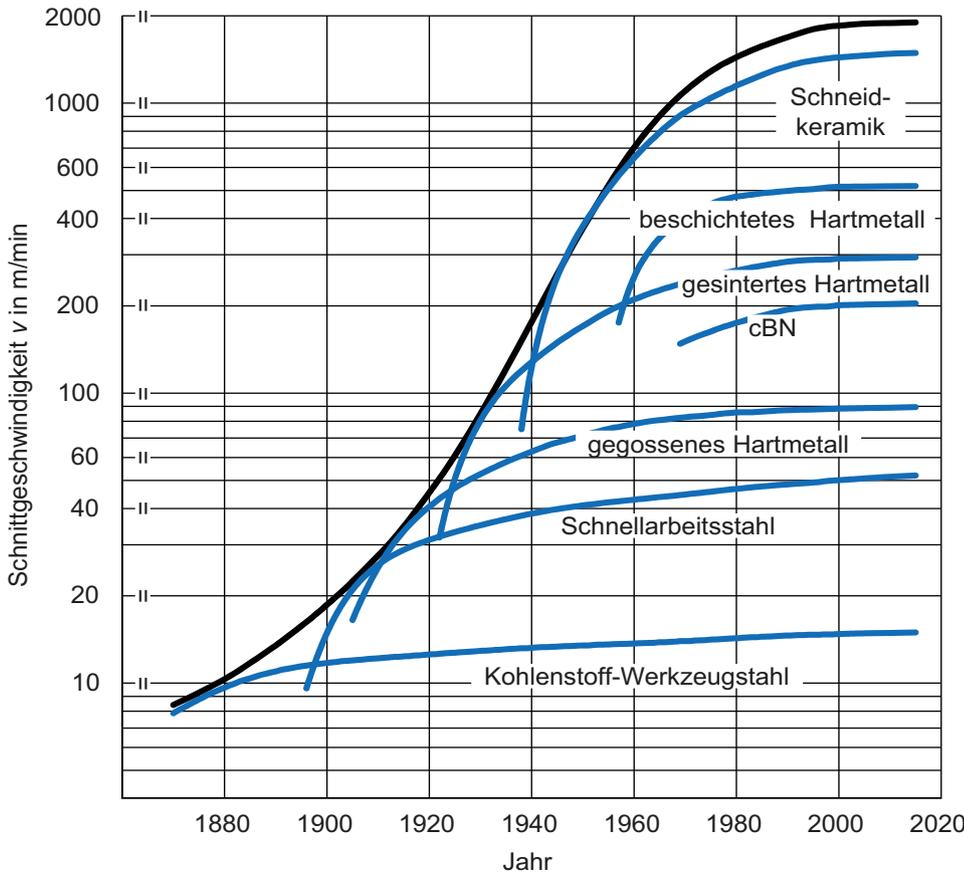
Ein weiterer wesentlicher Schritt zur maschinellen Bereitstellung mechanischer Antriebsenergie waren die Erfindungen des atmosphärischen Gasmotors 1864 durch Nicolaus August Otto und des 4-Takt-Motors im Jahre 1876. Durch diese wurde die Dampfmaschine in den folgenden Jahrzehnten wegen ihres schlechten Wirkungsgrads in vielen – vor allem mobilen – Anwendungen verdrängt. Die Maschinenhallen der Produktionsstätten waren jedoch weiterhin durch die Transmissionsantriebe geprägt, die die Energie von einer zentralen Arbeitsmaschine auf die einzelnen Werkzeugmaschinen übertragen. Erst der im Jahre 1889 erfundene Drehstrommotor löste langsam die Transmissionsantriebe durch Einzelantriebe ab [WZL86].

Die Entwicklung der wichtigsten Arten von Standardwerkzeugmaschinen, wie Dreh-, Hobel-, Stoß-, Bohr- und Fräsmaschinen, war bis zum Ende des 19. Jahrhunderts im Wesentlichen abgeschlossen [WZL86].

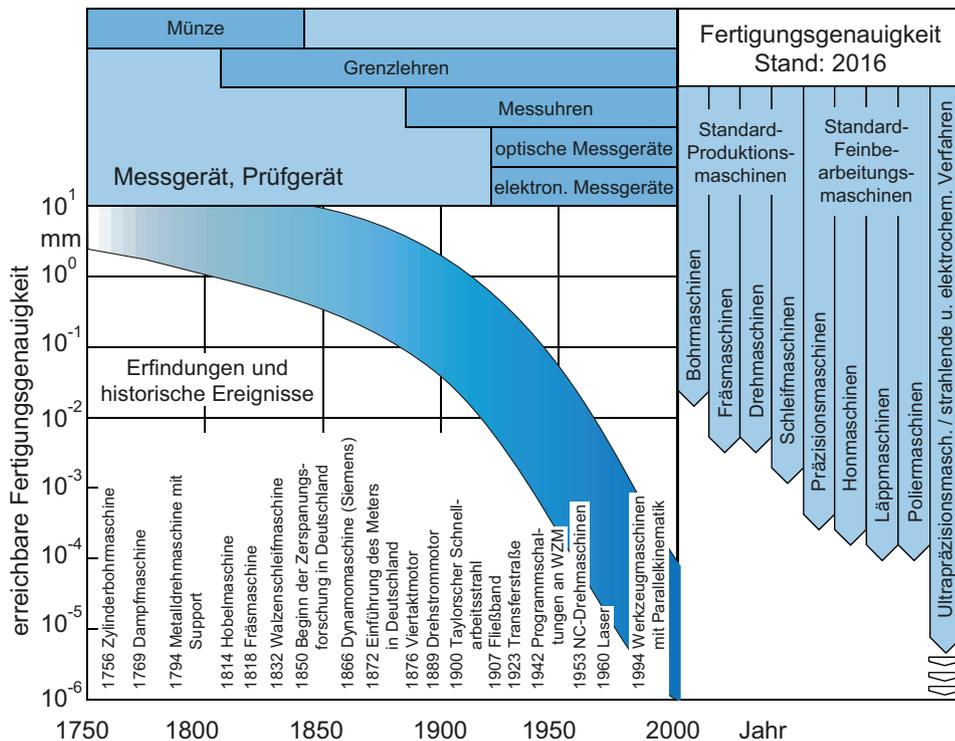
Neben den Entwicklungen bei den Werkzeugmaschinen selbst ist die Verfügbarkeit geeigneter Bearbeitungswerkzeuge von zentraler Bedeutung für die Werkstückbearbeitung. Ein wichtiger Schritt war hierbei die Entwicklung des Schnellarbeitsstahls durch den Amerikaner Frederic Winslow Taylor, der im Jahre 1900 auf der Pariser Weltausstellung vorgestellt wurde. Durch Zulegieren von 3,8 % Chrom, 8 % Wolfram sowie Anteilen von Vanadium und Molybdän behielt der Werkzeugstahl seine Schneidfähigkeit bis zu Arbeitstempera-

turen von 600 °C. Die Schnittgeschwindigkeit konnte im Vergleich zum reinen Kohlenstoff-Werkzeugstahl um das Drei- bis Fünffache gesteigert werden [WZL86].

■ Bild 1.5 zeigt die geschichtliche Entwicklung der maximal erreichbaren Schnittgeschwindigkeit für die Bearbeitung von Baustahl in Abhängigkeit des eingesetzten Schneidstoffs.

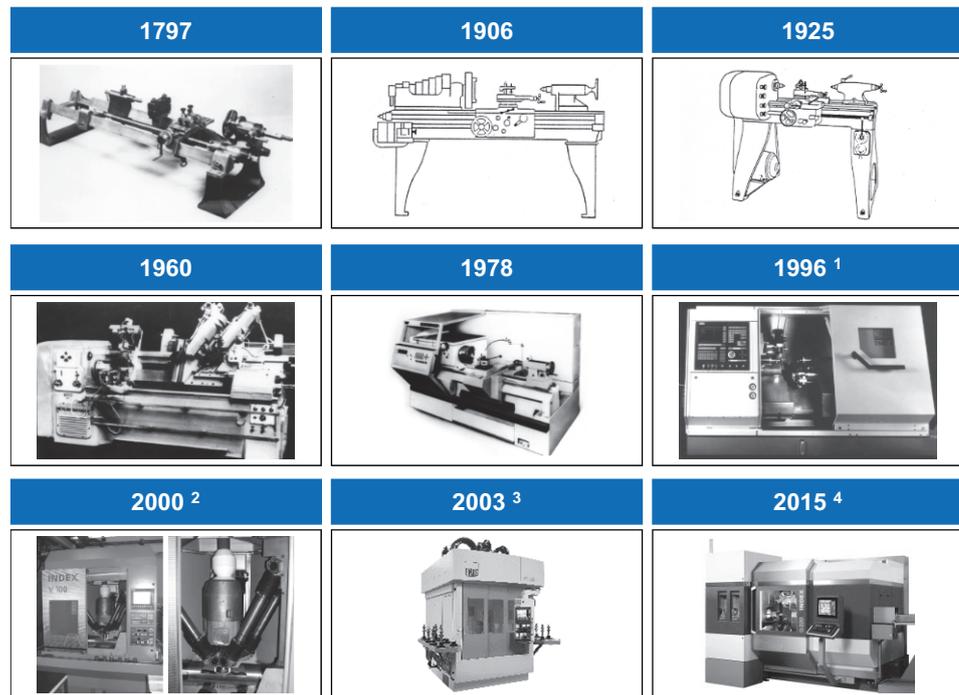


■ Bild 1.5 Trendentwicklung der Schnittgeschwindigkeiten beim Drehen von Baustahl



■ Bild 1.6 Entwicklungsgeschichtlicher Überblick über die erreichbaren Fertigungsgenauigkeiten von Werkzeugmaschinen

■ Bild 1.7 Geschichtliche Entwicklung der Drehmaschine.  
Quellen: <sup>1</sup>Traub, <sup>2,4</sup>INDEX, <sup>3</sup>EMAG



Mit der Verbesserung der Schneidstoffe stiegen auch die Anforderungen an die Werkzeugmaschinen. Höhere Antriebskräfte, höhere Arbeitsspindeldrehzahlen, steifere sowie höher belastbare Führungen, Arbeitsspindeln und Gestellbauteile sowie verbesserte Getriebe wurden benötigt. Die Maschinen- und Werkzeugentwicklung waren und sind somit sich gegenseitig begünstigende und antreibende Aspekte des Fortschritts der maschinellen Metallbearbeitung. So ermöglichen etwa Schneidkeramiken Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten, bei deren Realisierung die Grenze der Leistungsfähigkeit der zurzeit verfügbaren Spindellagerungen und Vorschubsysteme erreicht wird. Zusätzlich werden Beschichtungstechnologien genutzt, um die Leistungsfähigkeit von Hartmetallen zu erhöhen.

Mit der fortschreitenden Maschinen- und Werkzeugentwicklung sind auch die Anforderungen an die erzielbaren Fertigungsgenauigkeiten gestiegen, wie ■ Bild 1.6 verdeutlicht. Zur Darstellung der großen Spanne der Fertigungsgenauigkeiten wurde eine logarithmische Skalierung gewählt. Auf der Zeitachse sind einige markante technische Ereignisse und Erfindungen aufgeführt. Parallel zu der Verbesserung der erreichbaren Maschinengenauigkeit mussten auch entsprechende Messmittel entwickelt werden, die zum Nachweis der Fertigungsqualitäten erforderlich sind. Diese Entwicklung ist am oberen Rand des Diagramms dargestellt. Der rechte Teil des Bildes zeigt die mit den heute üblichen Fertigungsverfahren realisierbaren Bauteilgenauigkeiten. Die physikalische Grenze der erreichbaren Genauigkeit ist bei Ultrapräzisionsmaschinen durch den Kristallaufbau bzw. den Atomgitterabstand des zu bearbeitenden Werkstoffes vorgegeben.

■ Bild 1.7 erläutert am Beispiel der Drehmaschine die Werkzeugmaschinenentwicklung der letzten zwei Jahrhunderte. Die erste Schraubendrehbank von Maudslay (1797) bestand aus einer genau bearbeiteten, 3 Fuß (etwa 0,9 m) langen Doppelprismenführung, einem Spindelstock mit mitlaufender Spitze und einer Leitspindel, die vom Hauptantrieb über Zahnräder angetrieben wurde. Der Vorschub pro Umdrehung konnte durch Austausch der Leitspindel variiert werden. Auffallend ist die Lage der Arbeitsspindel auf der rechten Seite; sie ist aus Gründen besserer Bedienbarkeit heutzutage links angeordnet.

Die Drehmaschine aus dem Jahr 1906 zeigt den noch heute typischen Grundaufbau von Drehmaschinen. Ihr Konzept wurde von Drechselbänken, wie sie in Holzverarbeitenden Handwerksbetrieben eingesetzt wurden, abgeleitet. Durch Umlegen des Transmissionsriemens auf die unmittelbar auf der Drehspindel montierten Riemenscheiben unterschiedlicher Durchmesser konnten verschiedene Spindeldrehzahlen eingestellt werden. Die Abhängigkeit von der Transmissionsanlage und der zentral angeordneten Arbeitsmaschine band die Werkzeugmaschine an einen bestimmten Aufstellungsort.

Die Drehmaschine von 1925 wies diesen Nachteil nicht mehr auf. Sie wurde von einem eigenen, im Gestellfuß untergebrachten, Elektromotor angetrieben. Unterschiedliche Spindeldrehzahlen waren durch ein Zahnradschaltgetriebe einstellbar. Das Schaltgetriebe war in dem als geschlossener Kasten ausgeführten Spindelstock untergebracht.

Die 1960 gebaute Drehmaschine besaß eine geschlossene Gestellform, die den Forderungen nach hoher Steifigkeit ent-

sprach. Ihre nahezu senkrechte Bettanordnung ermöglichte einen ungehinderten Spänefall. Die Maschine war mit einer hydraulischen Nachformeinrichtung versehen, mit der beliebige Werkstückkonturen automatisch hergestellt werden konnten. Die Steuerungsbefehle für die Vorschubbewegungen wurden durch Abtasten einer Schablone oder eines Meisterwerkstückes erzeugt. Diese Art der automatischen Vorschubsteuerung wurde lange Zeit erfolgreich in der Klein- sowie Großserienfertigung eingesetzt. Seit Beginn der 1970-Jahre wurde sie von den flexiblen numerischen Steuerungen verdrängt.

Die Drehmaschine der Firma Gildemeister aus dem Jahr 1978 war numerisch gesteuert. Sie erhielt ihre Steuerungsinformationen von digitalen Datenträgern, wie z. B. Lochstreifen oder Magnetkassetten. Die Steuerungsbefehle wurden in Form von alphanumerischen Zeichen vorgegeben. Mithilfe des Bedienfeldes konnte die Maschine über Tastendruck gesteuert werden. Die üblichen Handräder zum Verfahren der Vorschubschlitten fehlten an dieser Maschine. Die Steuerprogramme für die Teilefertigung konnten an separaten Programmierplätzen offline erstellt werden. Ebenfalls war eine Programmierung am Bedienfeld der Maschine möglich, die sogar während der Bearbeitung eines anderen Werkstückes durchgeführt werden konnte.

Das Drehzentrum der Firma Traub aus dem Jahre 1996 wies viele konstruktive und steuerungstechnische Änderungen gegenüber den zuvor beschriebenen Maschinen auf. Als äußeres Merkmal fällt die völlige Kapselung der Maschine auf. Die Maschinensteifigkeit konnte durch die Schrägbettkonstruktion wesentlich erhöht werden. Gleichzeitig diente das Schrägbett einer guten Spanabfuhr, die für automatisch arbeitende Produktionsmaschinen eine notwendige Forderung darstellt. Durch den Einsatz von Werkzeugrevolvern und angetriebenen Werkzeugen konnten auf dieser Maschine komplizierte Werkstücke komplett bearbeitet werden. Die Steuerung der Maschine war eine auf Mikroprozessorbasis aufgebaute NC-Steuerung, die viele Zusatzfunktionen besaß: So konnten die NC-Programme beispielsweise mittels graphischer Bearbeitungssimulation auf dem Bildschirm der Steuerung dargestellt und auf Programmierfehler überprüft werden. Die Maschine war durch das konstruktive und steuerungstechnische Konzept für den Einsatz in flexiblen Fertigungssystemen vorbereitet. Mithilfe von Handhabungseinrichtungen konnten Werkstücke, Werkzeuge und die Spannbacken des Spannfutters automatisch gewechselt werden. Die Maschine besaß viele Überwachungs- und Diagnosefunktionen sowie integrierte Sensorik, die einen einwandfreien Ablauf der automatischen Produktion und eine schnelle Fehlerdiagnose sicherstellten. Mit den Möglichkeiten der Ferndiagnose und der Betriebsdatenerfassung konnten Statusinformationen der Maschine zu jeder Zeit von einer externen Servicestation abgefragt und ausgewertet werden, was einen ersten Schritt zur Fernwartung von Werkzeugmaschinen darstellte [HEKE85; ZEPP86].

Diese Entwicklung findet heute durch die Anbindung von Werkzeugmaschinen an das Internet ihre Fortsetzung. Damit können beispielsweise große Datenmengen mit Informationen über den Zustand der Maschine übermittelt werden, was eine Voraussetzung für die Realisierung vorausschauender Wartungsstrategien ist.

Die Maschine V100 der Firma Index aus dem Jahr 2000 verfügt über eine vertikal angeordnete Hauptspindel sowie ein neues Kinematikkonzept. Mittels einer parallelen Stabkinematik (vergrößert dargestellt) wird eine vollständig dreidimensionale Beweglichkeit der hängenden Motorspindel im Raum erzielt. Diese ermöglicht es, das Werkstück mit der Spindel zu greifen (Pick-Up-Spindel) und mit maximaler Geschwindigkeit zu den stehenden Werkzeugen zu bringen. Durch kurze Verfahrswege sowie hohe Eilanggeschwindigkeiten werden die werkstück- und werkzeugbezogenen Nebenzeiten stark gesenkt.

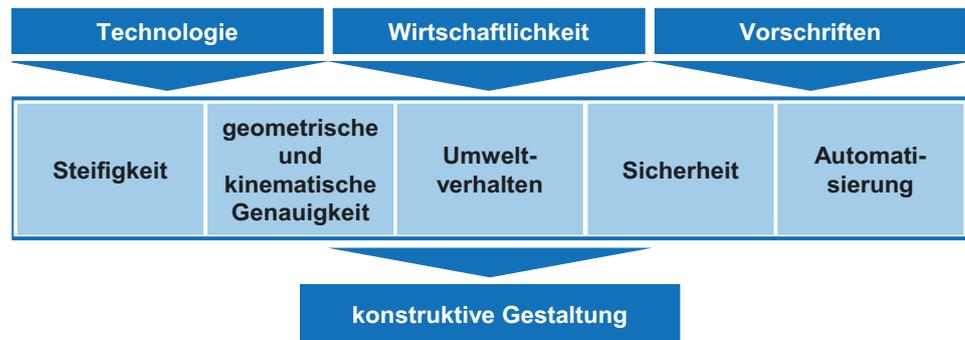
Das Drehzentrum der Firma EMAG aus dem Jahr 2003 ist ebenfalls mit einer vertikal angeordneten Pick-Up-Spindel ausgerüstet. An den Seiten der Maschine sind Rohteilspeicher sowie Fertigteilenspeicher angebracht. Durch zwei zeitparallel arbeitende Greifer wird das Fertigteil entnommen und ein neues Werkstück in die Maschine eingelegt, wodurch eine Verringerung der Nebenzeiten erzielt wird. Der Grundkörper der Maschine besteht aus Polymerbeton, der Schwingungen dämpft und somit bessere Oberflächengüten und längere Werkzeugstandzeiten ermöglicht.

Bei der Index G220 aus dem Jahr 2015 handelt es sich ebenfalls um eine Maschine zur kombinierten Dreh- und Fräsbearbeitung. Sie verfügt neben einem Revolver mit stehenden Werkzeugen über eine zusätzliche Frässpindel zur Werkstückbearbeitung. Weiterhin ist sie mit zwei Hauptspindeln ausgerüstet, die die gleichzeitige Bearbeitung zweier Werkstücke sowie das Übergeben eines Werkstücks von einer Spindel an die andere und somit die Komplettbearbeitung ohne externe Werkstückhandhabung ermöglichen.

### 1.3 Grundlegende Anforderungen an Werkzeugmaschinen

Im Umfeld moderner industrieller Produktion werden vielfältige Anforderungen an Werkzeugmaschinen gestellt. Aus betrieblicher Sicht betrifft dies vor allem die technische Eignung der Maschine für die damit durchzuführenden Prozesse sowie betriebswirtschaftliche Aspekte wie etwa die Stück- oder Lebenszykluskosten. Gleichzeitig werden durch den Staat und die Gesellschaft etwa in Form von Gesetzen Anforderungen an die Maschinen gestellt, die beispielsweise die Benutzersicherheit oder die Umwelteigenschaften der Maschine betreffen. Wie  Bild 1.8 zeigt, haben alle diese Anforderungen Auswirkungen auf die konstruktive Gestaltung von Werkzeugmaschinen.

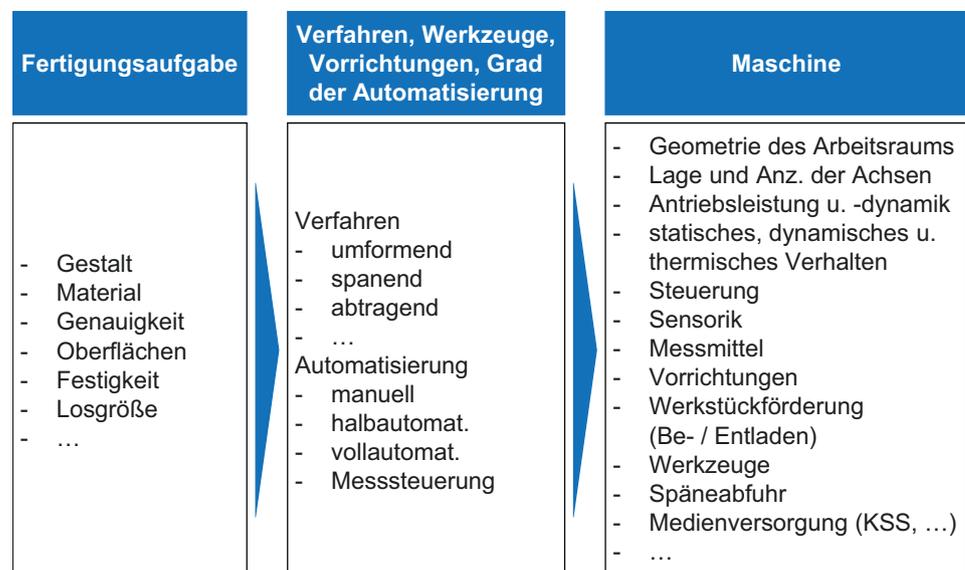
▣ Bild 1.8 Anforderungsschwerpunkte bei Werkzeugmaschinen



Die an der Bearbeitungsstelle der Maschine auftretenden genauigkeitsbeeinflussenden Verlagerungen werden durch das statische, dynamische und thermische Verhalten sämtlicher im Kraftfluss liegender Baugruppen beeinflusst. Die Fertigungsgenauigkeit, die Oberflächengüte der Werkstücke sowie die ausnutzbare Maschinenleistung und die daraus resultierende Produktivität hängen von diesen Maschineneigenschaften ab. Darüber hinaus wird der wirtschaftliche Einsatz durch den Automatisierungsgrad bestimmt. Die Automatisierung beschränkt sich nicht nur auf den Ablauf des eigentlichen Bearbeitungsprozesses, sondern auch auf die Beschickung der Maschinen, d. h. die Zu- und Abfuhr von Werkstücken, Werkzeugen und Spänen.

Rechtliche Rahmenbedingungen sind etwa Vorgaben von Berufsgenossenschaften zur Arbeitsplatzsicherheit oder staatliche Verordnungen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei seit einigen Jahren die sogenannte europäische Maschinenrichtlinie (kurz: MRL, 2006/42/EG), die zunächst die sicherheitsgerechte Gestaltung von Maschinen und Anlagen zum Schwerpunkt hatte und in den letzten Jahren um Regelungen zum Umweltschutz erweitert wurde.

▣ Bild 1.9 zeigt, dass bei der Auslegung einer Werkzeugmaschine sämtliche Aspekte der damit durchzuführenden Fertigungsaufgaben beachtet werden müssen, um eine bestmögliche Eignung für die dazu notwendigen Prozesse zu erreichen. Zunächst sind die Leistungsmerkmale des Fertigungsverfahrens zu definieren. Entsprechend der Fertigungsaufgabe und des gewählten Verfahrens sind die arbeitsraumbestimmenden Kenngrößen wie Anzahl und Lage der Bewegungsachsen und die funktionalen Eigenschaften der Bearbeitungseinheiten (z. B. Drehzahlbereich, Drehmomente) festzulegen. Die geforderte Genauigkeit und Oberflächengüte der Werkstücke bestimmen die statischen und dynamischen Steifigkeitsanforderungen an die einzelnen Baugruppen. Die leistungs- und belastungsmäßige Auslegung der Maschinenkomponenten ist von dem Spektrum der Arbeitsaufgaben abhängig. Die Vielfalt der zu bearbeitenden Werkstücke und deren Losgrößen bestimmen den Grad der Automatisierung. Weiterhin sind bei der Gestaltung der Werkzeugmaschine sämtliche zur Produktion notwendigen Hilfsmittel, insbesondere die Spannzeuge sowie die Mess- und die Transporteinrichtungen, zu berücksichtigen.



▣ Bild 1.9 Gesichtspunkte bei der Auswahl und Konstruktion von Werkzeugmaschinen für bestimmte Fertigungsaufgaben

## 1.4 Begriffliche Gliederung der Fertigungsverfahren und Werkzeugmaschinen

### 1.4.1 Einteilung der Fertigungsverfahren

Entsprechend der vielfältigen Einsatzbereiche von Werkzeugmaschinen gibt es eine große Bandbreite unterschiedlicher Maschinen. Über die Jahrzehnte der Entwicklung wurde es daher sinnvoll, die historisch gewachsenen Begriffe zu systematisieren und eindeutig festzulegen. Die Gliederung und Bezeichnungen der Werkzeugmaschinen orientieren sich dabei an der begrifflichen Systematik der Fertigungsverfahren zur Metallbearbeitung, die in der Norm DIN 8580 festgelegt sind,  Bild 1.10 [DIN03].

### 1.4.2 Einteilung der Werkzeugmaschinen

Die Gliederung, Einteilung und Bezeichnung der Werkzeugmaschinen sind durch die zurückgezogene DIN 69651 festgelegt worden [DIN81].  Bild 1.11 zeigt die Einordnung der Werkzeugmaschinen in die Gruppe der Fertigungssysteme.

Werkzeugmaschinen werden definiert als „... mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen“ [DIN81]. Sie werden als Elemente von Fertigungsanlagen verstanden.

Die Einteilung der Fertigungsanlagen ist an die Gliederung der Fertigungsverfahren für die Metallbearbeitung nach DIN 8580 angelehnt. Wie aus  Bild 1.11 ersichtlich

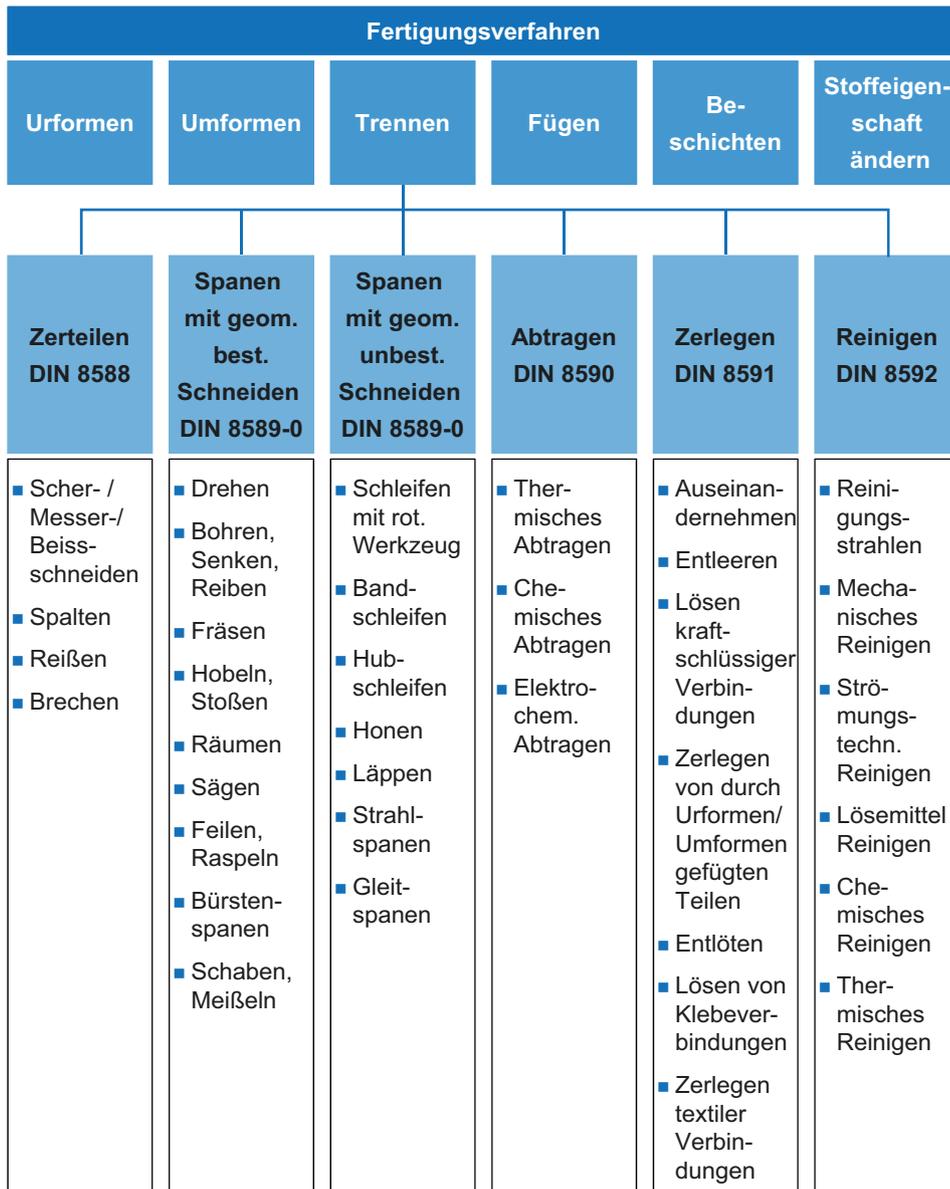


 Bild 1.10 Gliederung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN03]