

Reimund Neugebauer (Hrsg.)

Werkzeugmaschinen

Aufbau, Funktion und Anwendung
von spanenden und abtragenden
Werkzeugmaschinen



 Springer Vieweg

VDI

Werkzeugmaschinen

Reimund Neugebauer
(Hrsg.)

Werkzeugmaschinen

Aufbau, Funktion und Anwendung von
spanenden und abtragenden
Werkzeugmaschinen

Herausgeber

Prof. Reimund Neugebauer
Institut für Werkzeugmaschinen und
Produktionsprozesse (IWP)
Technische Universität Chemnitz
Chemnitz
Deutschland

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft zur
Förderung der angewandten Forschung e.V.
München
Deutschland

ISBN 978-3-642-30077-6 ISBN 978-3-642-30078-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-30078-3

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die herausragende Stellung der Werkzeugmaschinen im Bereich der Produktionstechnik begründet sich in ihren einzigartigen Funktionen. Sie sind Basis für die Herstellung aller anderen Maschinen und deren Komponenten im weitesten Sinne, für die Fertigung von Werkzeugen und stellen die Grundlage für ihre eigene Vervollkommnung und Produktion dar. Viele attraktive Investitions- und Konsumgüter sind produktiv, kostengünstig und ressourcenschonend nur mit innovativen Fertigungsverfahren und auf ebensolchen Werkzeugmaschinen herstellbar. Das weltweite Streben nach Wohlstand erfordert wirtschaftliche Entwicklung sowie zukunftsfähige Mobilität und Energie. Die Produktion bei Verknappung der Ressourcen zu erhöhen und in sich geschlossene Kreisläufe für Material und Energie zu schaffen, sind Aufgaben, zu denen auch zukünftig der Werkzeugmaschinenbau entscheidend beitragen muss. Dies sollte auch als Chance für Ingenieurskunst und globale Technologieführerschaft – das Ausbalancieren von Ökologie und Ökonomie – verstanden werden.

Das vorliegende Buch richtet sich vornehmlich an Leser zur Unterstützung der Ausbildung in produktionstechnischen Studiengängen und zur beruflichen Weiterbildung. Es eignet sich zudem als Nachschlagewerk für den praktisch tätigen Anwender und Entwickler von Werkzeugmaschinen. Es vermittelt akademisches Wissen in didaktisch aufbereiteter Form. Die Vielfalt der ausgeführten Werkzeugmaschinen und möglichen Funktionsprinzipien ihrer Baugruppen einschließlich der Automatisierungseinrichtungen lässt eine umfassende Darstellung in einem Buch jedoch nicht zu. Ziel ist daher nicht die Vollständigkeit sondern ein guter Überblick und eine einheitliche Methodik, mit der auch nicht dargestellte Werkzeugmaschinen analysiert werden können. Durch das Buch zieht sich dabei das prinzipielle Verständnis, dass sich der Aufbau von Werkzeugmaschinen und ihrer Baugruppen immer aus den an sie gestellten Anforderungen hinsichtlich Kinematik, Genauigkeit und Leistungsvermögen ergibt. Demzufolge wiederholt sich die Herangehensweise, dass insbesondere die Maschinen von „innen nach außen“, also ausgehend von Prozessbeschreibungen und Werkstückspektren über Werkzeug- und Werkstückschnittstellen bis zu Strukturen der Gestelle bzw. Bauformen betrachtet werden.

Für die Beschreibung des Aufbaus und einer wirtschaftlichen Anwendung von Einzelmaschinen und Mehrmaschinensystemen stellen die ersten drei Kapitel in diesem Sinn die Grundlage dar. Dabei konzentriert sich Kap. 1 auf die volkswirtschaftliche Bedeutung des Werkzeugmaschinenbaus, bietet eine aktuelle Definition und schließt mit einer Auflistung

von Anforderungen und Bewertungskriterien, die potentielle Anwender an Werkzeugmaschinen stellen. Mit einer Klassifizierung und der Darlegung einer systematischen Herangehensweise zum Finden von Aufbaustrukturen am Beispiel spanender Werkzeugmaschinen beschäftigt sich Kap. 2. Fertigungstechnische Anforderungen an spanende Werkzeugmaschinen, deren Beurteilung hinsichtlich gesetzlicher Vorgaben und die Maschinenabnahme sind Schwerpunkte im Kap. 3. Darauf aufbauend und im Hinblick auf ein zukünftiges Buch zu umformenden Werkzeugmaschinen werden im Weiteren ausgeführte Maschinen ausschließlich an Beispielen spanender und abtragender Maschinen vorgestellt.

Im Kap. 4 werden die fertigungstechnischen Anforderungen für jede Maschinenklasse spanender Werkzeugmaschinen hergeleitet sowie ihre typischen Merkmale und Kenngrößen dargestellt. Einem Überblick zu ausgeführten Bauformen schließt sich jeweils die Beschreibung ausgewählter, repräsentativer Maschinentypen an. Dabei werden Aufbau, Funktionsweise und mitunter spezifische Baugruppen näher betrachtet. Dies geschieht mithilfe von bildhaften und funktionsbeschreibenden Darstellungen zahlreicher aktueller praktischer Beispiele.

Im Mittelpunkt von Kap. 5 stehen abtragende Werkzeugmaschinen zum chemischen, elektrochemischen (ECM) und thermischen (EDM, Laserbearbeitung) Abtragen. Das Wasserstrahl-schneiden wird als mechanisches Abtragen aufgrund großer Ähnlichkeiten hinsichtlich des Abtragprinzips, der Verfahrenskinetik und des Anlagenaufbaus mit hinzu gezählt. Die aufgeführten Verfahren werden wiederum zunächst beschrieben und daraus die Anforderungen an den Aufbau der abtragenden Werkzeugmaschinen hergeleitet.

Die Verkettung einzelner Maschinen zu Mehrmaschinensystemen wird im Kap. 6 erläutert. Beginnend mit der Darstellung von Systemgrundlagen folgt eine Darstellung von technologie- und anordnungsorientierten Strukturierungsmöglichkeiten der Maschinenverkettung. Anschließend werden die wichtigsten Baugruppen und Elemente der Maschinenverkettung beschrieben und die gegebenen Informationen am Beispiel von ausgewählten Mehrmaschinensystemen zusammengefasst.

Das Kap. 7 setzt mit Ausführungen zu Funktionsprinzipien, Auswahl- und Auslegungskriterien der funktionsbestimmenden Baugruppen – Hauptspindeln, Antriebe, Führungen, Gestelle und Steuerungen – einen weiteren inhaltlichen Schwerpunkt des Buches.

Das vorliegende Buch entstand unter maßgeblicher Mitwirkung meiner Mitarbeiter an der Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik der TU Chemnitz Dr.-Ing. *Arvid Hellmich*, Dr.-Ing. *Andreas Hirsch*, Dipl.-Ing. *Michael Müller*, Dipl.-Ing. *Joachim Regel*, Dr.-Ing. *Markus Richter* und Dr.-Ing. *Volker Wittstock*. Für die Koordinierung der Arbeiten am Buch waren Dr.-Ing. *Andreas Hirsch* und Dipl.-Ing. *Joachim Regel* verantwortlich. Die umfangreiche Bearbeitung der Bilder lag in den Händen von Frau Dipl.-Ing. (FH) *Karin Eßbach* und Frau *Sabine Uhlig*. Allen Genannten danke ich für das gezeigte Engagement sehr herzlich.

Ein besonderer Dank gilt den am Ende des Buches aufgeführten Firmen, die eine Vielzahl der bildlichen Darstellungen für dieses Buch zur Verfügung gestellt haben.

Inhalt

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| | Joachim Regel | |
| 1.1 | Historische Entwicklung und Definition | 1 |
| 1.2 | Bedeutung der Produktionstechnik und der Werkzeugmaschinen-Industrie | 5 |
| 1.3 | Anforderungen an Werkzeugmaschinen aus Anwendersicht | 9 |
| | Verständnisfragen | 12 |
| | Literatur | 13 |
| 2 | Klassifizierung und Aufbau von Werkzeugmaschinen | 15 |
| | Joachim Regel | |
| 2.1 | Klassifizierung von Werkzeugmaschinen | 15 |
| 2.2 | Aufbau reihenstrukturierter und parallelkinematischer Werkzeugmaschinen | 20 |
| | Verständnisfragen | 27 |
| | Literatur | 28 |
| 3 | Anforderungen an Werkzeugmaschinen und ihre Beurteilung | 29 |
| | Andreas Hirsch und Markus Richter | |
| 3.1 | Fertigungstechnische Anforderungen an Werkzeugmaschinen | 29 |
| | 3.1.1 Spanende Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide | 40 |
| | 3.1.2 Spanende Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide | 45 |
| 3.2 | Europäische Sicherheitsgesetzgebung | 52 |
| 3.3 | Abnahme von Werkzeugmaschinen | 57 |
| | Verständnisfragen | 66 |
| | Literatur | 67 |
| 4 | Ausgewählte spanende Werkzeugmaschinen | 69 |
| | Joachim Regel und Michael Müller | |
| 4.1 | Bohrmaschinen | 71 |
| | 4.1.1 Säulenbohrmaschinen | 75 |
| | 4.1.2 Radialbohrmaschinen (Auslegerbohrmaschinen) | 78 |
| | 4.1.3 Tiefbohrmaschinen | 80 |

| | |
|--|-----|
| Verständnisfragen | 86 |
| 4.2 Drehmaschinen | 86 |
| 4.2.1 Flachbettdrehmaschinen (Leit- und Zugspindeldrehmaschinen) ... | 96 |
| 4.2.2 Schrägbettdrehmaschinen | 97 |
| 4.2.3 Senkrechtdrehmaschinen | 99 |
| 4.2.4 Drehautomaten und Rundtaktzentren | 104 |
| 4.2.5 Dreh-Fräs-Bearbeitungszentren | 112 |
| Verständnisfragen | 114 |
| 4.3 Fräsmaschinen | 115 |
| 4.3.1 Fräsmaschinen in Konsolbauform | 119 |
| 4.3.2 Fräsmaschinen in Bettbauform | 121 |
| 4.3.3 Horizontal-Bohr- und Fräswerke | 128 |
| 4.3.4 Bearbeitungszentren | 132 |
| 4.3.5 Parallelkinematische Maschinen | 140 |
| Verständnisfragen | 144 |
| 4.4 Stoß-, Zieh- und Räummaschinen | 144 |
| 4.4.1 Stoß- und Ziehmaschinen | 145 |
| 4.4.2 Räummaschinen | 147 |
| Verständnisfragen | 150 |
| 4.5 Sägemaschinen | 151 |
| Verständnisfragen | 155 |
| 4.6 Schleifmaschinen | 155 |
| 4.6.1 Rundschleifmaschinen | 162 |
| 4.6.2 Planschleifmaschinen | 168 |
| 4.6.3 Werkzeugschleifmaschinen | 171 |
| Verständnisfragen | 174 |
| 4.7 Hon-, Läpp- und Poliermaschinen | 174 |
| 4.7.1 Hon- und Superfinishmaschinen | 174 |
| 4.7.2 Läpp-, Feinschleif- und Poliermaschinen | 180 |
| Verständnisfragen | 182 |
| 4.8 Ultrapräzisionsmaschinen | 183 |
| Verständnisfragen | 187 |
| 4.9 Einzweck- und Sondermaschinen | 188 |
| 4.9.1 Verzahnmaschinen | 188 |
| 4.9.2 Maschinen zur Kurbel- und Nockenwellenherstellung | 204 |
| 4.9.3 Maschinen zur Gewindeherstellung | 211 |
| 4.9.4 Mobile Dreh- und Fräsmaschinen | 212 |
| Verständnisfragen | 215 |
| Literatur | 215 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 5 | Ausgewählte abtragende Werkzeugmaschinen | 217 |
| | Joachim Regel | |
| 5.1 | Elektrochemische Bearbeitungsanlagen | 220 |
| 5.2 | Erodieranlagen | 226 |
| 5.2.1 | Senkerodieranlagen | 228 |
| 5.2.2 | Schneiderodieranlagen | 230 |
| 5.3 | Laserbearbeitungsanlagen | 232 |
| 5.4 | Wasserstrahl-Schneidanlagen | 241 |
| | Verständnisfragen | 249 |
| | Literatur | 250 |
| 6 | Mehrmaschinensysteme | 253 |
| | Volker Wittstock | |
| 6.1 | Systemgrundlagen | 254 |
| 6.2 | Struktur der Maschinenverkettung | 258 |
| 6.2.1 | Technologieorientierte Strukturierung | 258 |
| 6.2.2 | Anordnungsstrukturen | 260 |
| 6.3 | Baugruppen und Elemente der Maschinenverkettung | 263 |
| 6.3.1 | Transporteinrichtungen | 264 |
| 6.3.2 | Werkstückpaletten | 272 |
| 6.3.3 | Palettenlose Handhabung | 276 |
| 6.3.4 | Zwischenspeicher als Werkstückpuffer | 278 |
| 6.4 | Ausgewählte Mehrmaschinensysteme | 280 |
| 6.4.1 | Fertigung von rotationssymmetrischen Werkstücken | 280 |
| 6.4.2 | Fertigung von prismatischen Werkstücken | 282 |
| | Verständnisfragen | 286 |
| | Literatur | 287 |
| 7 | Aufbau und Auslegung funktionsbestimmender Werkzeugmaschinen-Baugruppen | 289 |
| | Andreas Hirsch und Arvid Hellmich | |
| 7.1 | Aufbau der Werkzeugmaschinen aus Baugruppen | 290 |
| 7.2 | Baugruppe „Hauptspindel“ | 291 |
| 7.2.1 | Anforderungen und prinzipieller Aufbau | 291 |
| 7.2.2 | Gestaltung der Lagerung des Bauteils „Hauptspindel“ | 302 |
| | Verständnisfragen | 321 |
| 7.3 | Antriebe | 322 |
| 7.3.1 | Einteilung, Aufgaben, Anforderungen | 322 |
| 7.3.2 | Hauptantriebe | 326 |
| 7.3.3 | Nebenantriebe | 340 |
| 7.3.4 | Anschaltung von Antrieben | 357 |
| 7.3.5 | Sensoren und Messsysteme in Antriebssystemen | 372 |

| | |
|---|------------|
| Verständnisfragen | 381 |
| 7.4 Führungen | 381 |
| 7.4.1 Allgemeiner Aufbau | 382 |
| 7.4.2 Funktionsprinzipien zum Trennen der Führungsflächen | 388 |
| Verständnisfragen | 420 |
| 7.5 Gestellbauteile | 420 |
| 7.5.1 Klassifizierung und Ausführung von Gestellbauteilen | 421 |
| 7.5.2 Statisches Verhalten von Gestellbauteilen | 425 |
| 7.5.3 Dynamisches Verhalten von Gestellbauteilen | 430 |
| Verständnisfragen | 434 |
| 7.6 Steuerung und Programmierung von Werkzeugmaschinen | 435 |
| 7.6.1 Inbetriebnahme der Werkzeugmaschinensteuerung | 438 |
| 7.6.2 Erzeugung von Sollwerten aus dem NC-Programm (Wegesteuerung) | 444 |
| 7.6.3 Steuerungsinterne Überwachungsaufgaben (Condition Monitoring) | 458 |
| Verständnisfragen | 460 |
| Literatur | 460 |
| Normen und Richtlinien | 463 |
| Firmenverzeichnis | 467 |
| Sachwortverzeichnis | 473 |

Autorenverzeichnis

Arvid Hellmich Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP),
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
E-Mail: wzm@mb.tu-chemnitz.de

Andreas Hirsch Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP),
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
E-Mail: wzm@mb.tu-chemnitz.de

Michael Müller Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP),
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
E-Mail: wzm@mb.tu-chemnitz.de

Joachim Regel Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP),
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
E-Mail: wzm@mb.tu-chemnitz.de

Markus Richter Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP),
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
E-Mail: wzm@mb.tu-chemnitz.de

Volker Wittstock Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP),
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
E-Mail: wzm@mb.tu-chemnitz.de

Formelzeichen und Abkürzungen

Großbuchstaben

| | |
|---------------------|---|
| $^{\circ}\text{C}$ | Grad Celsius |
| A | Fläche |
| A | Spannungsquerschnitt |
| A_{eff} | effektive Taschenfläche |
| $A_{\text{eff,TF}}$ | effektive Taschenfläche der Tragführung |
| $A_{\text{eff,UF}}$ | effektive Taschenfläche der Umgrifführung |
| A_{R} | Stegfläche |
| C | dynamische Tragzahl |
| C_0 | statische Tragzahl |
| E | Elastizitätsmodul |
| F | äußere Belastung |
| F_{a} | Beschleunigungskraft |
| $F_{\text{ä,ax}}$ | äquivalente Axialbelastung |
| F_{Anz} | Anziehungskraft |
| F_{ax} | Axialkraft |
| F_{B} | Bearbeitungskraft |
| F_{Bn} | Komponente der Bearbeitungskräfte in Normalenrichtung |
| F_{c} | Schnittkraft |
| F_{cn} | Schnittnormalkraft |
| F_{cnz} | Schnittnormalkraft pro Schneide |
| F_{cz} | Schnittkraft pro Schneide |
| F_{dyn} | dynamische Kraft am Ein-Massen-Schwinger |
| F_{eff} | geforderte Effektivkraft für eine Linearachse |
| F_{f} | Vorschubkraft |
| F_{fn} | Vorschubnormalkraft |
| F_{fnz} | Vorschubnormalkraft pro Schneide |
| F_{fz} | Vorschubkraft pro Schneide |

| | |
|---------------|--|
| F_G | Gewichtskraft |
| $F_{Gn,Schl}$ | Normalanteil der Gewichtskräfte des Schlittens |
| $F_{Gn,WSt}$ | Normalanteil der Gewichtskräfte des Werkstücks |
| F_h | Hochreißkraft |
| F_{impuls} | Impulskraft |
| F_M | Massekraft |
| F_{max} | geforderte Maximalkraft für eine Linearachse |
| $F_{max,Mot}$ | maximale Motorkraft |
| F_N | Normalkraft |
| $F_{nenn,D}$ | Dauernennkraft |
| F_p | Passivkraft |
| F_{pz} | Passivkraft pro Schneide |
| F_R | Reibkraft |
| F_{rad} | radial wirkende Kraft |
| F_{stat} | statische Kraft am Ein-Massen-Schwinger |
| F_T | Taschenkraft |
| F_T | Tragkraft |
| F_U | Umfangskraft |
| $F_{X,Y,Z}$ | Kraft in X-, Y-, Z-Richtung |
| F_{Yb} | bewertete Kraft in Y-Richtung |
| F_{Zb} | bewertete Kraft in Z-Richtung |
| F_z | Zerspankraft |
| F_{Zug} | Zugkraft |
| F_{Zus} | zusätzliche Reibungskräfte |
| I | äquatoriales Flächenträgheitsmoment |
| I_a | Flächenträgheitsmoment im Bereich der Kraglänge a |
| I_l | Flächenträgheitsmoment im Bereich des Lagerabstands l |
| I_p | Primärstrom |
| I_p | polares Flächenträgheitsmoment |
| J_1 | Massenträgheitsmoment der Zahnrad- oder Riemenscheibenmasse auf der Motorwelle |
| J_2 | Massenträgheitsmoment der Zahnrad- oder Riemenscheibenmasse auf der Spindel |
| J_{ges} | gesamtes Massenträgheitsmoment, bezogen auf die Motorwelle |
| J_{lin} | reduziertes Massenträgheitsmoment linear bewegter Körper |
| J_{Mot} | Massenträgheitsmoment der Rotor- und Wellenmasse des Motors |
| J_{Mu} | Massenträgheitsmoment der Spindelmuttermasse |
| J_{Schl} | Massenträgheitsmoment der Schlittenmasse |
| J_{Sp} | Massenträgheitsmoment der Gewindespindelmasse |
| J_{WSt} | Massenträgheitsmoment der Werkstückmasse |
| J_{Zyl} | Massenträgheitsmoment zylindrischer, um Symmetrieachse rotierender Körper |
| $K_{1,2,3}$ | Berechnungsfaktoren |

| | |
|------------------|--|
| K_A | Faktor der Strömungsverhältnisse |
| K_V | Verschleißkorrekturfaktor |
| KB | Kolkbreite |
| KL | Kolkklippenbreite |
| KT | Kolktiefe |
| L | Lebensdauer |
| L_h | Lebensdauer in Betriebsstunden |
| L_n | nominelle Lebensdauer |
| M_d | Drehmoment |
| $M_{d,B}$ | Beschleunigungsmoment |
| $M_{d,eff}$ | Effektivmoment |
| $M_{d,Hsp}$ | Hauptspindelmoment |
| $M_{d,L}$ | stationäres Lastmoment |
| $M_{d,nenn}$ | Nennmoment |
| $M_{d,Mot}$ | Motormoment |
| $M_{X,Y,Z}$ | Drehmoment um X-, Y-, Z-Achse |
| N_b | bezogene Nachgiebigkeit |
| N_{Hsp} | Nachgiebigkeit der Hauptspindel |
| P | dynamisch äquivalente Belastung |
| P | Positionsunsicherheit |
| P_0 | statisch äquivalente Belastung |
| P_a | Positionsabweichung |
| P_c | Schnittleistung |
| P_D | Dauerleistung |
| P_{Hsp} | erforderliche Leistung an der Hauptspindel |
| P_{Mot} | Motorleistung |
| P_{nenn} | Nennleistung |
| P_P | Pumpenleistung |
| P_R | Reibleistung |
| $P_{s,i}$ | Positionsstreuung an Messposition i |
| P_{Schl} | Schleifleistung |
| P_{Sp} | Spitzenleistung |
| $P_{Verlust,Sp}$ | elektrische Spitzenverlustleistung |
| $P_{Verlust,D}$ | elektrische Dauerverlustleistung |
| Q_{Dr} | Durchflussmenge der Drossel |
| Q_P | Durchflussmenge (Förderstrom) der Pumpe |
| Q_T | Durchflussmenge der Tasche |
| R_a | Mittenrauwert |
| R_{Dr} | Drosselwiderstand |
| R_e | Streckgrenze |
| R_T | hydraulischer Taschenwiderstand |
| R_z | gemittelte Rautiefe |

| | |
|--------------------|--------------------------------|
| S | Sicherheit |
| S_0 | statische Tragsicherheit |
| SP_{Mess} | Signalperiode des Messsystems |
| T | Teilung bei Lineargebern |
| T_n | Taktzeitpunkt der Steuerung |
| U | Spannung |
| U_c | Klemmspannung |
| U_i | Umkehrspanne an Messposition i |
| U_r | induzierte Spannung |
| VB | Verschleißmarkenbreite |

Kleinbuchstaben

| | |
|--------------------------|--|
| a | Beschleunigung |
| a | Kraglänge |
| a_e | Eingriffsbreite |
| a_p | Schnitttiefe |
| b | Breite |
| b | Spannungsbreite |
| b_T | Taschenbreite |
| b_{TF} | Breite der Tragführungsbahn |
| b_{UF} | Breite der Umgrifführungsbahn |
| c | spezifische Wärmekapazität |
| c_{Dr} | Drosselsteifigkeit |
| c_{dyn} | dynamische Steifigkeit |
| c_F | Federsteifigkeit |
| $c_{\text{Grundkörper}}$ | statische Steifigkeit des Maschinengrundkörpers |
| c_{HL} | statische Steifigkeit des Hauptlagers |
| c_{Hsp} | statische Steifigkeit der Hauptspindel |
| c_{NL} | statische Steifigkeit des Nebenlagers |
| c_{stat} | statische Steifigkeit |
| c_T | statische Steifigkeit der Tasche einer hydrostatischen Führung |
| d | Durchmesser |
| d_0 | Teilkreisdurchmesser |
| d_a | Außendurchmesser |
| $d_{Ab,max}$ | maximaler Abtriebsdurchmesser |
| $d_{Ab,min}$ | minimaler Abtriebsdurchmesser |
| $d_{An,max}$ | maximaler Antriebsdurchmesser |
| $d_{An,min}$ | minimaler Antriebsdurchmesser |
| d_i | Innendurchmesser |
| d_K | Kugeldurchmesser |

| | |
|-----------------------------|---|
| d_m | mittlerer Durchmesser |
| $d_{sp,K}$ | Spindelkerndurchmesser |
| d_{WSt} | Werkstückdurchmesser |
| d_{WZ} | Werkzeugdurchmesser |
| e | EULERsche Zahl $\approx 2,71828183$ |
| e | exzentrischer Versatz |
| f | Vorschub |
| f_a | Axialvorschub |
| f_B | Belastungsfaktor |
| f_{Elekt} | Eingabefrequenz der Auswerteelektronik |
| f_{HL} | Verformung des Hauptlagers |
| f_{NL} | Verformung des Nebenlagers |
| f_r | Radialvorschub |
| f_{rad} | radiale Verlagerung (Verformung) |
| f_S | statischer Sicherheitsfaktor |
| f_{S2} | Leistungs- und Drehmomentenerhöhung im S2-Betrieb |
| f_{Schl} | Verfahrens faktor Schleifen |
| f_{Sp} | Verformung des Bauteils Hauptspindel |
| f_t | Tangentialvorschub |
| f_w | Wälzvorschub |
| f_z | Vorschub pro Schneide |
| g | Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$ |
| g | Gangzahl einer Schnecke |
| g_{erf} | erforderliche Stufenzahl |
| g_{gew} | gewählte Stufenzahl |
| h | Höhe |
| h | Spanungsdicke |
| h_0 | Spalthöhe |
| $h_{0,TF}$ | Spalthöhe der Tragführung |
| $h_{0,UF}$ | Spalthöhe der Umgrifführung |
| h_{Gew} | Gewindesteigung |
| h_m | mittlere Spanungsdicke |
| h_{Sch} | Schneckensteigung |
| h_{Sp} | Spindelsteigung |
| i | Übersetzungsverhältnis |
| i | Zählvariable |
| i_{ist} | Strom-Istwert |
| i_{soll} | Strom-Sollwert |
| $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ | Einheitsvektoren |
| j | imaginäre Einheit $j^2 = -1$ |
| k | Dämpfungswert |
| k_c | spezifische Schnittkraft |

| | |
|-----------------|---|
| $k_{c1.1}$ | Hauptwert der spezifischen Schnittkraft |
| k_{cm} | mittlere spezifische Schnittkraft |
| k_{Dr} | Drosselkonstante |
| $k_{f1.1}$ | Hauptwert der spezifischen Vorschubkraft |
| k_{La} | Lagerbeiwert zur Charakterisierung der Einspannung des Gewindespindeltriebs |
| $k_{p1.1}$ | Hauptwert der spezifischen Passivkraft |
| k_R | Widerstandsbeiwert |
| l | Lagerabstand |
| l | Länge |
| l_A | Abflusslänge (Stegbreite) |
| l_{an} | Anlaufweg |
| l_H | Hublänge |
| l_K | Kapillarlänge |
| l_R | tragende Rollenlänge |
| l_{Sp} | freie Spindellänge |
| l_T | Taschenlänge |
| $l_{über}$ | Überlaufweg |
| l_{WSt} | Werkstücklänge |
| m | Masse |
| m | Modul |
| n | Drehzahl |
| n | Zählvariable |
| n_{Ab} | Abtriebsdrehzahl |
| $n_{Ab,max}$ | maximale Abtriebsdrehzahl |
| $n_{Ab,min}$ | minimale Abtriebsdrehzahl |
| n_{An} | Antriebsdrehzahl |
| n_{eck} | Eckdrehzahl der Hauptspindel |
| n_H | (Doppel-)Hubzahl |
| n_{ist} | Drehzahl-Istwert |
| $n_{max,Hsp}$ | maximale Hauptspindeldrehzahl |
| $n_{max,Mot}$ | maximale Motordrehzahl |
| $n_{min,Mot}$ | minimale Motordrehzahl |
| n_{Mot} | Motordrehzahl |
| n_{nenn} | Nenn Drehzahl |
| n_{soll} | Drehzahl-Sollwert |
| n_{WSt} | Werkstückdrehzahl |
| n_{WZ} | Werkzeugdrehzahl |
| n_{zul} | zulässige Betriebsdrehzahl |
| p | Druck |
| \underline{p} | Lebensdauerfaktor |
| $\vec{p}(s)$ | Ortsvektor für Bahninterpolation |

| | |
|--------------------|--|
| p_{Dr} | Drosseldruck |
| p_m | mittlere Flächenpressung |
| $p_{m,zul}$ | zulässige mittlere Flächenpressung |
| p_{max} | maximale Flächenpressung |
| p_P | Pumpendruck |
| p_T | Taschendruck |
| $p_{T,TF}$ | Taschendruck der Tragführung |
| $p_{T,UF}$ | Taschendruck der Umgrifführung |
| p_{zul} | zulässige Flächenpressung |
| r | Ruck |
| r_K | Kapillarradius |
| s | Bahnparameter |
| s | Weg |
| $s_{Förder,Pumpe}$ | Drehzahlstellbereich Pumpe |
| s_{nn} | Drehzahlstellbereich |
| $s_{nn,A}$ | Ankerstellbereich |
| $s_{nn,F}$ | Feldstellbereich |
| $s_{nn,gef,Hsp}$ | geforderter Drehzahlstellbereich der Hauptspindel |
| $s_{nn,Md=konst}$ | Drehzahlstellbereich bei konstantem Moment |
| $s_{nn,P=konst}$ | Drehzahlstellbereich bei konstanter Leistung |
| $s_{Schluck,Mot}$ | Drehzahlstellbereich Hydraulikmotor |
| $s_{nn,vor,Mot}$ | vorhandener Drehzahlstellbereich des Motors |
| s_x | Spiel in der Führung |
| t | Tiefe |
| t | Zeit |
| t_{ges} | Zykluszeit |
| v | Geschwindigkeit |
| \bar{v} | bewertete Geschwindigkeit |
| v_B | Bahngeschwindigkeit |
| v_c | Schnittgeschwindigkeit |
| v_{erf} | erforderliche Geschwindigkeit bei Maximalkraft F_{max} |
| v_f | Vorschubgeschwindigkeit |
| $v_{f,ax}$ | axiale Vorschubgeschwindigkeit |
| $v_{f,rot}$ | rotatorische Vorschubgeschwindigkeit |
| $v_{max,Mot}$ | maximale Motorgeschwindigkeit |
| v_{Hub} | Hubgeschwindigkeit |
| v_m | mittlere Geschwindigkeit |
| v_{max} | maximale Geschwindigkeit |
| v_{nenn} | Nenngeschwindigkeit |
| v_{rel} | relative Gleitgeschwindigkeit |
| v_{WSt} | Werkstückumfanggeschwindigkeit |
| v_{WZ} | Werkzeugumfanggeschwindigkeit |

| | |
|-------------------|---|
| x, y, z | Anstiegswert |
| x, y, z | Position |
| x_{dyn} | dynamischer Federweg |
| x_{ist} | Positions-Istwert |
| x_{soll} | Positions-Sollwert |
| x_{stat} | statischer Federweg |
| z | Werkzeugschneidenzahl |
| z_{Ab} | Abtriebszähnezahl |
| z_{An} | Antriebszähnezahl |
| z_{iE} | Anzahl der im Eingriff befindlichen Schneiden |
| z_{TF} | Anzahl der Taschen der Tragführung |
| z_{UF} | Anzahl der Taschen der Umgrifführung |

Griechische Buchstaben

| | |
|------------------------|--|
| Δ | Änderung einer Variablen |
| Δs | Lagegenauigkeit |
| ΔT | Steuerungstakt |
| Δt | Hochlaufzeit |
| Σ | Achskreuzwinkel |
| α | Freiwinkel am Werkzeug |
| α | Kontaktwinkel in Wälzlagern |
| α | Winkel einer schrägen Ebene |
| α | Wärmeausdehnungskoeffizient |
| α_{Mot} | Winkelbeschleunigung des Motors |
| β | Keilwinkel am Werkzeug |
| γ | Spanwinkel am Werkzeug |
| δ | Spitzenwinkel am Bohrer |
| ε | Phasenverschiebung |
| ζ | Drosselverhältnis, Faktor für Einfluss von Spieleinstelleisten |
| ζ_{TF} | Drosselverhältnis der Tragführung |
| ζ_{UF} | Drosselverhältnis der Umgrifführung |
| η | Belastungskennzahl bei hydrodynamischen Führungen |
| η | dynamische Viskosität |
| η | Schwenkwinkel des Wälzfräasers |
| η | Wirkungsgrad |
| η_{i} | Wirkungsgrad der Übersetzungen |
| $\eta_{\text{Mot,D}}$ | Motorwirkungsgrad bei Dauerleistung P_{D} |
| $\eta_{\text{Mot,Sp}}$ | Motorwirkungsgrad bei Spitzenleistung P_{Sp} |
| η_{P} | Wirkungsgrad der Pumpe |
| η_{SpMu} | Wirkungsgrad des Spindel-Mutter-Getriebes |

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| κ | Einstellwinkel |
| λ | Spaltverhältnis |
| λ | Wärmeleitfähigkeit |
| $\lambda_{K,eff}$ | effektiver Kornabstand |
| μ | Reibkoeffizient |
| $\mu_{Führ}$ | Reibkoeffizient der Führung |
| μ_K | Bewegungsreibkoeffizient |
| μ_P | Startreibkoeffizient |
| π | $\pi \approx 3,14159265$ |
| φ | Flächenverhältnis |
| φ | Phasenverschiebung |
| φ_s | Schnittbogenwinkel |
| φ_z | Schnittbogenwinkel der Schneide |
| ω | Kreisschwingfrequenz |
| ω_0 | Eigenfrequenz |
| ω_{err} | Erregerfrequenz |

Abkürzungen

| | |
|-----------------|--|
| 2D | zweidimensional |
| 3D | dreidimensional |
| AFK | aramidfaserverstärkter Kunststoff |
| BTA | Boring and Trepanning Association (Tiefbohrverfahren) |
| CAD | Computer-Aided Design – rechnergestützte Konstruktion |
| CAM | Computer-Aided Manufacturing – rechnergestützte Fertigung |
| CBN | kubisches Bornitrit |
| CFK | Carbonfaserverstärkter Kunststoff |
| CNC | Computerized Numerical Control – computergestützte numerische Steuerung |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| COM | Kommunikationsteil einer CNC-Steuerung |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| ECM | Electro-Chemical Machining – Elektrochemische Bearbeitung |
| EDM | Electrical Discharge Machining – Elektroerosives Abtragen, Funkenerodieren |
| EDV | Elektronische Datenverarbeitung |
| ELB | Einlippenbohrsystem (Tiefbohrverfahren) |
| EN | Europäische Norm |
| EUR | Euro |
| GFK | glasfaserverstärkter Kunststoff |
| HMI | Human-Machine-Interface – Mensch-Maschine-Schnittstelle |
| HRC | Härte nach Rockwell |
| HSC | High Speed Cutting – Hochgeschwindigkeitszerspanung |

| | |
|--------|---|
| HSK | Hohlschaftkegel |
| IEC | International Electrotechnical Commission – Internationale Elektrotechnische Kommission |
| ISO | International Standardisation Organization – Internationale Organisation für Normung |
| IT | Informationstechnik |
| KSS | Kühlschmierstoff |
| MD | Maschinendaten einer CNC-Steuerung |
| MK | Morsekegel |
| Mrd. | Milliarden |
| NC | Numerical Control – numerische Steuerung |
| Nd:YAG | Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser |
| PC | Personalcomputer |
| PECM | Pulsed Electro-Chemical Machining – gepulste Elektrochemische Bearbeitung |
| PI | Proportional-Integral-Regler |
| PLC | Programmable Logic Control – SPS-Teil einer CNC-Steuerung |
| PT1 | proportionalverstärkendes Verzögerungsglied 1. Ordnung |
| PT2 | proportionalverstärkendes Verzögerungsglied 2. Ordnung |
| PTP | point-to-point – Punkt-zu-Punkt |
| SD | Settingdaten einer CNC-Steuerung |
| SK | Steilkegel |
| SPS | Speicherprogrammierbare Steuerung |
| VDW | Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| WSt | Werkstück |
| WZ | Werkzeug |
| bzw. | beziehungsweise |
| cp | continuous path – Bahnsteuerung |
| d. h. | das heißt |
| s. | siehe |
| u. a. | und andere; unter anderem |
| u. U. | unter Umständen |
| usw. | und so weiter |
| vgl. | vergleiche |
| z. B. | zum Beispiel |
| μC | Mikrokontroller |

Joachim Regel

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Historische Entwicklung und Definition | 1 |
| 1.2 | Bedeutung der Produktionstechnik und der Werkzeugmaschinen-Industrie | 5 |
| 1.3 | Anforderungen an Werkzeugmaschinen aus Anwendersicht | 9 |
| | Verständnisfragen | 12 |
| | Literatur | 13 |

1.1 Historische Entwicklung und Definition

Chemnitz, eine Wiege des deutschen Werkzeugmaschinenbaus Chemnitz ist ein traditionelles Zentrum des deutschen Werkzeugmaschinenbaus. Bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts nahm Sachsen den Spitzenplatz in Deutschland mit 232 Maschinenbauunternehmen ein. In der Zwischenzeit durchlebte der Standort nicht wenige Höhen und Tiefen. Einen Einblick in die Anfänge zeigt das Schema in der Abb. 1.1

Als 1851 zur Londoner Weltausstellung als erster internationaler Messe des technischen Fortschritts der Begriff „machine tool“ erstmalig verwendet wurde, baute Richard Hartmann in seinem Unternehmen bereits Dampfmaschinen und gegenüber den englischen auch konkurrenzfähige Lokomotiven. Nur wenige Jahre später begann er mit dem Bau schwerer Werkzeugmaschinen und hatte wesentlichen Anteil daran, dass sich Chemnitz nach 1870 zu einer der großen deutschen Industriemetropolen entwickelte (Abb. 1.2). Als Begründer des Werkzeugmaschinenbaus in Deutschland wird jedoch Johann von Zimmermann bezeichnet, der wie Richard Hartmann Schüler von Carl Gottlieb Haubold war, dem Vater des Chemnitzer Maschinenbaus. Zimmermanns 1844 gegründetes Unternehmen war 1848 die erste Fabrik Deutschlands und des europäischen Festlandes zum

J. Regel (✉)
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP),
Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
E-Mail: wzm@mb.tu-chemnitz.de

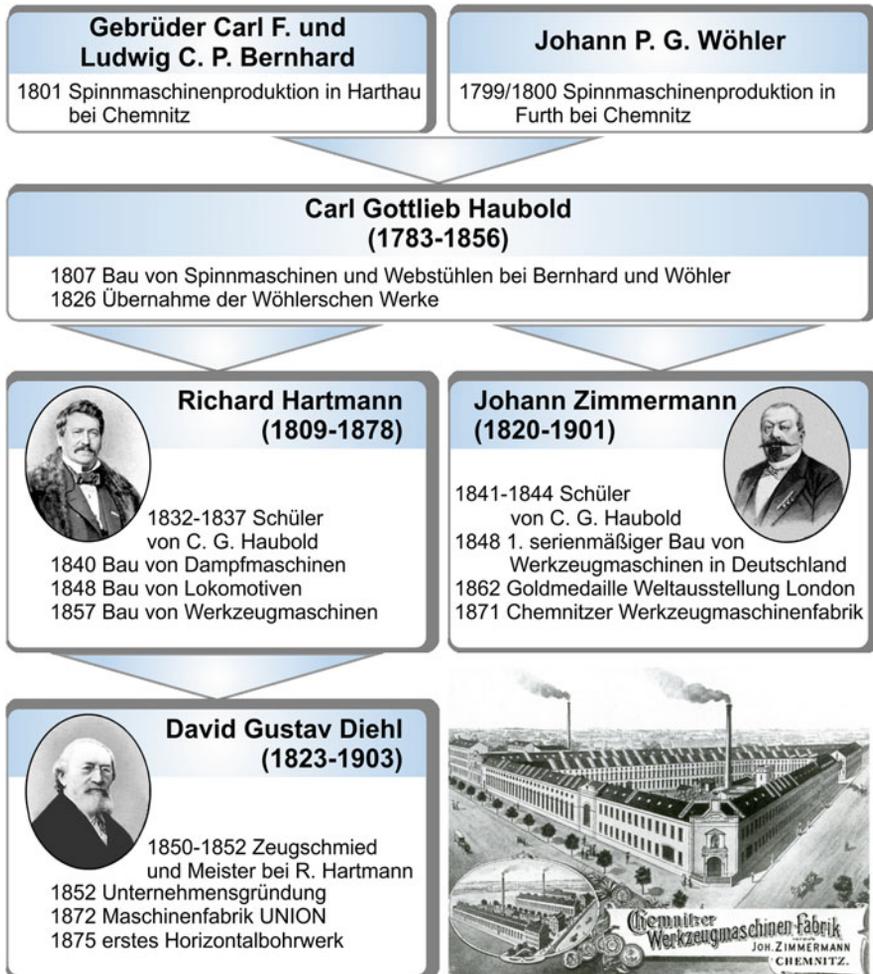


Abb. 1.1 Entwicklung des Chemnitzer Maschinen- und Werkzeugbaus

Bau von Werkzeugmaschinen. Die hier hergestellten Drehbänke und Bohrmaschinen waren die erste ernsthafte Konkurrenz zu den bisher ausschließlich in England produzierten Werkzeugmaschinen [1].

Nicht unerwähnt bleiben darf an dieser Stelle die kurze Zeit später im Jahr 1852 von David Gustav Diehl als „Mechanische Werkstatt zur Fertigung aller Art Werkzeuge, Maschinen und mechanische Teile“ gegründete Werkzeugmaschinenfabrik. Sie wurde 1872 in eine Aktiengesellschaft umgewandelt und in ihre heutige Bezeichnung „UNION“ umbenannt. Sie ist damit das älteste noch existierende Werkzeugmaschinenunternehmen Deutschlands. Kurze Zeit später wurde bereits das erste Horizontalbohrwerk entwickelt. Es folgte die Spezialisierung des Unternehmens auf die Entwicklung und Fertigung von Bohrwerken aller

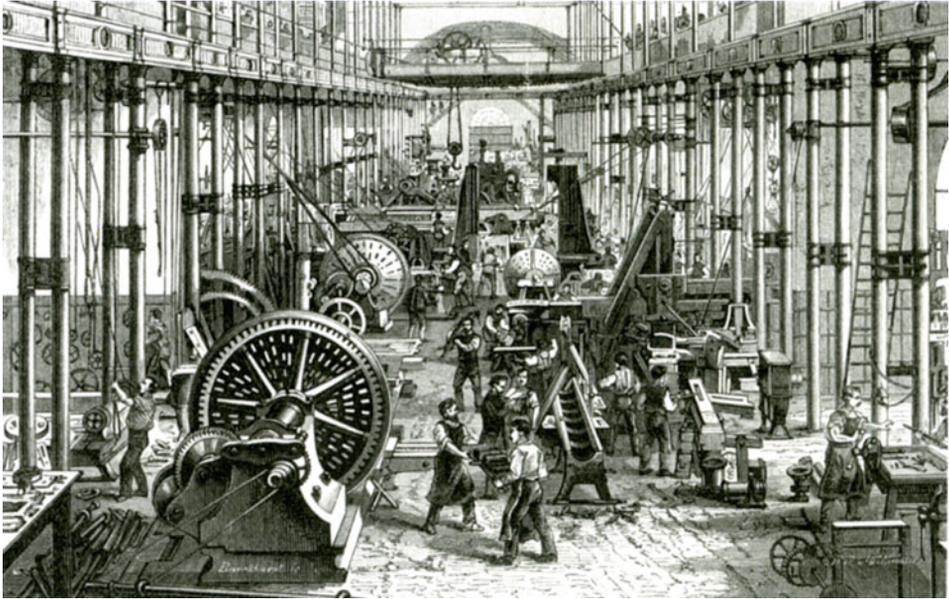


Abb. 1.2 Werkzeugmaschinenfabrik von Richard Hartmann (um 1864)

Art. Zur Jahrhundertwende hatte die „Spezialfabrik für Horizontalbohrwerke“ damit Welt-
ruf erlangt, was sich in dem Gewinn der Goldmedaille auf der Pariser Weltausstellung 1900
zeigte [2].

In eben diesem Jahr erhielt Hermann Pfauter das Patent über ein „Verfahren und
Maschinen zum Fräsen von Schraubenrädern mittels Schneckenfräasers“. Dies war die
Geburtsstunde der Wälzfräsmaschine. Im Gegensatz zu den alteingesessenen Firmen
beschränkte er sich mit seinem Unternehmen auf die Herstellung nur dieses einen
Maschinentyps. Dadurch war es ihm möglich, innerhalb kurzer Zeit Anschluss an die
führenden Werkzeugmaschinenfirmen zu finden und auf dem Weltmarkt Fuß zu fas-
sen. Nachteilig war, dass man in Krisenzeiten nicht auf andere Erzeugnisse ausweichen
konnte. So schwankte die Zahl der Beschäftigten nach dem ersten Weltkrieg und während
der Weltwirtschaftskrise massiv, wobei andere Firmen wie auch die von Richard Hart-
mann aufgebaute „Sächsische Maschinenfabrik“ und die Zimmermann’sche „Chemnitzer
Werkzeugmaschinenfabrik“ 1929 und 1930 aufgelöst wurden bzw. zusammenbrachen.

Einschneidend für alle Unternehmen waren die massiven Zerstörungen durch den
zweiten Weltkrieg und die Demontage des fast vollständigen Maschinenparks als Repa-
rationszahlungen an die damalige Sowjetunion. Hinzu kam ein zunehmender Mangel an
Rohstoffen und Halbfertigwaren. Trotzdem konnte sich der Neubeginn in der Sowjeti-
schen Besatzungszone entscheidend auf ihr industrielles Kernland Sachsen stützen. Hier
waren 40 % der industriellen Produktionskapazitäten und 47 % der im industriellen Sek-
tor Beschäftigten der Sowjetischen Besatzungszone im Jahr 1945 konzentriert. Wesentliche

Grundlagen dessen hatte die Industrialisierung Sachsens im 19. Jahrhundert gelegt. Infolge der Enteignungspolitik größtenteils als Volkseigene Betriebe (VEB) im System einer zentral gesteuerten Planwirtschaft wieder aufgebaut, wurde der Chemnitzer Maschinenbau auf dem Weltmarkt zeitweise wieder konkurrenzfähig, jedoch auf Kosten einer zunehmenden kreditfinanzierten Subventionierung [3]. Nach dem Zusammenbruch des Systems konnte er sich in der Marktwirtschaft der 90er Jahre unter erschwerten wirtschaftlichen Bedingungen wieder etablieren und ist mittlerweile zu großen Teilen auf unterschiedliche Weise Teil verschiedener weltweit operierender Gesellschaften.

Definition Vor dem Hintergrund der Entwicklung der Werkzeugmaschinen, ausgehend von einfachen Werkzeugen wie Faustkeilen über Geräte wie dem Neolithischen Bohrapparat 6000 v. Chr. und Drehbänke mit alternierenden und seit dem 16. Jahrhundert kontinuierlichen Drehbewegungen bis hin zum maschinellen Drehen durch die Mechanisierung der Schnitt- und Vorschubbewegung, stellt sich die Frage nach einer grundlegenden Definition einer Werkzeugmaschine.

- ▶ Unter einer Werkzeugmaschine sind alle Maschinen zu verstehen, die der Fertigung mechanischer Komponenten definierter, reproduzierbarer Form mit Hilfe von Werkzeugen dienen. Die Formgebung geschieht durch eine mechanisiert angetriebene und geführte Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, die sich in Prozess- und Vorschubbewegung unterteilen lässt. Realisiert werden diese durch eine Energiezufuhr elektrischer, hydraulischer, pneumatischer und nicht ausschließlich manueller Art.

Aus fertigungstechnischer Sicht sind Werkzeugmaschinen die einzige Maschinenklasse, die sich selbst herstellen kann. Sie wird daher auch als „Mutter der Maschinen“ bezeichnet.

Weitere kennzeichnende Merkmale von Werkzeugmaschinen sind eine Werkzeug- und Werkstückhandhabung zum Spannen, Wechseln und Speichern derselben und eine Steuerungs- und Regelungstechnik, die die Bewegungsabläufe sowie den Kraft- und Momentenbedarf vorgibt. Integrierte Messtechnik und Diagnosesoftware ermöglicht eine Qualitätsüberwachung und Fehlerkompensation während des Betriebs.

Heutige Werkzeugmaschinen sind demnach als mechatronische Systeme zu verstehen. Diese Einordnung ergibt sich aus der Einteilung nach den Eigenschaften mechanischer, mechatronischer und adaptronischer Systeme in der Abb. 1.3. Reine mechanische Systeme sind durch teilweise komplexe mechanische Lösungen gekennzeichnet. Die Genauigkeit hängt ausschließlich von Material, Design und der Produktion ab. Anders verhält es sich mit mechatronischen und adaptronischen Systemen. Dabei sind Sensor-Aktor-Einheiten entweder als separate Komponenten oder direkt im Material in die mechanischen Strukturen integriert. Die Genauigkeit hängt hierbei zusätzlich noch von den Sensoren und Aktoren selbst sowie der angewandten Regelung und den Korrektur- und Kompensationsmethoden ab. Ziele mechatronischer Komponenten in Werkzeugmaschinen sind insbesondere die Fehlerkompensation, die Erhöhung der Bewegungsauflösung und der Achsdynamik

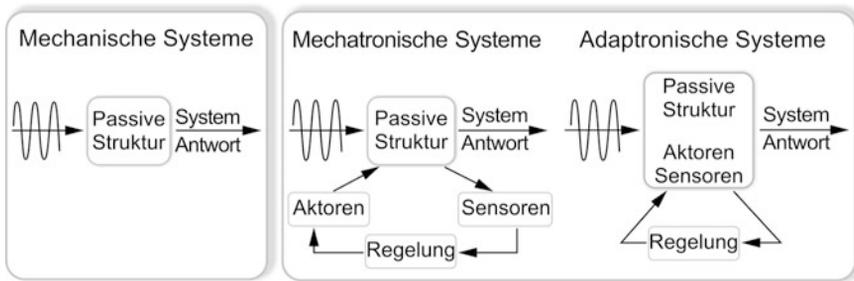


Abb. 1.3 Eigenschaften mechatronischer und adaptronischer Systeme

sowie eine Technologieunterstützung beispielsweise durch eine schwingungsunterstützte Bearbeitung [4].

1.2 Bedeutung der Produktionstechnik und der Werkzeugmaschinen-Industrie

Die Volkswirtschaften der meisten Industriestaaten basieren zu großen Teilen auf der industriellen Produktion von Gütern verschiedenster Art. Dabei setzt das Bestehen im weltweiten Wettbewerb eine auf hohem Niveau stehende Produktionstechnik voraus, die damit auch den Wohlstand der Bevölkerung sichert.

Heute profitiert vom wissenschaftlich-technischen Fortschritt und den genutzten Ressourcen rund ein Sechstel der Weltbevölkerung. Mit dem prognostizierten Ansteigen der Weltbevölkerung auf 10 Mrd. Menschen bis 2050 wird sich dieser Anteil noch weiter verkleinern. Das damit verbundene Konfliktpotential kann durch einen angemessenen Niveaueausgleich abgebaut werden. Es muss demzufolge gelingen, die industrielle Produktion zu erhöhen, was man im asiatisch-pazifischen Raum schon beobachten kann, und dies bei schonendem Ressourceneinsatz. Die damit verbundenen ingenieurtechnischen Herausforderungen können als Basis aller Überlegung im Sinne marktfähiger Perspektiven der Produktionstechnik gesehen werden [5].

Dabei kommt insbesondere den wirtschaftlich aufstrebenden Ländern wie China, Indien und auch Südkorea eine wachsende Bedeutung zu. Mit einem Marktvolumen von 22,9 Mrd. €, das sind mehr als 35 % des globalen Werkzeugmaschinenverbrauchs, dominiert die Volksrepublik China den Kreis der weltweit aufnahmestärksten Märkte. Die stark gestiegene Bedeutung Chinas lässt sich auch an der Entwicklung der vergangenen 10 Jahre festmachen. Stand das Land im Jahr 2000 noch für weniger als 4 % der deutschen Werkzeugmaschinenausfuhren, sind es mittlerweile mehr als das Siebenfache, nämlich 28 % [6]. Einen Überblick über die globale Produktion und den Verbrauch von Werkzeugmaschinen des Jahres 2011 liefert Abb. 1.4.

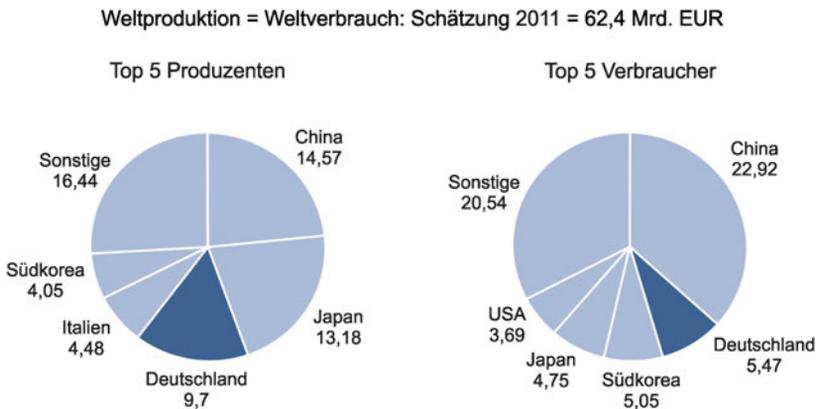


Abb. 1.4 Weltproduktion und -verbrauch von Werkzeugmaschinen in Mrd. €, Stand 2012. (Quelle: VDW)

War ein Jahr zuvor Deutschland noch der Top-Produzent, führte die Weltwirtschaftskrise zu einem Abrutschen hinter China, das die Krise deutlich schneller überwand, und Japan. Das Krisenjahr hat deutlich gezeigt, dass sich die Produktionstechnik als Basis der Realwirtschaft und insbesondere der Werkzeugmaschinenbau trotz einer starken Abhängigkeit von der Finanzwirtschaft allein durch teilweise sehr langfristige Auftragsbestände als stabilisierend und tragfähig erweisen kann. Das führte dazu, dass die Werkzeugmaschinenproduktion lediglich auf das Niveau von vor fünf Jahren gefallen ist und sich mit den Werten für das Jahr 2011 mit begründetem Optimismus betrachten lässt (Abb. 1.5) [6]. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund von Interesse, da geschätzte 30 % aller Arbeitsplätze in Deutschland und auch in Europa insgesamt mit der industriellen Produktion verbunden sind. So ist der Maschinen- und Anlagenbau auch der wichtigste Ingenieurarbeitgeber in Deutschland.

Die Voraussetzungen sind dazu im globalen Vergleich sehr günstig. Nach dem jährlich im Rahmen des Weltwirtschaftsforums erscheinenden Berichts zur globalen Wettbewerbsfähigkeit ist Deutschland in den Kreis der fünf wettbewerbsfähigsten Nationen aufgerückt. Das positive Ergebnis für Deutschland beruht auf mehreren Pfeilern. So lobt der Report insbesondere die Infrastruktur, die funktionierende Wettbewerbspolitik, die Marktgröße und die starke Fähigkeit, neue Technologien für technologische Verbesserungen anzuwenden. Bei den problematischen Faktoren wird die restriktive Arbeitsgesetzgebung an zweiter Stelle genannt. An erster Stelle steht das Steuerrecht [7].

Strukturell gesehen ist der deutsche Werkzeugmaschinenbau überwiegend mittelständig geprägt. So beschäftigen im Jahr 2011 knapp 60 % der ca. 330 in Deutschland schwerpunktmäßig mit der Fertigung von Werkzeugmaschinen befassten Unternehmen höchstens 250 Mitarbeiter, was eine Gesamtzahl von 18 % der in diesem Zweig Beschäftigten darstellt. 24 % der Firmen haben zwischen 250 und 500 Beschäftigte und weitere 19 % haben eine Betriebsgröße von mehr als 500 Mitarbeitern. Allein diese „Main Players“ erwirtschaften die

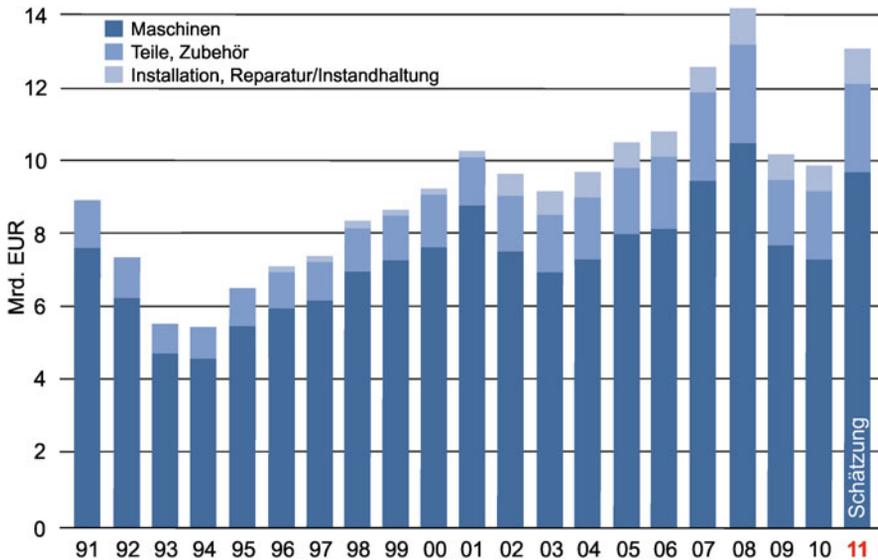


Abb. 1.5 Werkzeugmaschinen-Produktion in Deutschland, Stand 2012. (Quelle: VDW)

reichliche Hälfte des Produktionswertes und sind überwiegend als selbstständig operierende Tochterfirmen in einem letztendlich reichlichen Dutzend Großkonzernen organisiert. Gefertigt wird im Unterschied zur asiatischen Werkzeugmaschinenindustrie überwiegend im Kundenauftrag durch hoch qualifiziertes und erfahrenes Personal.

Es gibt zwei Hauptabnehmerbranchen der Werkzeugmaschinenindustrie, die insgesamt 2/3 des Gesamtabsatzes ausmachen. Führend ist dabei die Automobilindustrie inklusive ihrer Systemlieferanten und Zulieferer. Im Maschinenbau stellt der Werkzeugmaschinenbau selbst die größte Teilbranche. Weitere wichtige Segmente sind Antriebstechnik, Verfahrenstechnik/Energiewirtschaft, Stanzwerkzeuge/Formenbau sowie Kraftmaschinen/Turbinen (Abb. 1.6) [6].

Unabhängig von der globalen Finanz- und Wirtschaftssituation können Produktion und Arbeitsplätze in Deutschland langfristig nur gesichert werden, wenn neben dem Entwicklungsstandort Deutschland zumindest für die hochwertigen Produkte auch der Fertigungsstandort Deutschland wirtschaftlich attraktiv ist. Hochwertige Produkte sind durch eine hohe Funktionsintegration charakterisiert, die u. a. zu zunehmender Bauteilkomplexität und zum Einsatz neuer Materialien sowie zu außergewöhnlich hohen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsanforderungen führt. Die zunehmende Integration verschiedener Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Fräsen, Verzahnen, Schleifen in einer Maschine zur Fertigbearbeitung des Werkstückes zeigt, dass kombinierte Verfahren im Trend liegen. Es gilt, Prozessketten zu verkürzen, hochdynamische Lösungen anzustreben und somit die Produktivität zu steigern. Das alles ist mit klassischen Methoden der Produktionstechnik unter den wirtschaftlichen Bedingungen in Deutschland immer schwieriger realisierbar.

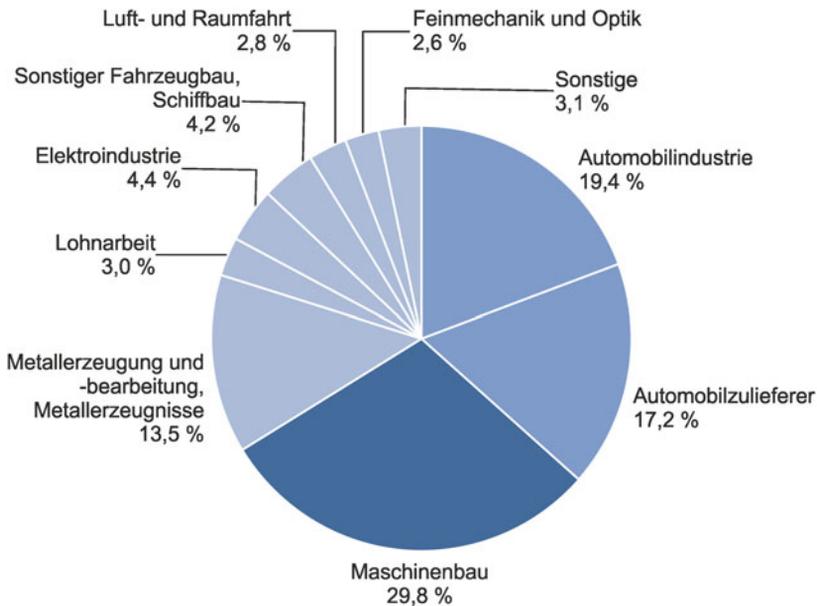


Abb. 1.6 Abnehmerbranchen der deutschen Werkzeugmaschinenindustrie, Stand 2009. (Quelle: VDW)

Berücksichtigt man zudem die Markttrends zu individuelleren Produkten und damit verbundener steigender Variantenvielfalt, kleineren Losgrößen und kürzeren Entwicklungszeiten sowie zu komplexeren Produkten mit der damit verbundenen erhöhten Miniaturisierung und Funktionsintegration, muss die Produktionstechnik auch weiterhin produktiver, zuverlässiger und flexibler werden. Die Abb. 1.7 verdeutlicht dieses Spannungsfeld und zeigt auf, unter welchen Bedingungen sich die Wettbewerbsfähigkeit erhalten bzw. steigern lässt.

Der oft gebrauchte Begriff der „Innovationsfähigkeit“ als maßgebender Faktor zur Sicherung des technischen Vorsprungs lässt sich unter zwei Gesichtspunkten betrachten. Zum einen ist das Vermögen gemeint, dass die Werkzeugmaschinenindustrie selbst Tauglichkeit und Potenziale neuer Materialien und Technologien umsetzt und auf dem Markt einführt. Zweitens verbirgt sich dahinter, die Produktverbesserung durch den Endverbraucher aufzugreifen und in neue, taugliche Maschinenkonzepte umzusetzen [6].

Ganz besonders wird diese Innovationsfähigkeit infolge der zunehmenden Energie- und Ressourcenknappheit in dem Bereich der Effizienztechnologien gefordert. Mehr und mehr bricht sich dabei das Bewusstsein Bahn, dass die Rohstoffe auf der Erde endlich sind und ein vernünftiger Umgang mit ihnen geboten ist. Die Situation erzwingt einen Paradigmenwechsel von „maximalem Gewinn aus minimalem Kapital“ zu „maximaler Wertschöpfung aus minimalen Ressourcen“. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass in der Industrie ein Energieeinsparpotential von 25 bis 30 % schlummert, das mittelfristig gehoben werden kann, nimmt der Einfluss der Energiekosten auf Investitionsentscheidungen zu [8]. Po-

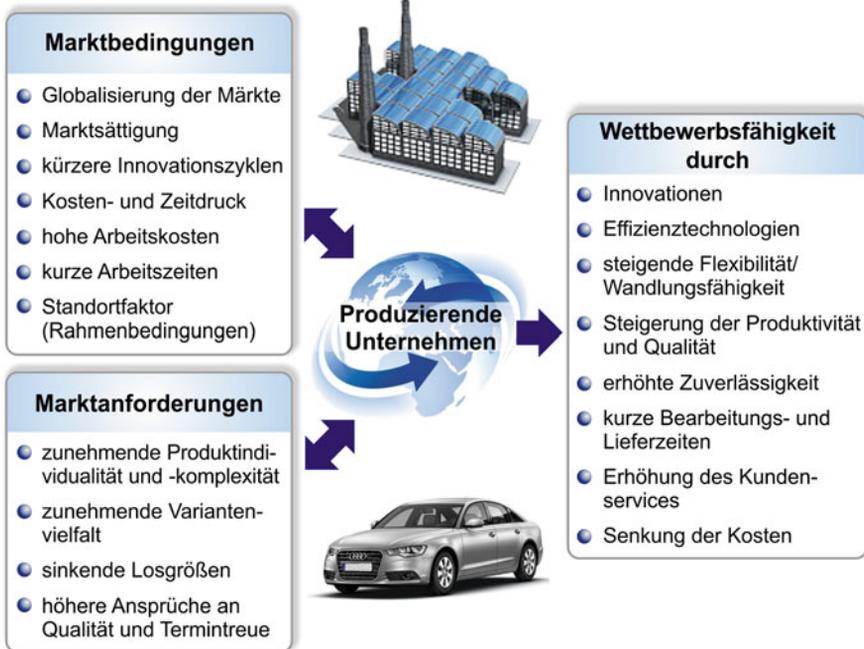


Abb. 1.7 Spannungsfeld zwischen Marktbedingungen und Marktanforderungen

tenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz liegt unter energetischen Gesichtspunkten vordergründig in einem deutlich bedarfsgerechteren und gezielteren Energieeintrag, der Energierückgewinnung und der Vermeidung von Energieverlusten. Weiterhin versprechen Leichtbauweisen, die Vermeidung von Hilfsstoffen und neue Gestaltungsprinzipien hinsichtlich Strukturoptimierung und Selbstkonfigurierbarkeit deutliche Auswirkungen auf den erforderlichen Ressourceneinsatz. Im Allgemeinen führt Ressourceneffizienz jedoch nur dann erfolgreich zu signifikanten Effekten, wenn man eine ganzheitliche Betrachtung aller eingesetzten Ressourcen vornimmt. Dazu gehören Energie, Rohstoffe, ebenso Hilfsstoffe wie Wasser, die Ressource Zeit und nicht zuletzt der Faktor Mensch. Unternehmen, die sich durch Effizienztechnologien heute einen Kostenvorteil erarbeiten, werden diesen in Zukunft überproportional zu nachhaltigen Wettbewerbsvorteilen ausbauen.

1.3 Anforderungen an Werkzeugmaschinen aus Anwendersicht

Das Ziel in der Produktion lässt sich durch deren Charakterisierung von Otto Kienzle zusammenfassen: „Fertigen ist das Herstellen von Werkstücken geometrisch bestimmter Gestalt“ [9]. Zu diesem Zweck werden Werkzeugmaschinen entwickelt und eingesetzt. Letztendlich ist mit der Erfüllung dieser Aufgabe im konkreten Anwendungsfall allen