

---

Dubbel Taschenbuch  
für den Maschinenbau 2:  
Anwendungen

# DIE KUNST DES HEBENS



Schwere Triebwerke schweben lassen  
und präzise auf den Punkt an ihren  
Einbauort dirigieren: Kein Kunststück,  
sondern Arbeitsalltag unserer Kunden.  
Profitieren auch Sie von richtungs-  
weisenden ABUS Kranlösungen.

02261 37 - 148  
[verkauf@abus-kransysteme.de](mailto:verkauf@abus-kransysteme.de)  
[www.abus-kransysteme.de](http://www.abus-kransysteme.de)

# ABUS

MEHR BEWEGEN.

---

Beate Bender · Dietmar Göhlich  
(Hrsg.)

# Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen

26., überarbeitete Auflage

*Hrsg.*

Prof. Dr.-Ing. Beate Bender  
Lehrstuhl für Produktentwicklung,  
Fakultät für Maschinenbau  
Ruhr-Universität Bochum  
Bochum, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich  
Fachgebiet Methoden der  
Produktentwicklung und Mechatronik,  
Fakultät Verkehrs und  
Maschinensysteme  
Technische Universität Berlin  
Berlin, Deutschland

ISBN 978-3-662-59712-5

ISBN 978-3-662-59713-2 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59713-2>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1914, 1929, 1935, 1940, 1941, 1943, 1953, 1961, 1970, 1974, 1981, 1983, 1986, 1987, 1990, 1995, 1997, 2001, 2005, 2007, 2011, 2014, 2018, 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort zur 26. Auflage des DUBBEL – Fundiertes Ingenieurwissen in neuem Format

Der DUBBEL ist seit über 100 Jahren für Generationen von Studierenden sowie in der Praxis tätigen Ingenieurinnen und Ingenieuren das Standardwerk für den Maschinenbau. Er dient gleichermaßen als Nachschlagewerk für Universitäten und Hochschulen, technikorientierte Aus- und Weiterbildungsinstitute wie auch zur Lösung konkreter Aufgaben aus der ingenieurwissenschaftlichen Praxis. Die enorme inhaltliche Bandbreite basiert auf den umfangreichen Erfahrungen der Herausgeber und Autoren, die sie im Rahmen von Lehr- und Forschungstätigkeiten an einschlägigen Hochschulen und Universitäten oder während einer verantwortlichen Industrietätigkeit erworben haben.

Die Stoffauswahl ist so getroffen, dass Studierende in der Lage sind, sich problemlos Informationen aus der gesamten Breite des Maschinenbaus zu erschließen. Ingenieurinnen und Ingenieure der Praxis erhalten darüber hinaus ein weitgehend vollständiges Arbeitsmittel zur Lösung typischer Ingenieuraufgaben. Ihnen wird ein schneller Einblick insbesondere auch in solche Fachgebiete gegeben, in denen sie keine Spezialisten sind. So sind zum Beispiel die Ausführungen über Fertigungstechnik nicht nur für Betriebsingenieur\*innen gedacht, sondern beispielsweise auch für Konstrukteur\*innen und Entwickler\*innen, die fertigungsorientiert gestalten. Durch die Vielschichtigkeit technischer Produkte ist eine fachgebietsübergreifende bzw. interdisziplinäre Arbeitsweise nötig. Gerade in Anbetracht der Erweiterung des Produktbegriffs vor dem Hintergrund der Serviceintegration und Digitalisierung müssen Entwicklungsingenieur\*innen z. B. über Kenntnisse in der Mechatronik oder Informations- und Kommunikationstechnik verfügen, aber auch auf Systemverständnis sowie Methodenkenntnisse zurückgreifen können. Der DUBBEL hilft somit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in allen Unternehmensbereichen der Herstellung und Anwendung maschinenbaulicher Produkte (Anlagen, Maschinen, Apparate, Geräte, Fahrzeuge) bei der Lösung von Problemen: Angefangen bei der Produktplanung, Forschung, Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Normung, Materialwirtschaft, Fertigung, Montage und Qualitätssicherung über den technischen Vertrieb bis zur Bedienung, Überwachung, Wartung und Instandhaltung und zum Recycling. Die Inhalte stellen das erforderliche Basis- und Detailwissen des Maschinenbaus zur Verfügung und garantieren die Dokumentation des aktuellen Stands der Technik.

Die Vielfalt des Maschinenbaus hinsichtlich Ingenieur Tätigkeiten und Fachgebieten, der beständige Erkenntniszuwachs sowie die vielschichtigen

Zielsetzungen des DUBBEL erfordern bei der Stoffzusammenstellung eine enge Zusammenarbeit zwischen Herausgeber\*innen und Autor\*innen. Es müssen die wesentlichen Grundlagen und die unbedingt erforderlichen, allgemein anwendbaren und gesicherten Erkenntnisse der einzelnen Fachgebiete ausgewählt werden.

Um einerseits diesem Ziel weiterhin gerecht zu werden und andererseits die Übersichtlichkeit und Lesbarkeit zu verbessern, haben die Herausgeberin und der Herausgeber gemeinsam mit dem Springer-Verlag entschieden, Schrift- und Seitengröße deutlich zu erhöhen. Damit finden sich die bewährten Inhalte nunmehr in einer **dreibändigen** Ausgabe. Jeder Band wird künftig zudem als Full-Book-Download über das digitale Buchpaket SpringerLink angeboten.

Die *Reihung der Kapitel* wurde gegenüber der 25. Auflage so verändert, dass im Band 1 Grundlagen und Tabellen, im Band 2 maschinenbauliche Anwendungen und im Band 3 Maschinen und Systeme zu finden sind.

**Band 1** mit Grundlagen und Tabellen enthält neben den allgemeinen Tabellenwerken das technische Basiswissen für Ingenieur\*innen bestehend aus Mechanik, Festigkeitslehre, Werkstofftechnik, Thermodynamik und Maschinendynamik. Aufgrund vielfacher Leser\*innen-Hinweise sind auch die Grundlagen der Mathematik für Ingenieure wieder Teil dieser Auflage des DUBBEL.

**Band 2** behandelt maschinenbauliche Anwendungen und umfasst die Produktentwicklung, die virtuelle Produktentwicklung, mechanische Konstruktionselemente, fluidische Antriebe, Elektrotechnik, Messtechnik und Sensorik, Regelungstechnik und Mechatronik, Fertigungsverfahren sowie Fertigungsmittel.

**Band 3** fokussiert auf Maschinen und Systeme, im Einzelnen sind dies Kolbenmaschinen, Strömungsmaschinen, Fördertechnik, Verfahrenstechnik, thermischer Apparatebau, Kälte-, Klima- und Heizungstechnik, Biomedizinische Technik, Energietechnik und -wirtschaft sowie Verkehrssysteme (Luftfahrt, Straße und Schiene).

Beibehalten wurden in allen Bänden die am Ende vieler Kapitel aufgeführten quantitativen Arbeitsunterlagen in Form von Tabellen, Diagrammen und Normenauszügen sowie Stoff- und Richtwerte.

Die *Benutzungsanleitung* vor dem Inhaltsverzeichnis hilft, die Buchstruktur einschließlich Anhang sowie die Abkürzungen zu verstehen. Zahlreiche Hinweise und Querverweise zwischen den einzelnen Teilen und Kapiteln erlauben eine effiziente Nutzung des Werkes. Infolge der Uneinheitlichkeit nationaler und internationaler Normen sowie der Gewohnheiten einzelner Fachgebiete ließen sich in wenigen Fällen unterschiedliche Verwendung gleicher Begriffe und Formelzeichen nicht immer vermeiden.

„Informationen aus der Industrie“ mit technisch relevanten Anzeigen bekannter Firmen zeigen industrielle Ausführungsformen und ihre Bezugsquellen.

Mit dem Erscheinen der 26. Auflage wird Prof. Grote nach 25 Jahren und sieben Auflagen aus dem Herausgeberteam ausscheiden. Die Herausgeber danken ihm sehr herzlich für seine lange und zeichensetzende Herausgeberschaft des DUBBEL.

Die Herausgeber danken darüber hinaus allen am Werk Beteiligten, in erster Linie den Autoren für ihr Engagement und ihre Bereitschaft zur kurzfristigen Prüfung der Manuskripte im neuen Layout. Wir danken insbesondere Frau G. Fischer vom Springer-Verlag für die verlagsseitige Koordination und Frau N. Kroke, Frau J. Krause sowie Frau Y. Schlatter von der Fa. le-tex publishing services für die engagierte und sachkundige Zusammenarbeit beim Satz und der Kommunikation mit den Autoren. Ein Dank aller Beteiligten geht auch an die Verantwortlichen für das Lektorat beim Springer-Verlag, Herrn M. Kottusch, der insbesondere die Weiterentwicklung des Layouts und die Aufnahme des Mathematikteils vorangetrieben hat, sowie Herrn A. Garbers, der in diesem Jahr das Lektorat des DUBBEL übernommen hat. Beide wurden wirkungsvoll von Frau L. Burato unterstützt.

Abschließend sei auch den vorangegangenen Generationen von Autoren gedankt. Sie haben durch ihre gewissenhafte Arbeit die Anerkennung des DUBBEL begründet, die mit der jetzt vorliegenden 26. Auflage des DUBBEL weiter gefestigt wird.

Dank der Mitwirkung zahlreicher sehr engagierter und kompetenter Personen steht die Marke DUBBEL weiter für höchste Qualität, nunmehr in einem dreibändigen Standardwerk für Ingenieurinnen und Ingenieure in Studium und Beruf.

Bochum und Berlin  
im Herbst 2020

Prof. Dr.-Ing. Beate Bender  
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich

---

## Hinweise zur Benutzung

**Gliederung.** Das Werk umfasst 26 Teile in drei Bänden: Band 1 enthält Grundlagen und Tabellen. Hier findet sich das technische Basiswissen für Ingenieure bestehend aus den Teilen Mathematik, Mechanik, Festigkeitslehre, Werkstofftechnik, Thermodynamik und Maschinendynamik sowie allgemeine Tabellen. Band 2 behandelt Anwendungen und Band 3 richtet den Fokus auf Maschinen und Systeme. Die Bände sind jeweils unterteilt in Teile, die Teile in Kapitel, Abschnitte und Unterabschnitte.

Weitere Unterteilungen werden durch fette Überschriften sowie fette und kursive Zeilenanfänge (sog. Spitzmarken) vorgenommen. Sie sollen dem Leser das schnelle Auffinden spezieller Themen erleichtern.

*Kolumnentitel* oder Seitenüberschriften enthalten auf den linken Seiten (gerade Endziffern) die Namen der Autoren, auf der rechten jene der Kapitel.

*Kleindruck.* Er wurde für Bildunterschriften und Tabellenüberschriften gewählt, um diese Teile besser vom übrigen Text abzuheben und Druckraum zu sparen.

*Inhalts- und Sachverzeichnis* sind zur Erleichterung der Benutzung des Werkes ausführlich und Band-übergreifend gestaltet.

**Kapitel.** Es bildet die Grundeinheit, in der Gleichungen, Bilder und Tabellen jeweils wieder von 1 ab nummeriert sind. Fett in blau gesetzte Bild- und Tabellenbezeichnungen sollen ein schnelles Erkennen der Zuordnung von Bildern und Tabellen zum Text ermöglichen.

**Anhang.** Am Ende vieler Kapitel befinden sich Anhänge zu Diagrammen und Tabellen sowie zur speziellen Literatur. Sie enthalten die für die praktische Zahlenrechnung notwendigen Kenn- und Stoffwerte sowie Sinnbilder und Normenauszüge des betreffenden Fachgebietes und das im Text angezogene Schrifttum. Am Ende von Band 1 findet sich zudem das Kapitel „Allgemeine Tabellen“. Er enthält die wichtigsten physikalischen Konstanten, die Umrechnungsfaktoren für die Einheiten, das periodische System der Elemente sowie ein Verzeichnis von Bezugsquellen für Technische Regelwerke und Normen. Außerdem sind die Grundgrößen von Gebieten, deren ausführliche Behandlung den Rahmen des Buches sprengen würden, aufgeführt. Hierzu zählen die Kern-, Licht-, Schall- und Umwelttechnik.

**Nummerierung und Verweise.** Die *Nummerierung* der Bilder, Tabellen, Gleichungen und Literatur gilt für das jeweilige Kapitel. Gleichungsnummern stehen in runden ( ), Literaturziffern in eckigen [ ] Klammern.

**Bilder.** Hierzu gehören konstruktive und Funktionsdarstellungen, Diagramme, Flussbilder und Schaltpläne.

*Bildgruppen.* Sie sind, soweit notwendig, in Teilbilder **a, b, c** usw. untergliedert (z. B. Bd. 3, Abb. 14.5). Sind diese nicht in der Bildunterschrift erläutert, so befinden sich die betreffenden Erläuterungen im Text (z. B. Bd. 1, Abb. 17.12). Kompliziertere Bauteile oder Pläne enthalten Positionen, die entweder im Text (z. B. Bd. 3, Abb. 2.26) oder in der Bildunterschrift erläutert sind (z. B. Bd. 3, Abb. 51.5).

*Sinnbilder* für Schaltpläne von Leitungen, Schaltern, Maschinen und ihren Teilen sowie für Aggregate sind nach Möglichkeit den zugeordneten DIN-Normen oder den Richtlinien entnommen. In Einzelfällen wurde von den Zeichnungsnormen abgewichen, um die Übersicht der Bilder zu verbessern.

**Tabellen.** Sie ermöglichen es, Zahlenwerte mathematischer und physikalischer Funktionen schnell aufzufinden. In den Beispielen sollen sie den Rechnungsgang einprägsam erläutern und die Ergebnisse übersichtlich darstellen. Aber auch Gleichungen, Sinnbilder und Diagramme sind zum besseren Vergleich bestimmter Verfahren tabellarisch zusammengefasst.

**Literatur.** *Spezielle Literatur.* Sie ist auf das Sachgebiet eines Kapitels bezogen und befindet sich am Ende eines Kapitels. Eine Ziffer in eckiger [ ] Klammer weist im Text auf das entsprechende Zitat hin. Diese Verzeichnisse enthalten häufig auch grundlegende Normen, Richtlinien und Sicherheitsbestimmungen.

*Allgemeine Literatur.* Auf das Sachgebiet eines Kapitels bezogene Literatur befindet sich ebenfalls am Ende eines Kapitels und enthält die betreffenden Grundlagenwerke. Literatur, die sich auf das Sachgebiet eines ganzen Teils bezieht, befindet sich am Ende des Teils.

**Sachverzeichnis.** Nach wichtigen Einzelstichwörtern sind die Stichworte für allgemeine, mehrere Kapitel umfassende Begriffe wie z. B. „Arbeit“, „Federn“ und „Steuerungen“ zusammengefasst. Zur besseren Übersicht ersetzt ein Querstrich nur ein Wort. In diesen Gruppen sind nur die wichtigsten Begriffe auch als Einzelstichwörter aufgeführt. Dieses raumsparende Verfahren lässt natürlich immer einige berechtigte Wünsche der Leser offen, vermeidet aber ein zu langes und daher unübersichtliches Verzeichnis.

**Gleichungen.** Sie sind der Vorteile wegen als Größengleichungen geschrieben. Sind Zahlenwertgleichungen, wie z. B. bei empirischen Gesetzen oder bei sehr häufig vorkommenden Berechnungen erforderlich, so erhalten sie den Zusatz „Zgl.“ und die gesondert aufgeführten Einheiten den Zusatz „in“. Für einfachere Zahlenwertgleichungen werden gelegentlich auch zugeschnittene Größengleichungen benutzt. Exponentialfunktionen sind meist in der

Form „exp(x)“ geschrieben. Wo möglich, wurden aus Platzgründen schräge statt waagerechte Bruchstriche verwendet.

**Formelzeichen.** Sie wurden in der Regel nach DIN 1304 gewählt. Dies ließ sich aber nicht konsequent durchführen, da die einzelnen Fachnormenausschüsse unabhängig sind und eine laufende Anpassung an die internationale Normung erfolgt. Daher mussten in einzelnen Fachgebieten gleiche Größen mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet werden. Aus diesen Gründen, aber auch um lästiges Umblättern zu ersparen, wurden die in jeder Gleichung vorkommenden Größen wenn möglich in ihrer unmittelbaren Nähe erläutert. Bei Verweisen werden innerhalb eines Kapitels die in den angezogenen Gleichungen erfolgten Erläuterungen nicht wiederholt. Wurden Kompromisse bei Formelzeichen der einzelnen Normen notwendig, so ist dies an den betreffenden Stellen vermerkt.

Zeichen, die sich auf die Zeiteinheit beziehen, tragen einen Punkt. Beispiel: Bd. 1, Gl. (17.5). Variable sind kursiv, Vektoren und Matrizen fett kursiv und Einheiten steil gesetzt.

**Einheiten.** In diesem Werk ist das Internationale bzw. das SI-Einheitensystem (Système international) verbindlich. Eingeführt ist es durch das „Gesetz über Einheiten im Messwesen“ vom 2. 7. 1969 mit seiner Ausführungsverordnung vom 26. 6. 1970. Außer seinen sechs Basiseinheiten m, kg, s, A, K und cd werden auch die abgeleiteten Einheiten N, Pa, J, W und Pa s benutzt. Unzweckmäßige Zahlenwerte können dabei nach DIN 1301 durch Vorsätze für dezimale Vielfache und Teile nach Bd. 1, Tab. 49.3 ersetzt werden. Hierzu lässt auch die Ausführungsverordnung folgende Einheiten bzw. Namen zu:

|         |                                       |                     |                       |
|---------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Masse   | 1 t = 1000 kg                         | Zeit                | 1 h = 60 min = 3600 s |
| Volumen | 1 l = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> | Temperaturdifferenz | 1 °C = 1 K            |
| Druck   | 1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa            | Winkel              | 1° = π rad/180        |

Für die Einheit 1 rad = 1 m/m darf nach DIN 1301 bei Zahlenrechnungen auch 1 stehen.

Da ältere Urkunden, Verträge und älteres Schrifttum noch die früheren Einheitensysteme enthalten, sind ihre Umrechnungsfaktoren für das internationale Maßsystem in Bd. 1, Tab. 49.5 aufgeführt.

**Druck.** Nach DIN 1314 wird der Druck  $p$  in der Einheit bar angegeben und zählt vom Nullpunkt aus. Druckdifferenzen werden durch die Formelzeichen, nicht aber durch die Einheit gekennzeichnet. Dies gilt besonders für die Manometerablesung bzw. atmosphärischen Druckdifferenzen.

**DIN-Normen.** Hier sind die bei Abschluss der Manuskripte gültigen Ausgaben maßgebend. Dies gilt auch für die dort gegebenen Definitionen und für die angezogenen Richtlinien.

## Chronik des Taschenbuchs

Der Plan eines Taschenbuchs für den Maschinenbau geht auf eine Anregung von Heinrich Dubbel, Dozent und später Professor an der Berliner Beuth-Schule, der namhaftesten deutschen Ingenieurschule, im Jahre 1912 zurück. Die Diskussion mit Julius Springer, dem für die technische Literatur zuständigen Teilhaber der „Verlagsbuchhandlung Julius Springer“ (wie die Firma damals hieß), dem Dubbel bereits durch mehrere Fachveröffentlichungen verbunden war, führte rasch zu einem positiven Ergebnis. Dubbel übernahm die Herausgeberschaft, stellte die – in ihren Grundzügen bis heute unverändert gebliebene – Gliederung auf und gewann, soweit er die Bearbeitung nicht selbst durchführte, geeignete Autoren, zum erheblichen Teil Kollegen aus der Beuth-Schule. Bereits Mitte 1914 konnte die 1. Auflage erscheinen.

Zunächst war der Absatz unbefriedigend, da der 1. Weltkrieg ausbrach. Das besserte sich aber nach Kriegsende und schon im Jahre 1919 erschien die 2. Auflage, dicht gefolgt von weiteren in den Jahren 1920, 1924, 1929, 1934, 1939, 1941 und 1943. Am 1. 3. 1933 wurde das Taschenbuch als „Lehrbuch an den Preußischen Ingenieurschulen“ anerkannt.

H. Dubbel bearbeitete sein Taschenbuch bis zur 9. Auflage im Jahre 1943 selbst. Die 10. Auflage, die Dubbel noch vorbereitete, deren Erscheinen er aber nicht mehr erlebte, war im wesentlichen ein Nachdruck der 9. Auflage.

Nach dem Krieg ergab sich bei der Planung der 11. Auflage der Wunsch, das Taschenbuch gleichermaßen bei den Technischen Hochschulen und den Ingenieurschulen zu verankern. In diesem Sinn wurden gemeinsam Prof. Dr.-Ing. Fr. Sass, Ordinarius für Dieselmotoren an der Technischen Universität Berlin, und Baudirektor Dipl.-Ing. Charles Bouché, Direktor der Beuth-Schule, unter Mitwirkung des Oberingenieurs Dr.-Ing. Alois Leitner, als Herausgeber gewonnen. Das gesamte Taschenbuch wurde nach der bewährten Disposition H. Dubbels neu bearbeitet und mehrere Fachgebiete neu eingeführt: Ähnlichkeitsmechanik, Gasdynamik, Gaserzeuger und Kältetechnik. So gelang es, den technischen Fortschritt zu berücksichtigen und eine breitere Absatzbasis für das Taschenbuch zu schaffen.

In der 13. Auflage wurden im Vorgriff auf das Einheitengesetz das technische und das internationale Maßsystem nebeneinander benutzt. In dieser Auflage wurde Prof. Dr.-Ing. Egon Martyrer von der Technischen Universität Hannover als Mitherausgeber herangezogen.

Die 14. Auflage wurde von den Herausgebern W. Beitz und K.-H. Küttner und den Autoren vollständig Neubearbeitet und erschien 1981, also 67 Jahre nach der ersten. Auch hier wurde im Prinzip die Disposition und die Art der Auswahl der Autoren und Herausgeber beibehalten. Inzwischen hatten aber besonders die Computertechnik, die Elektronik, die Regelung und die Statistik den Maschinenbau beeinflusst. So wurden umfangreichere Berechnungs- und Steuerverfahren entwickelt, und es entstanden neue Spezialgebiete. Der Umfang des unbedingt nötigen Stoffes führte zu zweispaltiger Darstellung bei größerem Satzspiegel. So ist wohl die unveränderte Bezeichnung „Taschenbuch“ in der Tradition und nicht im Format begründet.

Das Ansehen, dessen sich das Taschenbuch überall erfreute, führte im Lauf der Jahre auch zu verschiedenen Übersetzungen in fremde Sprachen.

Eine erste russische Ausgabe gab in den zwanziger Jahren der Springer-Verlag selbst heraus, eine weitere erschien unautorisiert. Nach dem 2. Weltkrieg wurden Lizenzen für griechische, italienische, jugoslawische, portugiesische, spanische und tschechische Ausgaben erteilt. Von der Neubearbeitung (14. Auflage) erschienen 1984 eine italienische, 1991 eine chinesische und 1994 eine englische Übersetzung.

1997 wurde K.-H. Grote Mitherausgeber und begleitete 7 Auflagen bis 2018, darunter auch die beiden interaktiven Ausgaben des Taschenbuchs für Maschinenbau um die Jahrtausendwende. Jörg Feldhusen wurde zur 21. Auflage Mitherausgeber des DUBBEL. Mit der 25. Ausgabe übernahmen B. Bender und D. Göhlich zunächst die Mit-Herausgeberschaft gemeinsam mit K.-H. Grote. Entsprechend der Entwicklung des maschinenbaulichen Kontexts wurden die Inhalte des Dubbel erweitert und aktualisiert wie beispielsweise die komplette Überarbeitung des Kapitels Energietechnik oder die gemeinsame Neustrukturierung der Kapitel Mechatronik und Regelungstechnik erkennen lassen. Mit der 26. Auflage übernahmen B. Bender und D. Göhlich die alleinige Herausgeberschaft. Sie führten 2020 eine übersichtliche Band-Dreiteilung ein. Bereits 2001 übertraf der DUBBEL die Marke von 1 Million verkauften Exemplaren seit der Erstauflage. Dieses beachtliche Gesamtergebnis wurde durch die gewissenhaft arbeitenden Autoren und Herausgeber, die sorgfältige Bearbeitung im Verlag und die exakte drucktechnische Herstellung möglich.

## **Biographische Daten über H. Dubbel**

Heinrich Dubbel, der Schöpfer des Taschenbuches, wurde am 8. 4. 1873 als Sohn eines Ingenieurs in Aachen geboren. Dort studierte er an der Technischen Hochschule Maschinenbau und arbeitete in der väterlichen Fabrik als Konstrukteur, nachdem er in Ohio/USA Auslandserfahrungen gesammelt hatte. Vom Jahre 1899 ab lehrte er an den Maschinenbau-Schulen in Köln, Aachen und Essen. Im Jahre 1911 ging er an die Berliner Beuth-Schule, wo er nach fünf Jahren den Titel Professor erhielt. 1934 trat er wegen politischer Differenzen mit den Behörden aus dem öffentlichen Dienst aus und widmete sich in den folgenden Jahren vorwiegend der Beratung des Springer-Verlages auf dem Gebiet des Maschinenbaus. Er starb am 24. 5. 1947 in Berlin.

Dubbel hat sich in hohem Maße auf literarischem Gebiet betätigt. Seine Aufsätze und Bücher, insbesondere über Dampfmaschinen und ihre Steuerungen, Dampfturbinen, Öl- und Gasmaschinen und Fabrikbetrieb genossen großes Ansehen.

Durch das „Taschenbuch für den Maschinenbau“ wird sein Name noch bei mancher Ingenieurgeneration in wohlverdienter Erinnerung bleiben.



# FERTIGUNGSSIMULATION: VOM GEWUSST, WIE ZUM WISSEN, WARUM!

**PRODUKTENTWICKLUNGSKOSTEN REDUZIEREN  
UND PRODUKTQUALITÄT VERBESSERN**

Altair bietet einfach zu erlernende Werkzeuge, die es allen Ingenieuren ermöglichen, die Simulation zu nutzen und so das Verständnis für das Zusammenspiel von Design- und Prozessvariablen zu verbessern.

Eliminieren Sie kostspielige Prototypen und verkürzen Sie die Entwicklungszyklen mit Simulationen für verschiedene Fertigungsprozesse wie Gießen, Metallumformung, Extrusion, Spritzguss und die additive Fertigung.

Erfahren Sie mehr unter [altair.com/manufacturing-applications](https://altair.com/manufacturing-applications)



# FLENDER

---

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Grundlagen der Produktentwicklung

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens</b>                            | <b>3</b> |
|          | Beate Bender, Jörg Feldhusen, Dieter Krause, Gregor Beckmann, Kristin Paetzold und Albert Hövel |          |
| 1.1      | Technische Systeme  | 3        |
| 1.1.1    | Energie-, Stoff- und Signalumsatz   | 4        |
| 1.1.2    | Funktionszusammenhang   | 4        |
| 1.1.3    | Wirkzusammenhang  | 7        |
| 1.1.4    | Bauzusammenhang   | 8        |
| 1.1.5    | Übergeordneter Systemzusammenhang   | 9        |
| 1.2      | Methodisches Vorgehen   | 9        |
| 1.2.1    | Allgemeine Arbeitsmethodik  | 10       |
| 1.2.2    | Abstrahieren zum Erkennen der Funktionen  | 10       |
| 1.2.3    | Suche nach Lösungsprinzipien  | 10       |
| 1.2.4    | Beurteilen von Lösungen   | 13       |
| 1.2.5    | Kostenermittlung  | 16       |
| 1.3      | Arbeitsphasen im Produktentwicklungsprozess   | 19       |
| 1.3.1    | Klären der Aufgabenstellung   | 20       |
| 1.3.2    | Konzipieren   | 21       |
| 1.3.3    | Entwerfen   | 22       |
| 1.3.4    | Ausarbeiten   | 22       |
| 1.3.5    | Validierung und Verifikation  | 24       |
| 1.4      | Gestaltungsregeln   | 25       |
| 1.4.1    | Grundregeln   | 25       |
| 1.4.2    | Gestaltungsprinzipien   | 25       |
| 1.4.3    | Gestaltungsrichtlinien  | 29       |
| 1.5      | Entwicklung varianter Produkte  | 35       |
| 1.5.1    | Modulare Produktstrukturierung  | 35       |
| 1.5.2    | Produktstrukturstrategien   | 38       |
| 1.5.3    | Methoden der Produktstrukturierung  | 40       |
| 1.6      | Toleranzgerechtes Konstruieren  | 41       |
| 1.6.1    | Grundlagen für ein Toleranzmanagement   | 41       |
| 1.6.2    | Die Toleranzvergabe   | 44       |
| 1.6.3    | Die Toleranzanalyse   | 46       |
| 1.6.4    | Prozessfähigkeitsanalyse  | 46       |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 1.7  | Normen und Zeichnungswesen . . . . .                                     | 47        |
| 1.7.1  | Normenwerk . . . . .   | 47        |
| 1.7.2  | Grundnormen . . . . .  | 50        |
| 1.7.3  | Zeichnungen und Stücklisten . . . . .                                    | 56        |
| 1.7.4  | Sachnummernsysteme . . . . .   | 58        |
|  | Literatur Spezielle Literatur . . . . .                                  | 60        |
| <b>2</b>                                       | <b>Anwendung für Maschinensysteme der Stoffverarbeitung . .</b>          | <b>65</b> |
|  | Jens-Peter Majschak  |           |
| 2.1  | Aufgabe und Einordnung . . . . .   | 65        |
| 2.2  | Struktur von Verarbeitungsmaschinen . . . . .                            | 66        |
| 2.2.1  | Verarbeitungssystem . . . . .  | 67        |
| 2.2.2  | Antriebs- und Steuerungssystem . . . . .                                 | 73        |
| 2.2.3  | Stütz- und Hüllsystem . . . . .  | 76        |
| 2.3  | Verarbeitungsanlagen . . . . .   | 78        |
|  | Literatur . . . . .  | 78        |
| <b>3</b>                                       | <b>Bio-Industrie-Design: Herausforderungen und Visionen . . .</b>        | <b>79</b> |
|  | Luigi Colani und Juri Postnikov  |           |
|  | Literatur . . . . .  | 82        |
|  | <b>Literatur zu Teil I Grundlagen der Konstruktionstechnik . . . . .</b> | <b>83</b> |
| <br>   |  |           |
| <b>Teil II Elektronische Datenverarbeitung</b> |  |           |
| <b>4</b>                                       | <b>Einführung . . . . .</b>  | <b>87</b> |
|  | Reiner Anderl  |           |
| <b>5</b>                                       | <b>Informationstechnologie . . . . .</b>                                 | <b>89</b> |
|  | Reiner Anderl  |           |
| 5.1  | Grundlagen und Begriffe . . . . .  | 89        |
| 5.1.1  | Zahlendarstellungen und arithmetische<br>Operationen . . . . .           | 90        |
| 5.1.2  | Datenstrukturen und Datentypen . . . . .                                 | 92        |
| 5.1.3  | Algorithmen . . . . .  | 93        |
| 5.1.4  | Numerische Berechnungsverfahren . . . . .                                | 94        |
| 5.1.5  | Programmiermethoden . . . . .  | 95        |
| 5.1.6  | Programmiersprachen . . . . .  | 98        |
| 5.1.7  | Objektorientierte Programmierung . . . . .                               | 99        |
| 5.1.8  | Softwareentwicklung . . . . .  | 99        |
| 5.2  | Digitalrechnerntechnologie . . . . .                                     | 100       |
| 5.2.1  | Hardwarekomponenten . . . . .  | 100       |
| 5.2.2  | Hardwarearchitekturen . . . . .  | 102       |
| 5.2.3  | Rechnernetze . . . . .   | 103       |
| 5.2.4  | Client-/Serverarchitekturen . . . . .                                    | 104       |
| 5.2.5  | Betriebssysteme . . . . .  | 105       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.3      | Internet und Integrationstechnologien                             | 106        |
| 5.4      | Sicherheit  | 108        |
| 5.4.1    | Betriebssicherheit Safety   | 108        |
| 5.4.2    | IT-Sicherheit Security  | 108        |
| 5.4.3    | Kryptogra e   | 109        |
|          | Anhang  | 112        |
|          | Literatur   | 115        |
| <b>6</b> | <b>Virtuelle Produktentstehung</b>                                | <b>117</b> |
|          | Reiner Anderl   |            |
| 6.1      | Produktentstehungsprozess   | 117        |
| 6.2      | Basismethoden   | 118        |
| 6.2.1    | Geometrische Modellierung   | 118        |
| 6.2.2    | Featuretechnologie  | 121        |
| 6.2.3    | Parametrik und Zwangsbedingungen                                  | 122        |
| 6.2.4    | Wissensbasierte Modellierung                                      | 124        |
| 6.2.5    | Modellierung der Produktstruktur                                  | 125        |
| 6.2.6    | Durchgängige Erstellung von Dokumenten                            | 126        |
| 6.3      | CAX-Prozessketten   | 127        |
| 6.3.1    | CAD-CAE-Prozessketten   | 127        |
| 6.3.2    | Prozesskette CAD-FEM  | 128        |
| 6.3.3    | Prozesskette CAD-CFD  | 128        |
| 6.3.4    | Prozesskette CAD-MKS  | 128        |
| 6.3.5    | Prozesskette CAD-DMU  | 129        |
| 6.3.6    | Prozesskette CAD-CAM  | 129        |
| 6.3.7    | Prozesskette CAD-TPD  | 129        |
| 6.3.8    | Prozesskette CAD-VR/AR  | 130        |
| 6.3.9    | Prozesskette CAD-AF   | 130        |
| 6.4      | Produktdatenmanagement  | 130        |
| 6.4.1    | Methoden des Produktdatenmanagements                              | 131        |
| 6.4.2    | Funktionen des<br>Produktdatenmanagementsystems                   | 135        |
| 6.4.3    | Architektur des<br>Produktdatenmanagementsystems                  | 136        |
| 6.5      | Kooperative Produktentwicklung                                    | 138        |
| 6.6      | Schnittstellen  | 138        |
|          | Literatur   | 140        |
| <b>7</b> | <b>Elektronische Datenverarbeitung – Agentenbasiertes Steuern</b> | <b>143</b> |
|          | Arndt Lüder und Birgit Vogel-Heuser                               |            |
| 7.1      | Einleitung  | 143        |
| 7.2      | Agentenbegriff  | 143        |
| 7.3      | Entwurfsprozess für Agentensysteme                                | 144        |

|       |   |            |
|-------|---|------------|
| 7.4   | Anwendungsbeispiele . . . . .   | 146        |
| 7.4.1 | Agentenbasierte Produktionsplanung . . . . .                          | 146        |
| 7.4.2 | Agentenbasierte Feldsteuerung . . . . .                               | 148        |
| 7.4.3 | Agenten in der Intralogistik . . . . .                                | 149        |
|       | Literatur . . . . .   | 149        |
|       | <b>Literatur zu Teil II Elektronische Datenverarbeitung . . . . .</b> | <b>151</b> |

### Teil III Mechanische Konstruktionselemente

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>8</b> | <b>Bauteilverbindungen . . . . .</b>  | <b>155</b> |
|          | Helmut Wohlfahrt, Thomas Widder, Manfred Kaßner, Karl<br>Thomas, Klaus Dilger, Heinz Mertens und Robert Liebich |            |
| 8.1      | Schweißen . . . . .   | 155        |
| 8.1.1    | Schweißverfahren . . . . .  | 155        |
| 8.1.2    | Schweißbarkeit der Werkstoffe . . . . .   | 156        |
| 8.1.3    | Stoß- und Nahtarten . . . . .   | 170        |
| 8.1.4    | Darstellung der Schweißnähte . . . . .  | 173        |
| 8.1.5    | Festigkeit von Schweißverbindungen . . . . .  | 175        |
| 8.1.6    | Thermisches Abtragen . . . . .  | 185        |
| 8.2      | Löten und alternative Fügeverfahren . . . . .   | 187        |
| 8.2.1    | Lötvorgang . . . . .  | 187        |
| 8.2.2    | Weichlöten . . . . .  | 187        |
| 8.2.3    | Hartlöten . . . . .   | 188        |
| 8.2.4    | Hochtemperlöten . . . . .   | 190        |
| 8.2.5    | Lichtbogenlöten, Laserlöten . . . . .   | 190        |
| 8.2.6    | Umformtechnische Fügeverfahren . . . . .  | 191        |
| 8.3      | Kleben . . . . .  | 193        |
| 8.3.1    | Anwendung und Vorgang . . . . .   | 193        |
| 8.3.2    | Klebstoffe . . . . .  | 194        |
| 8.3.3    | Tragfähigkeit . . . . .   | 195        |
| 8.4      | Reibschlussverbindungen . . . . .   | 196        |
| 8.4.1    | Formen, Anwendungen . . . . .   | 196        |
| 8.4.2    | Pressverbände . . . . .   | 199        |
| 8.4.3    | Klemmverbindungen . . . . .   | 203        |
| 8.5      | Formschlussverbindungen . . . . .   | 205        |
| 8.5.1    | Formen, Anwendungen . . . . .   | 205        |
| 8.5.2    | Stiftverbindungen . . . . .   | 205        |
| 8.5.3    | Bolzenverbindungen . . . . .  | 206        |
| 8.5.4    | Keilverbindungen . . . . .  | 207        |
| 8.5.5    | Pass- und Scheibenfeder-Verbindungen . . . . .  | 208        |
| 8.5.6    | Zahn- und Keilwellenverbindungen . . . . .  | 209        |
| 8.5.7    | Polygonwellenverbindungen . . . . .   | 210        |
| 8.5.8    | Vorgespannte Welle-Nabe-Verbindungen . . . . .  | 210        |
| 8.5.9    | Axiale Sicherungselemente . . . . .   | 210        |
| 8.5.10   | Nietverbindungen . . . . .  | 211        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 8.6      | Schraubenverbindungen . . . . .   | 213        |
| 8.6.1    | Aufgaben . . . . .  | 213        |
| 8.6.2    | Kenngößen der Schraubenbewegung . . . . .   | 213        |
| 8.6.3    | Gewindearten . . . . .  | 213        |
| 8.6.4    | Schrauben- und Mutterarten . . . . .  | 215        |
| 8.6.5    | Schrauben- und Mutterwerkstoffe . . . . .   | 217        |
| 8.6.6    | Kräfte und Verformungen beim Anziehen von<br>Schraubenverbindungen . . . . .  | 218        |
| 8.6.7    | Überlagerung von Vorspannkraft und Betriebslast   | 221        |
| 8.6.8    | Auslegung und Dauerfestigkeitsberechnung von<br>Schraubenverbindungen . . . . .   | 225        |
| 8.6.9    | Sicherung von Schraubenverbindungen . . . . .   | 229        |
|          | Anhang . . . . .  | 232        |
|          | Literatur . . . . .   | 239        |
| <b>9</b> | <b>Federnde Verbindungen (Federn) . . . . .</b>   | <b>245</b> |
|          | Heinz Mertens, Robert Liebich und Peter Gust  |            |
| 9.1      | Aufgaben, Eigenschaften, Kenngrößen . . . . .   | 245        |
| 9.1.1    | Aufgaben . . . . .  | 245        |
| 9.1.2    | Federkennlinie, Federsteifigkeit,<br>Federnachgiebigkeit . . . . .  | 246        |
| 9.1.3    | Arbeitsaufnahmefähigkeit, Nutzungsgrad,<br>Dämpfungsvermögen, Dämpfungsfaktor . . . . .   | 246        |
| 9.2      | Metallfedern . . . . .  | 247        |
| 9.2.1    | Zug/Druck-beanspruchte Zug- oder Druckfedern  | 247        |
| 9.2.2    | Einfache und geschichtete Blattfedern (gerade<br>oder schwachgekrümmte, biegebeanspruchte<br>Federn) . . . . .                  | 248        |
| 9.2.3    | Spiralfedern (ebene gewundene,<br>biegebeanspruchte Federn) und Schenkelfedern<br>(biegebeanspruchte Schraubenfedern) . . . . . | 250        |
| 9.2.4    | Tellerfedern (scheibenförmige,<br>biegebeanspruchte Federn) . . . . .   | 251        |
| 9.2.5    | Drehstabfedern (gerade, drehbeanspruchte<br>Federn) . . . . .   | 253        |
| 9.2.6    | Zylindrische Schraubendruckfedern und<br>Schraubenzugfedern . . . . .   | 254        |
| 9.3      | Gummifedern . . . . .   | 258        |
| 9.3.1    | Der Werkstoff Gummi und seine Eigenschaften   | 258        |
| 9.3.2    | Gummifederelemente . . . . .  | 259        |
| 9.4      | Federn aus Faser-Kunststoff-Verbunden . . . . .   | 262        |
| 9.5      | Gasfedern . . . . .   | 263        |
| 9.6      | Industrie-Stoßdämpfer . . . . .   | 263        |
| 9.6.1    | Anwendungsgebiete . . . . .   | 263        |
| 9.6.2    | Funktionsweise des Industrie-Stoßdämpfers . . . . .   | 263        |
| 9.6.3    | Aufbau eines Industrie-Stoßdämpfers . . . . .   | 264        |
| 9.6.4    | Berechnung und Auswahl . . . . .  | 264        |
|          | Literatur . . . . .   | 264        |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>10</b> | <b>Kupplungen und Bremsen</b> . . . . .  | 267 |
|           | Armin Lohrengel und Peter Dietz  |     |
| 10.1      | Überblick, Aufgaben . . . . .  | 267 |
| 10.2      | Drehstarre, nicht schaltbare Kupplungen . . . . .                                | 268 |
|           | 10.2.1 Starre Kupplungen . . . . .   | 268 |
|           | 10.2.2 Drehstarre Ausgleichkupplungen . . . . .                                  | 268 |
| 10.3      | Elastische, nicht schaltbare Kupplungen . . . . .                                | 271 |
|           | 10.3.1 Feder- und Dämpfungsverhalten . . . . .                                   | 271 |
|           | 10.3.2 Auslegungsgesichtspunkte,<br>Schwingungsverhalten . . . . .               | 273 |
|           | 10.3.3 Bauarten . . . . .  | 275 |
|           | 10.3.4 Auswahlgesichtspunkte . . . . .   | 276 |
| 10.4      | Drehnachgiebige, nicht schaltbare Kupplungen . . . . .                           | 276 |
| 10.5      | Fremdgeschaltete Kupplungen . . . . .  | 277 |
|           | 10.5.1 Formschlüssige Schaltkupplungen . . . . .                                 | 280 |
|           | 10.5.2 Kraft-(Reib-)schlüssige Schaltkupplungen . . . . .                        | 280 |
|           | 10.5.3 Der Schaltvorgang bei reibschlüssigen<br>Schaltkupplungen . . . . .       | 282 |
|           | 10.5.4 Auslegung einer reibschlüssigen Schaltkupplung . . . . .                  | 284 |
|           | 10.5.5 Auswahl einer Kupplungsgröße . . . . .                                    | 285 |
|           | 10.5.6 Allgemeine Auswahlkriterien . . . . .                                     | 286 |
|           | 10.5.7 Bremsen . . . . .   | 286 |
| 10.6      | Selbsttätig schaltende Kupplungen . . . . .                                      | 287 |
|           | 10.6.1 Drehmomentgeschaltete Kupplungen . . . . .                                | 288 |
|           | 10.6.2 Drehzahlgeschaltete Kupplungen . . . . .                                  | 288 |
|           | 10.6.3 Richtungsgeschaltete Kupplungen (Freiläufe) . . . . .                     | 289 |
|           | Anhang . . . . .   | 291 |
|           | Literatur . . . . .  | 292 |
| <b>11</b> | <b>Wälzlager</b> . . . . .   | 295 |
|           | Gerhard Poll   |     |
| 11.1      | Kennzeichen und Eigenschaften der Wälzlager . . . . .                            | 295 |
| 11.2      | Bauarten der Wälzlager . . . . .   | 295 |
|           | 11.2.1 Lager für rotierende Bewegungen . . . . .                                 | 296 |
|           | 11.2.2 Linearwälzlager . . . . .   | 301 |
| 11.3      | Wälzlagerkä ge . . . . .   | 301 |
| 11.4      | Wälzlagerwerkstoffe . . . . .  | 302 |
| 11.5      | Bezeichnungen für Wälzlager . . . . .  | 302 |
| 11.6      | Konstruktive Ausführung von Lagerungen . . . . .                                 | 305 |
|           | 11.6.1 Fest-Loslager-Anordnung . . . . .   | 305 |
|           | 11.6.2 Schwimmende oder Stütz-Traglagerung<br>und angestellte Lagerung . . . . . | 306 |
|           | 11.6.3 Lagersitze, axiale und radiale Festlegung der<br>Lageringe . . . . .      | 307 |
|           | 11.6.4 Lagerluft . . . . .   | 308 |
| 11.7      | Wälzlagerschmierung . . . . .  | 308 |
|           | 11.7.1 Allgemeines . . . . .   | 308 |
|           | 11.7.2 Fettschmierung . . . . .  | 310 |



Ihr zuverlässiger Partner

## Weltweit führend

mayr® Antriebstechnik ist mit acht Vertriebsbüros in Deutschland, Niederlassungen in Europa, Asien, USA und über 30 weiteren Ländervertretungen auf der ganzen Welt vor Ort präsent.

Wir bieten führende Technologie bei

### ✓ **Sicherheitskupplungen**

*Drehmoment: 0,65 bis 1.000.000 Nm*

### ✓ **Wellenkupplungen**

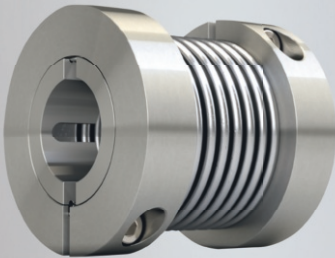
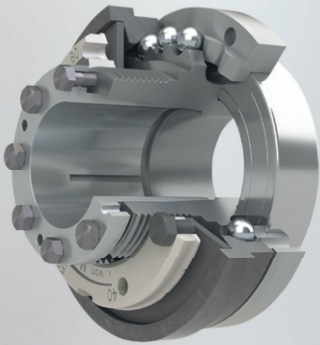
*Drehmoment: 0,1 bis 110.000 Nm*

### ✓ **Sicherheitsbremsen**

*Drehmoment: 1,1 bis 4.300 Nm*

Eine Vielzahl renommierter Maschinenhersteller vertraut auf die Zuverlässigkeit dieser Antriebskomponenten. Qualität und innovative, wirtschaftliche Lösungen sind weltweit gefragt.

Hochqualifizierte Ingenieure und Facharbeiter entwickeln und fertigen bei mayr® branchenoptimierte Antriebslösungen, die das Unternehmen weltweit bekannt gemacht haben und heute der Garant sind für rund 1200 sichere und attraktive Arbeitsplätze.



sicher | zuverlässig | innovativ  
[www.mayr.com](http://www.mayr.com)

Chr. Mayr GmbH + Co. KG  
Eichenstr. 1,

87665 Mauerstetten

Telefon 08341/804-0

[info@mayr.com](mailto:info@mayr.com), [www.mayr.com](http://www.mayr.com)

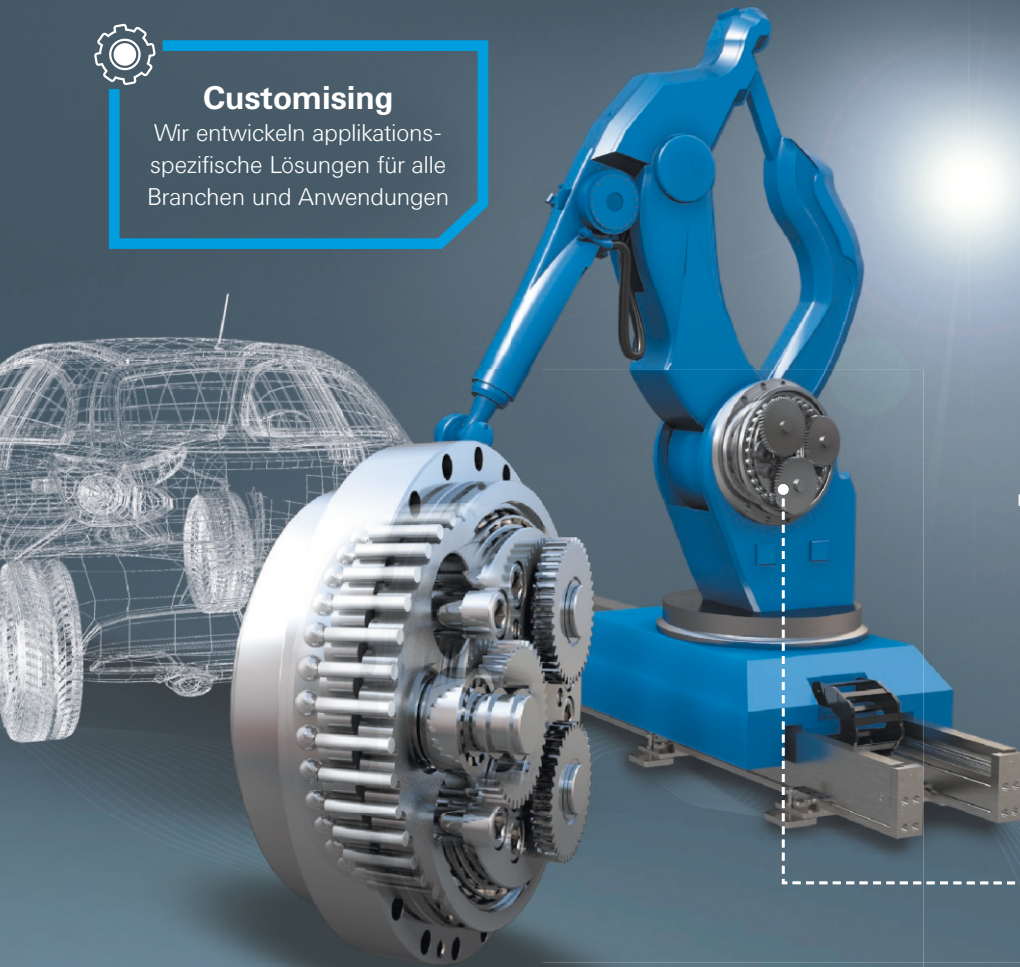
# So funktioniert Robotik

Präzise, robuste und zuverlässige Zykloidgetriebe von Nabtesco



## Customising

Wir entwickeln applikations-spezifische Lösungen für alle Branchen und Anwendungen



Antennenbau



Positionierung



Schweißen



Medizin-  
technik



Handling



Werkzeug-  
maschinenbau



Verpackungs-  
technik



Robotik



Wusstest Du, dass in 60% aller Industrieroboter Nabtesco-Getriebe stecken? Was unsere Getriebe so erfolgreich macht? Dank ihrer zykloiden Bauweise sind sie extrem präzise, außerordentlich leistungsfähig und besonders langlebig. Wir machen Roboter beweglich und gestalten die Zukunft.

## Präzisionsgetriebe

# Nabtesco

[www.nabtesco.de](http://www.nabtesco.de)



Erfahren Sie mehr über Nabtesco auf Youtube oder LinkedIn.

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 11.7.3    | Ölschmierung  | 311        |
| 11.7.4    | Feststoffschmierung   | 312        |
| 11.8      | Wälzlagerdichtungen   | 312        |
| 11.9      | Belastbarkeit und Lebensdauer der Wälzlager                       | 314        |
| 11.9.1    | Grundlagen  | 314        |
| 11.9.2    | Statische bzw. dynamische Tragfähigkeit und Lebensdauerberechnung | 315        |
| 11.10     | Bewegungswiderstand und Referenzdrehzahlen der Wälzlager          | 318        |
|           | Anhang  | 320        |
|           | Literatur   | 328        |
| <b>12</b> | <b>Gleitlagerungen</b>  | <b>331</b> |
|           | Ludger Deters und Dirk Bartel                                     |            |
| 12.1      | Grundlagen  | 331        |
| 12.1.1    | Aufgabe, Einteilung und Anwendungen                               | 331        |
| 12.1.2    | Wirkungsweise   | 331        |
| 12.1.3    | Reibungszustände  | 332        |
| 12.2      | Berechnung fluiddynamischer Gleitlager                            | 333        |
| 12.2.1    | Stationär belastete Radialgleitlager                              | 333        |
| 12.2.2    | Radialgleitlager im instationären Betrieb                         | 338        |
| 12.2.3    | Stationär belastete Axialgleitlager                               | 338        |
| 12.2.4    | Mehrgleitflächenlager   | 344        |
| 12.3      | Hydrostatische Anfahrhilfen                                       | 345        |
| 12.4      | Berechnung hydrostatischer Gleitlager                             | 345        |
| 12.4.1    | Hydrostatische Radialgleitlager                                   | 345        |
| 12.4.2    | Hydrostatische Axialgleitlager                                    | 347        |
| 12.5      | Dichtungen  | 348        |
| 12.6      | Wartungsfreie Gleitlager  | 348        |
| 12.7      | Konstruktive Gestaltung   | 349        |
| 12.7.1    | Konstruktion und Schmierspaltausbildung                           | 349        |
| 12.7.2    | Lagerschmierung   | 349        |
| 12.7.3    | Lagerkühlung  | 350        |
| 12.7.4    | Lagerwerkstoffe   | 351        |
| 12.7.5    | Lagerbauformen  | 352        |
|           | Anhang  | 353        |
|           | Literatur   | 357        |
| <b>13</b> | <b>Zugmittelgetriebe</b>  | <b>359</b> |
|           | Heinz Mertens und Robert Liebich                                  |            |
| 13.1      | Bauarten, Anwendungen   | 359        |
| 13.2      | Flachriemengetriebe   | 360        |
| 13.2.1    | Kräfte am Flachriemengetriebe                                     | 360        |
| 13.2.2    | Beanspruchungen   | 361        |
| 13.2.3    | Geometrische Beziehungen  | 361        |
| 13.2.4    | Kinematik, Leistung, Wirkungsgrad                                 | 362        |
| 13.2.5    | Riemenlauf und Vorspannung  | 363        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 13.2.6    | Riemenwerkstoffe  | 365        |
| 13.2.7    | Entwurfsberechnung  | 365        |
| 13.3      | Keilriemen  | 367        |
| 13.3.1    | Anwendungen und Eigenschaften   | 367        |
| 13.3.2    | Typen und Bauarten von Keilriemen   | 368        |
| 13.3.3    | Entwurfsberechnung  | 369        |
| 13.4      | Synchronriemen (Zahnriemen)   | 369        |
| 13.4.1    | Aufbau, Eigenschaften, Anwendung  | 369        |
| 13.4.2    | Gestaltungshinweise   | 370        |
| 13.4.3    | Entwurfsberechnung  | 370        |
| 13.5      | Kettengetriebe  | 371        |
| 13.5.1    | Bauarten, Eigenschaften, Anwendung  | 371        |
| 13.5.2    | Gestaltungshinweise   | 371        |
| 13.5.3    | Entwurfsberechnung  | 372        |
|           | Anhang  | 372        |
|           | Literatur   | 375        |
| <b>14</b> | <b>Reibradgetriebe</b>  | <b>377</b> |
|           | Gerhard Poll  |            |
| 14.1      | Wirkungsweise, Definitionen   | 377        |
| 14.2      | Bauarten, Beispiele   | 378        |
| 14.2.1    | Reibradgetriebe mit festem Übersetzungsverhältnis                                 | 378        |
| 14.2.2    | Wälzgetriebe mit stufenlos einstellbarer Übersetzung                              | 378        |
| 14.3      | Berechnungsgrundlagen   | 381        |
| 14.3.1    | Bohrbewegung  | 381        |
| 14.3.2    | Schlupf   | 382        |
| 14.3.3    | Übertragbare Leistung und Wirkungsgrad  | 383        |
| 14.3.4    | Gebräuchliche Werkstoffpaarungen  | 385        |
| 14.4      | Hinweise für Anwendung und Betrieb  | 385        |
|           | Literatur   | 386        |
| <b>15</b> | <b>Zahnradgetriebe</b>  | <b>389</b> |
|           | Bernd-Robert Höhn   |            |
| 15.1      | Stirnräder  | 390        |
| 15.1.1    | Verzahnungsgesetz   | 390        |
| 15.1.2    | Übersetzung, Zähnezahlverhältnis, Momentenverhältnis                              | 390        |
| 15.1.3    | Konstruktion von Eingriffslinie und Gegenflanke                                   | 391        |
| 15.1.4    | Flankenlinien und Formen der Verzahnung   | 391        |
| 15.1.5    | Allgemeine Verzahnungsgrößen  | 392        |
| 15.1.6    | Gleit- und Rollbewegung   | 394        |
| 15.1.7    | Evolventenverzahnung  | 394        |
| 15.1.8    | Sonstige Verzahnungen (außer Evolventen) und ungleichmäßig übersetzende Zahnräder | 398        |

# Einzigartige Performance ist Teamleistung.



**alpha Premium Line: Einzigartig. Individuell. Hocheffizient.**

**Gut ist Ihnen nicht gut genug? Dann haben wir für Sie das optimale Erfolgsrezept:** Profitieren Sie von unseren umfassenden Beratungsleistungen, die Ihnen Best-in-Class-Lösungen garantieren. Bauen Sie auf High End-Getriebe, wie die hochpräzisen Kraftpakete XP<sup>+</sup>, RP<sup>+</sup> und RPK<sup>+</sup> sowie die neuen Winkelvarianten XPC<sup>+</sup>, XPK<sup>+</sup> und RPC<sup>+</sup>. Damit übertreffen Sie die Leistungsdichte von Standardprodukten um ein Vielfaches.

**Wir beraten Sie gerne:** Tel. +49 7931 493-0



**WITTENSTEIN alpha – intelligente Antriebssysteme**

[www.wittenstein-alpha.de](http://www.wittenstein-alpha.de)



alpha



|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 15.2    | Verzahnungsabweichungen und -toleranzen, Flankenspiel              | 399 |
| 15.3    | Schmierung und Kühlung   | 401 |
| 15.3.1  | Schmierstoff und Schmierungsart                                    | 401 |
| 15.4    | Werkstoffe und Wärmebehandlung                                     |     |
|         | Verzahnungsherstellung   | 403 |
| 15.4.1  | Typische Beispiele aus verschiedenen Anwendungsgebieten            | 403 |
| 15.4.2  | Werkstoffe und Wärmebehandlung Gesichtspunkte für die Auswahl      | 403 |
| 15.5    | Tragfähigkeit von Gerad- und Schrägstirnrädern                     | 404 |
| 15.5.1  | Zahnschäden und Abhilfen   | 404 |
| 15.5.2  | Pflichtenheft  | 405 |
| 15.5.3  | Anhaltswerte für die Dimensionierung                               | 405 |
| 15.5.4  | Nachrechnung der Tragfähigkeit                                     | 408 |
| 15.6    | Kegelräder   | 416 |
| 15.6.1  | Geradzahn-Kegelräder   | 416 |
| 15.6.2  | Kegelräder mit Schräg- oder Bogenverzahnung                        | 416 |
| 15.6.3  | Zahnform   | 417 |
| 15.6.4  | Kegelrad-Geometrie   | 417 |
| 15.6.5  | Tragfähigkeit  | 418 |
| 15.6.6  | Lagerkräfte  | 418 |
| 15.6.7  | Hinweise zur Konstruktion von Kegelrädern                          | 418 |
| 15.6.8  | Sondergetriebe   | 418 |
| 15.7    | Stirnschraubräder  | 419 |
| 15.8    | Schneckengetriebe  | 419 |
| 15.8.1  | Zylinderschnecken-Geometrie  | 420 |
| 15.8.2  | Auslegung  | 421 |
| 15.8.3  | Zahnkräfte, Lagerkräfte  | 422 |
| 15.8.4  | Geschwindigkeiten, Beanspruchungskennwerte                         | 423 |
| 15.8.5  | Reibungszahl, Wirkungsgrad   | 424 |
| 15.8.6  | Nachrechnung der Tragfähigkeit                                     | 425 |
| 15.8.7  | Gestaltung, Werkstoffe, Lagerung, Genauigkeit, Schmierung, Montage | 427 |
| 15.9    | Umlaufgetriebe   | 428 |
| 15.9.1  | Kinematische Grundlagen, Bezeichnungen                             | 428 |
| 15.9.2  | Allgemeingültigkeit der Berechnungsgleichungen                     | 430 |
| 15.9.3  | Vorzeichenregeln   | 431 |
| 15.9.4  | Drehmomente, Leistungen, Wirkungsgrade                             | 431 |
| 15.9.5  | Selbsthemmung und Teilhemmung                                      | 434 |
| 15.9.6  | Konstruktive Hinweise  | 436 |
| 15.9.7  | Auslegung einfacher Planetengetriebe                               | 436 |
| 15.9.8  | Zusammengesetzte Planetengetriebe                                  | 439 |
| 15.10   | Gestaltung der Zahnradgetriebe                                     | 442 |
| 15.10.1 | Bauarten   | 442 |
| 15.10.2 | Anschluss an Motor und Arbeitsmaschine                             | 444 |
| 15.10.3 | Gestalten und Bemaßen der Zahnräder                                | 445 |
| 15.10.4 | Gestalten der Gehäuse  | 445 |
| 15.10.5 | Lagerung   | 446 |

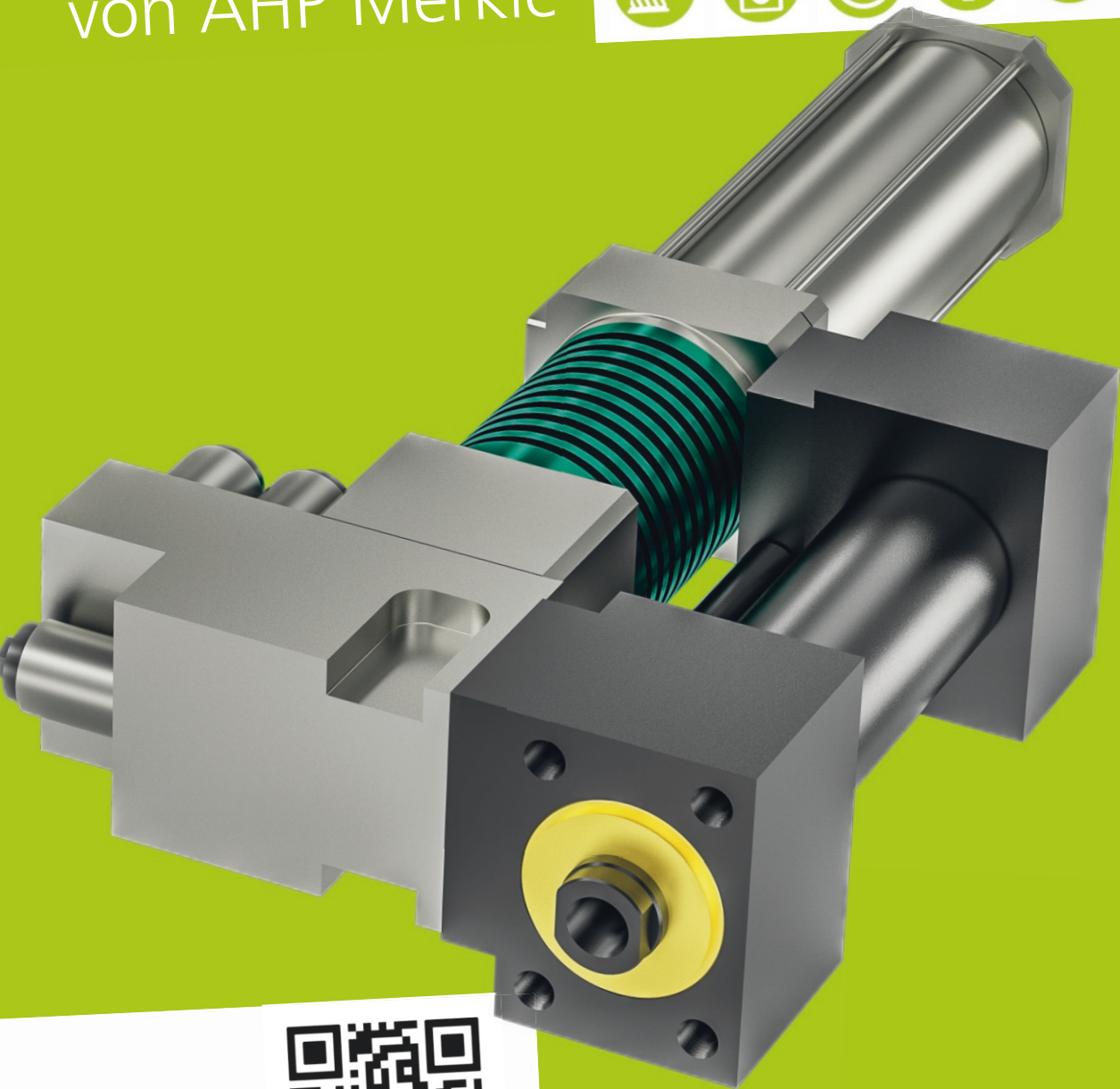
|   |            |
|---|------------|
| Anhang . . . . .  | 448        |
| Literatur . . . . .   | 449        |
| <b>16 Getriebetechnik . . . . .</b>   | <b>453</b> |
| Burkhard Corves und Hanfried Kerle  |            |
| 16.1 Getriebesystematik . . . . .   | 453        |
| 16.1.1 Grundlagen . . . . .   | 453        |
| 16.1.2 Arten ebener Getriebe . . . . .  | 455        |
| 16.2 Getriebeanalyse . . . . .  | 458        |
| 16.2.1 Kinematische Analyse ebener Getriebe . . . . .                               | 458        |
| 16.2.2 Kinetostatische Analyse ebener Getriebe . . . . .                            | 462        |
| 16.2.3 Kinematische Analyse räumlicher Getriebe . . . . .                           | 463        |
| 16.2.4 Laufgüte der Getriebe . . . . .  | 464        |
| 16.3 Getriebesynthese . . . . .   | 465        |
| 16.3.1 Viergelenkgetriebe . . . . .   | 465        |
| 16.3.2 Kurvengetriebe . . . . .   | 467        |
| 16.4 Sondergetriebe . . . . .   | 468        |
| Literatur . . . . .   | 468        |
| <b>Literatur zu Teil III Mechanische Konstruktionselemente . . . . .</b>            | <b>471</b> |
| <br>  |            |
| <b>Teil IV Fluidische Antriebe</b>  |            |
| <br>  |            |
| <b>17 Hydrostatik und Pneumatik in der Antriebstechnik . . . . .</b>                | <b>475</b> |
| Dierk Feldmann und Stephan Bartelmei  |            |
| 17.1 Das hydrostatische Getriebe . . . . .  | 475        |
| 17.1.1 Elemente des Hydrostatischen Getriebes . . . . .                             | 476        |
| 17.1.2 Berechnung des Betriebsverhaltens des<br>Hydrostatischen Getriebes . . . . . | 479        |
| 17.1.3 Energieübertragung durch Gase . . . . .                                      | 481        |
| Anhang . . . . .  | 482        |
| <br>  |            |
| <b>18 Bauelemente hydrostatischer Getriebe . . . . .</b>                            | <b>485</b> |
| Dierk Feldmann und Stephan Bartelmei  |            |
| 18.1 Verdrängermaschinen mit rotierender Welle . . . . .                            | 485        |
| 18.1.1 Zahnradpumpen und Zahnring-(Gerotor-)pumpen                                  | 488        |
| 18.1.2 Flügelzellenpumpen . . . . .   | 489        |
| 18.1.3 Kolbenpumpen . . . . .   | 490        |
| 18.1.4 Andere Pumpenbauarten . . . . .  | 491        |
| 18.1.5 Hydromotoren in Umlaufverdrängerbauart . . . . .                             | 491        |
| 18.1.6 Hydromotoren in Hubverdränger-(Kolben-)bauart                                | 492        |
| 18.2 Verdrängermaschinen mit translatorischem (Ein- und)<br>Ausgang . . . . .       | 493        |
| 18.3 Hydroventile . . . . .   | 494        |
| 18.3.1 Wegeventile . . . . .  | 494        |
| 18.3.2 Sperrventile . . . . .   | 496        |
| 18.3.3 Druckventile . . . . .   | 496        |
| 18.3.4 Stromventile . . . . .   | 499        |

# Der ELEKTRO-HYDRAULISCHE

# LINEARANTRIEB



von AHP Merkle



[www.ahp.de](http://www.ahp.de)

**AHP MERKLE**<sup>®</sup>  
BEWEGT



|                              |        |   |            |
|------------------------------|--------|---|------------|
|                              | 18.3.5 | Proportionalventile   | 500        |
|                              | 18.3.6 | Servoventile  | 500        |
|                              | 18.3.7 | Ventile für spezielle Anwendungen                                       | 501        |
|                              | 18.4   | Hydraulikflüssigkeiten  | 501        |
|                              | 18.5   | Hydraulikzubehör  | 502        |
| <b>19</b>                    |        | <b>Aufbau und Funktion der Hydrostatischen Getriebe</b>                 | <b>503</b> |
|                              |        | Dierk Feldmann und Stephan Bartelmei                                    |            |
|                              | 19.1   | Hydrostatische Kreisläufe   | 503        |
|                              | 19.1.1 | Offener Kreislauf   | 503        |
|                              | 19.1.2 | Geschlossener Kreislauf   | 503        |
|                              | 19.1.3 | Halboffener Kreislauf   | 504        |
|                              | 19.2   | Funktion des Hydrostatischen Getriebes                                  | 504        |
|                              | 19.2.1 | Berechnung des Betriebsverhaltens                                       | 504        |
|                              | 19.2.2 | Dynamisches Betriebsverhalten   | 505        |
|                              | 19.3   | Steuerung der Getriebeübersetzung                                       | 505        |
|                              | 19.3.1 | Getriebe mit Verstelleinheiten  | 505        |
|                              | 19.3.2 | Selbsttätig arbeitende Regler und Verstellungen<br>an Verstellmaschinen | 506        |
| <b>20</b>                    |        | <b>Auslegung und Ausführung von Hydrostatischen Getrieben</b>           | <b>509</b> |
|                              |        | Dierk Feldmann und Stephan Bartelmei                                    |            |
|                              | 20.1   | Schaltungen   | 509        |
|                              | 20.2   | Projektierung, Dimensionierung und konstruktive<br>Gestaltung           | 511        |
|                              | 20.2.1 | Projektierung   | 511        |
|                              | 20.2.2 | Dimensionierung   | 511        |
|                              | 20.2.3 | Konstruktive Gestaltung   | 512        |
|                              | 20.2.4 | Werkzeuge   | 512        |
| <b>21</b>                    |        | <b>Pneumatische Antriebe</b>  | <b>515</b> |
|                              |        | Dierk Feldmann und Stephan Bartelmei                                    |            |
|                              | 21.1   | Bauelemente   | 515        |
|                              | 21.2   | Schaltung   | 516        |
|                              |        | <b>Literatur zu Teil IV Fluidische Antriebe</b>                         | <b>517</b> |
| <br>                         |        |   |            |
| <b>Teil V Elektrotechnik</b> |        |   |            |
| <b>22</b>                    |        | <b>Grundlagen</b>   | <b>521</b> |
|                              |        | Wilfried Hofmann und Manfred Stiebler                                   |            |
|                              | 22.1   | Grundgesetze  | 521        |
|                              | 22.1.1 | Feldgrößen und -gleichungen   | 521        |
|                              | 22.1.2 | Elektrostatisches Feld  | 522        |
|                              | 22.1.3 | Stationäres Strömungsfeld   | 523        |
|                              | 22.1.4 | Stationäres magnetisches Feld   | 523        |
|                              | 22.1.5 | Quasistationäres elektromagnetisches Feld                               | 524        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 22.2      | Elektrische Stromkreise . . . . .                    | 524        |
| 22.2.1    | Gleichstromkreise . . . . .                          | 524        |
| 22.2.2    | Kirchhoff'sche Sätze . . . . .                       | 525        |
| 22.2.3    | Kapazitäten . . . . .                                | 527        |
| 22.2.4    | Induktionsgesetz . . . . .                           | 527        |
| 22.2.5    | Induktivitäten . . . . .                             | 528        |
| 22.2.6    | Magnetische Materialien . . . . .                    | 528        |
| 22.2.7    | Kraftwirkungen im elektromagnetischen Feld . . . . . | 529        |
| 22.3      | Wechselstromtechnik . . . . .                        | 531        |
| 22.3.1    | Wechselstromgrößen . . . . .                         | 531        |
| 22.3.2    | Leistung . . . . .                                   | 532        |
| 22.3.3    | Drehstrom . . . . .                                  | 533        |
| 22.3.4    | Schwingkreise und Filter . . . . .                   | 535        |
| 22.4      | Netzwerke . . . . .                                  | 538        |
| 22.4.1    | Ausgleichsvorgänge . . . . .                         | 538        |
| 22.4.2    | Netzwerkberechnung . . . . .                         | 540        |
| 22.5      | Werkstoffe und Bauelemente . . . . .                 | 540        |
| 22.5.1    | Leiter, Halbleiter, Isolatoren . . . . .             | 540        |
| 22.5.2    | Besondere Eigenschaften bei Leitern . . . . .        | 541        |
| 22.5.3    | Stoffe im elektrischen Feld . . . . .                | 542        |
| 22.5.4    | Stoffe im Magnetfeld . . . . .                       | 543        |
| 22.5.5    | Elektrolyte . . . . .                                | 543        |
|           | Anhang . . . . .                                     | 544        |
|           | Literatur . . . . .                                  | 546        |
| <b>23</b> | <b>Transformatoren und Wandler . . . . .</b>         | <b>547</b> |
|           | Wilfried Hofmann und Manfred Stiebler                |            |
| 23.1      | Einphasentransformatoren . . . . .                   | 547        |
| 23.1.1    | Wirkungsweise und Ersatzschaltbilder . . . . .       | 547        |
| 23.1.2    | Spannungsinduktion . . . . .                         | 548        |
| 23.1.3    | Leerlauf und Kurzschluss . . . . .                   | 548        |
| 23.1.4    | Zeigerdiagramm . . . . .                             | 549        |
| 23.2      | Messwandler . . . . .                                | 550        |
| 23.2.1    | Stromwandler . . . . .                               | 550        |
| 23.2.2    | Spannungswandler . . . . .                           | 550        |
| 23.3      | Drehstromtransformatoren . . . . .                   | 550        |
| 23.4      | Spezielle Anwendungen von Transformatoren . . . . .  | 552        |
| 23.4.1    | Regeltransformatoren . . . . .                       | 552        |
| 23.4.2    | Mittelfrequenztransformatoren . . . . .              | 552        |
| 23.4.3    | Berührungslose Energieübertragung . . . . .          | 554        |
|           | Literatur . . . . .                                  | 555        |
| <b>24</b> | <b>Elektrische Maschinen . . . . .</b>               | <b>557</b> |
|           | Wilfried Hofmann und Manfred Stiebler                |            |
| 24.1      | Allgemeines . . . . .                                | 557        |
| 24.1.1    | Maschinenarten . . . . .                             | 557        |
| 24.1.2    | Bauformen und Achshöhen . . . . .                    | 559        |
| 24.1.3    | Schutzarten . . . . .                                | 559        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 24.1.4    | Elektromagnetische Ausnutzung           | 560        |
| 24.1.5    | Verluste und Wirkungsgrad               | 560        |
| 24.1.6    | Erwärmung und Kühlung                   | 561        |
| 24.1.7    | Betriebsarten                           | 561        |
| 24.1.8    | Schwingungen und Geräusche              | 563        |
| 24.1.9    | Drehfelder in Drehstrommaschinen        | 564        |
| 24.2      | Asynchronmaschinen                      | 565        |
| 24.2.1    | Ausführungen                            | 565        |
| 24.2.2    | Ersatzschaltbild und Kreisdiagramm      | 565        |
| 24.2.3    | Betriebskennlinien                      | 566        |
| 24.2.4    | Einfluss der Stromverdrängung           | 567        |
| 24.2.5    | Einphasenmotoren                        | 568        |
| 24.3      | Synchronmaschinen                       | 568        |
| 24.3.1    | Ausführungen                            | 568        |
| 24.3.2    | Betriebsverhalten                       | 570        |
| 24.3.3    | Kurzschlussverhalten                    | 572        |
| 24.4      | Gleichstrommaschinen                    | 573        |
| 24.4.1    | Ausführungen                            | 573        |
| 24.4.2    | Stationäres Betriebsverhalten           | 573        |
| 24.4.3    | Instationäres Betriebsverhalten         | 574        |
| 24.5      | Kleinmotoren                            | 575        |
| 24.5.1    | Allgemeines                             | 575        |
| 24.5.2    | Asynchron-Kleinmotoren                  | 575        |
| 24.5.3    | Synchron-Kleinmotoren für Netzbetrieb   | 577        |
| 24.5.4    | Schrittmotoren                          | 577        |
| 24.5.5    | Elektronisch kommutierte Motoren        | 578        |
| 24.5.6    | Gleichstrom-Kleinmotoren                | 578        |
| 24.5.7    | Universalmotoren                        | 579        |
| 24.6      | Linearmotoren                           | 580        |
| 24.6.1    | Gleichstromlinearmotoren                | 580        |
| 24.6.2    | Asynchrolinearmotoren                   | 580        |
| 24.6.3    | Synchrolinearmotoren                    | 581        |
| 24.7      | Torquemotoren                           | 581        |
| 24.8      | High-Speed-Motoren                      | 582        |
|           | Anhang                                  | 583        |
|           | Literatur                               | 584        |
| <b>25</b> | <b>Leistungselektronik</b>              | <b>585</b> |
|           | Wilfried Hofmann und Manfred Stiebler   |            |
| 25.1      | Grundlagen und Bauelemente              | 585        |
| 25.1.1    | Allgemeines                             | 585        |
| 25.1.2    | Ausführungen von Halbleiterventilen     | 585        |
| 25.1.3    | Leistungsmerkmale der Ventile           | 586        |
| 25.1.4    | Einteilung der Stromrichter             | 588        |
| 25.2      | Wechselstrom- und Drehstromsteller      | 589        |
| 25.3      | Netzgeführte Stromrichter               | 589        |
| 25.3.1    | Netzgeführte Gleich- und Wechselrichter | 589        |
| 25.3.2    | Steuerkennlinien                        | 590        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 25.3.3    | Umkehrstromrichter                                       | 592        |
| 25.3.4    | Netzurückwirkungen                                       | 592        |
| 25.3.5    | Direktumrichter  | 593        |
| 25.4      | Selbstgeführte Stromrichter                              | 593        |
| 25.4.1    | Gleichstromsteller                                       | 593        |
| 25.4.2    | Selbstgeführte Wechselrichter und Umrichter              | 594        |
| 25.4.3    | Blindleistungskompensation                               | 598        |
|           | Literatur  | 598        |
| <b>26</b> | <b>Elektrische Antriebstechnik</b>                       | <b>599</b> |
|           | Wilfried Hofmann und Manfred Stiebler                    |            |
| 26.1      | Allgemeines  | 599        |
| 26.1.1    | Aufgaben   | 599        |
| 26.1.2    | Stationärer Betrieb                                      | 600        |
| 26.1.3    | Anfahren   | 601        |
| 26.1.4    | Drehzahlverstellung                                      | 601        |
| 26.1.5    | Drehschwingungen   | 603        |
| 26.1.6    | Elektrische Bremsung                                     | 603        |
| 26.1.7    | Elektromagnetische Verträglichkeit                       | 604        |
| 26.2      | Gleichstromantriebe                                      | 604        |
| 26.2.1    | Gleichstromantriebe mit netzgeführten<br>Stromrichtern   | 604        |
| 26.2.2    | Regelung in der Antriebstechnik                          | 605        |
| 26.2.3    | Drehzahlregelung   | 606        |
| 26.3      | Drehstromantriebe  | 609        |
| 26.3.1    | Antriebe mit Drehstromsteller                            | 609        |
| 26.3.2    | Stromrichter-kaskaden                                    | 610        |
| 26.3.3    | Stromrichtermotor  | 610        |
| 26.3.4    | Umrichter-antriebe mit selbstgeführtem<br>Wechselrichter | 611        |
| 26.3.5    | Regelung von Drehstromantrieben                          | 611        |
| 26.4      | Elektroantriebe in speziellen Anwendungen                | 616        |
| 26.4.1    | Servoantriebe  | 616        |
| 26.4.2    | Hybridantriebe in der Fahrzeugtechnik                    | 619        |
| 26.4.3    | Antriebe für Elektrofahrzeuge                            | 622        |
| 26.5      | Magnetlager  | 624        |
| 26.5.1    | Aktive Magnetlager                                       | 624        |
| 26.5.2    | Passive Magnetlager                                      | 628        |
| 26.5.3    | Leistungssteller   | 629        |
| 26.5.4    | Regelung von Magnetlagern                                | 630        |
|           | Literatur  | 632        |
| <b>27</b> | <b>Energieverteilung</b>                                 | <b>635</b> |
|           | Wilfried Hofmann und Manfred Stiebler                    |            |
| 27.1      | Allgemeines  | 635        |
| 27.2      | Kabel und Leitungen                                      | 636        |
| 27.2.1    | Leitungsnachbildung                                      | 637        |
| 27.2.2    | Kenngrößen der Leitungen                                 | 637        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 27.3      | Schaltgeräte . . . . .                                 | 638        |
| 27.3.1    | Schaltanlagen . . . . .                                | 638        |
| 27.3.2    | Hochspannungsschaltgeräte . . . . .                    | 638        |
| 27.3.3    | Niederspannungsschaltgeräte . . . . .                  | 639        |
| 27.4      | Schutzeinrichtungen . . . . .                          | 639        |
| 27.4.1    | Kurzschlusschutz . . . . .                             | 639        |
| 27.4.2    | Schutzschalter . . . . .                               | 639        |
| 27.4.3    | Thermischer Überstromschutz . . . . .                  | 640        |
| 27.4.4    | Kurzschlussströme . . . . .                            | 640        |
| 27.4.5    | Selektiver Netzschutz . . . . .                        | 641        |
| 27.4.6    | Berührungsschutz . . . . .                             | 642        |
| 27.5      | Energiespeicherung . . . . .                           | 643        |
| 27.5.1    | Speicherkraftwerke . . . . .                           | 643        |
| 27.5.2    | Batterien . . . . .                                    | 644        |
| 27.5.3    | Andere Energiespeicher . . . . .                       | 645        |
| 27.6      | Elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen . . . . . | 646        |
| 27.6.1    | Solarenergie . . . . .                                 | 646        |
| 27.6.2    | Windenergie . . . . .                                  | 648        |
| 27.6.3    | Antriebsstränge in Windenergieanlagen . . . . .        | 649        |
|           | Anhang . . . . .                                       | 654        |
|           | Literatur . . . . .                                    | 654        |
| <b>28</b> | <b>Elektrowärme . . . . .</b>                          | <b>657</b> |
|           | Wilfried Hofmann und Manfred Stiebler                  |            |
| 28.1      | Widerstandserwärmung . . . . .                         | 657        |
| 28.2      | Lichtbogenerwärmung . . . . .                          | 657        |
| 28.2.1    | Lichtbogenofen . . . . .                               | 657        |
| 28.2.2    | Lichtbogenschweißen . . . . .                          | 659        |
| 28.3      | Induktive Erwärmung . . . . .                          | 659        |
| 28.3.1    | Stromverdrängung, Eindringtiefe . . . . .              | 659        |
| 28.3.2    | Aufwölbung und Bewegungen im Schmelzgut . . . . .      | 659        |
| 28.3.3    | Oberflächenerwärmung . . . . .                         | 660        |
| 28.3.4    | Stromversorgung . . . . .                              | 660        |
| 28.4      | Dielektrische Erwärmung . . . . .                      | 661        |
|           | Literatur . . . . .                                    | 662        |
| <b>29</b> | <b>Elektronische Komponenten . . . . .</b>             | <b>663</b> |
|           | Ulrich Grünhaupt und Hans-Jürgen Gevatter              |            |
| 29.1      | Passive Komponenten . . . . .                          | 663        |
| 29.1.1    | Aufbau elektronischer Schaltungen . . . . .            | 663        |
| 29.1.2    | Widerstände . . . . .                                  | 663        |
| 29.1.3    | Kapazitäten . . . . .                                  | 665        |
| 29.1.4    | Induktivitäten . . . . .                               | 666        |
| 29.2      | Dioden . . . . .                                       | 666        |
| 29.2.1    | Diodenkennlinien und Daten . . . . .                   | 666        |
| 29.2.2    | Schottky-Dioden . . . . .                              | 667        |
| 29.2.3    | Kapazitätsdioden . . . . .                             | 667        |

|        |   |            |
|--------|---|------------|
| 29.2.4 | Z-Dioden                                  | 667        |
| 29.2.5 | Leistungsdioden                           | 667        |
| 29.3   | Transistoren                              | 668        |
| 29.3.1 | Bipolartransistoren                       | 668        |
| 29.3.2 | Feldeffekttransistoren                    | 670        |
| 29.3.3 | IGB-Transistoren                          | 671        |
| 29.4   | Thyristoren                               | 672        |
| 29.4.1 | Thyristorkennlinien und Daten             | 672        |
| 29.4.2 | Steuerung des Thyristors                  | 673        |
| 29.4.3 | Triacs, Diacs                             | 674        |
| 29.4.4 | Abschaltbare Thyristoren                  | 674        |
| 29.5   | Operationsverstärker                      | 675        |
| 29.6   | Optoelektronische Komponenten             | 675        |
| 29.6.1 | Optoelektronische Empfänger               | 675        |
| 29.6.2 | Optoelektronische Sender                  | 676        |
| 29.6.3 | Optokoppler                               | 677        |
|        | Literatur                                 | 678        |
|        | <b>Literatur zu Teil V Elektrotechnik</b> | <b>679</b> |

## Teil VI Messtechnik und Sensorik

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>30</b> | <b>Grundlagen</b>   | <b>683</b> |
|           | Horst Czichos und Werner Daum   |            |
| 30.1      | Aufgabe der Messtechnik   | 683        |
| 30.2      | Strukturen der Messtechnik  | 683        |
| 30.2.1    | Messkette   | 683        |
| 30.2.2    | Kenngrößen von Messgliedern   | 684        |
| 30.2.3    | Messabweichung von Messgliedern   | 685        |
| 30.2.4    | Dynamische Übertragungseigenschaften von Messgliedern   | 686        |
| 30.3      | Planung von Messungen   | 687        |
| 30.4      | Auswertung von Messungen  | 688        |
| 30.4.1    | Typ A Methode zur Ermittlung der Standardmessunsicherheit durch statistische Analyse von Messreihen | 688        |
| 30.4.2    | Typ B Methode zur Ermittlung der Standardmessunsicherheit   | 689        |
| 30.5      | Ergebnisdarstellung und Dokumentation   | 690        |
|           | Anhang  | 691        |
|           | Literatur   | 691        |
| <b>31</b> | <b>Messgrößen und Messverfahren</b>   | <b>693</b> |
|           | Horst Czichos und Werner Daum   |            |
| 31.1      | Einheitensystem und Gliederung der Messgrößen der Technik   | 693        |
| 31.1.1    | Internationales Einheitensystem   | 693        |
| 31.1.2    | Gliederung der Messgrößen   | 693        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 31.2      | Sensoren und Aktoren . . . . .                                 | 694        |
| 31.2.1    | Messgrößenumformung . . . . .                                  | 694        |
| 31.2.2    | Zerstörungsfreie Bauteil- und<br>Maschinendiagnostik . . . . . | 694        |
| 31.3      | Geometrische Messgrößen . . . . .                              | 695        |
| 31.3.1    | Längenmesstechnik . . . . .                                    | 696        |
| 31.3.2    | Gewinde- und Zahnradmesstechnik . . . . .                      | 698        |
| 31.3.3    | Oberflächenmesstechnik . . . . .                               | 699        |
| 31.3.4    | Mustererkennung und Bildverarbeitung . . . . .                 | 701        |
| 31.4      | Kinematische und schwingungstechnische Messgrößen . . . . .    | 703        |
| 31.4.1    | Wegmesstechnik . . . . .                                       | 703        |
| 31.4.2    | Geschwindigkeits- und Drehzahlmessstechnik . . . . .           | 705        |
| 31.4.3    | Beschleunigungsmessstechnik . . . . .                          | 706        |
| 31.5      | Mechanische Beanspruchungen . . . . .                          | 707        |
| 31.5.1    | Kraftmesstechnik . . . . .                                     | 707        |
| 31.5.2    | Dehnungsmessstechnik . . . . .                                 | 708        |
| 31.5.3    | Experimentelle Spannungsanalyse . . . . .                      | 711        |
| 31.5.4    | Druckmesstechnik . . . . .                                     | 712        |
| 31.6      | Strömungstechnische Messgrößen . . . . .                       | 714        |
| 31.6.1    | Flüssigkeitsstand . . . . .                                    | 714        |
| 31.6.2    | Volumen, Durchfluss, Strömungsgeschwindigkeit . . . . .        | 715        |
| 31.6.3    | Viskosimetrie . . . . .  | 716        |
| 31.7      | Thermische Messgrößen . . . . .                                | 717        |
| 31.7.1    | Temperaturmesstechnik . . . . .                                | 717        |
| 31.7.2    | Kalorimetrie . . . . .   | 719        |
| 31.8      | Optische Messgrößen . . . . .                                  | 719        |
| 31.8.1    | Licht- und Farbmessstechnik . . . . .                          | 719        |
| 31.8.2    | Refraktometrie . . . . .                                       | 721        |
| 31.8.3    | Polarimetrie . . . . .   | 721        |
| 31.9      | Umweltmessgrößen . . . . .                                     | 722        |
| 31.9.1    | Strahlungsmesstechnik . . . . .                                | 722        |
| 31.9.2    | Akustische Messtechnik . . . . .                               | 723        |
| 31.9.3    | Feuchtemesstechnik . . . . .                                   | 724        |
| 31.10     | Stoffmessgrößen . . . . .                                      | 726        |
| 31.10.1   | Anorganisch-chemische Analytik . . . . .                       | 726        |
| 31.10.2   | Organisch-chemische Analytik . . . . .                         | 727        |
| 31.10.3   | Oberflächenanalytik . . . . .                                  | 728        |
|           | Anhang . . . . .   | 729        |
|           | Literatur . . . . .  | 731        |
| <b>32</b> | <b>Messsignalverarbeitung . . . . .</b>                        | <b>733</b> |
|           | Horst Czichos und Werner Daum                                  |            |
| 32.1      | Signalarten . . . . .  | 733        |
| 32.2      | Analoge elektrische Messtechnik . . . . .                      | 734        |
| 32.2.1    | Strom-, Spannungs- und Widerstandsmesstechnik . . . . .        | 734        |
| 32.2.2    | Kompensatoren und Messbrücken . . . . .                        | 735        |
| 32.2.3    | Messverstärker . . . . .                                       | 736        |
| 32.2.4    | Funktionsbausteine . . . . .                                   | 738        |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 32.3   | Digitale elektrische Messtechnik . . . . .                                      | 739        |
| 32.3.1   | Digitale Messsignalдарstellung . . . . .  | 739        |
| 32.3.2   | Analog-Digital-Umsetzer . . . . .   | 740        |
| 32.4   | Rechnerunterstützte Messsignalverarbeitung . . . . .                            | 741        |
|  | Anhang . . . . .  | 743        |
|  | Literatur . . . . .   | 744        |
| <b>33</b>  | <b>Messwertausgabe . . . . .</b>  | <b>745</b> |
|  | Horst Czichos und Werner Daum   |            |
| 33.1   | Messwertanzeige . . . . .   | 745        |
| 33.1.1   | Messwerke . . . . .   | 745        |
| 33.1.2   | Digitalvoltmeter, Digitalmultimeter . . . . .                                   | 746        |
| 33.1.3   | Oszilloskope . . . . .  | 747        |
| 33.2   | Messwertregistrierung . . . . .   | 747        |
| 33.2.1   | Schreiber . . . . .   | 747        |
| 33.2.2   | Drucker . . . . .   | 748        |
| 33.2.3   | Messwertspeicherung . . . . .   | 748        |
|  | Literatur . . . . .   | 749        |
|  | <b>Literatur zu Teil VI Messtechnik und Sensorik . . . . .</b>                  | <b>751</b> |
| <br>   |   |            |
| <b>Teil VII Regelungstechnik und Mechatronik</b> |   |            |
| <b>34</b>  | <b>Grundlagen . . . . .</b>   | <b>755</b> |
|  | Michael Bongards, Dietmar Göhlich und Rainer Scheuring                          |            |
| 34.1   | Begriffe . . . . .  | 756        |
| 34.2   | Differentialgleichung und Übertragungsfunktion . . . . .                        | 760        |
|  | Literatur . . . . .   | 761        |
| <b>35</b>  | <b>Modellierung . . . . .</b>   | <b>763</b> |
|  | Rainer Scheuring, Dietmar Göhlich, Michael Bongards und<br>Helmut Reinhardt     |            |
| 35.1   | White-Box-Modellierung . . . . .  | 763        |
| 35.2   | Black-Box-Modellierung . . . . .  | 767        |
| 35.2.1   | Sprungantwort und Übergangsfunktion . . . . .                                   | 767        |
| 35.2.2   | Frequenzgang, Ortskurve und Bode-Diagramm . . . . .                             | 768        |
| 35.3   | Zusammenhang Frequenzbereich Zustandsraum . . . . .                             | 769        |
| 35.4   | Statisches Systemverhalten . . . . .  | 769        |
| 35.4.1   | Lineare Kennlinie . . . . .   | 770        |
| 35.4.2   | Nichtlinearitäten . . . . .   | 770        |
| 35.5   | Dynamisches Verhalten linearer zeitinvarianter<br>Übertragungsglieder . . . . . | 771        |
| 35.5.1   | $P$ -Glieder . . . . .  | 771        |
| 35.5.2   | $I$ -Glieder . . . . .  | 771        |
| 35.5.3   | $D$ -Glieder . . . . .  | 772        |
| 35.5.4   | $T_1$ -Glieder . . . . .  | 772        |
| 35.5.5   | $T_1$ -Glieder . . . . .  | 772        |
| 35.5.6   | $T_{2/n}$ -Glieder . . . . .  | 772        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 35.6      | Grundstrukturen des Wirkungsplans . . . . .                                     | 773        |
| 35.6.1    | Reihenstruktur . . . . .  | 773        |
| 35.6.2    | Parallelstruktur . . . . .  | 773        |
| 35.6.3    | Kreisstruktur . . . . .   | 774        |
| 35.7      | Regelstrecken . . . . .   | 774        |
| 35.7.1    | $P$ -Strecke 0. Ordnung ( $P-T_0$ ) . . . . .                                   | 774        |
| 35.7.2    | $P$ -Strecke 1. Ordnung ( $P-T_1$ ) . . . . .                                   | 775        |
| 35.7.3    | $P$ -Strecke 2. und höherer Ordnung ( $P-T_n$ ) . . . . .                       | 775        |
| 35.7.4    | $P$ -Strecke mit Totzeit ( $P-T_t$ ) . . . . .                                  | 776        |
| 35.7.5    | Strecke mit Ausgleich $n$ -ter Ordnung und Totzeit<br>( $P-T_n-T_t$ ) . . . . . | 776        |
| 35.7.6    | $I$ -Strecke 0. Ordnung ( $I-T_0$ ) . . . . .                                   | 777        |
| 35.7.7    | $I$ -Strecke 1. Ordnung ( $I-T_1$ ) . . . . .                                   | 777        |
| 35.7.8    | $I$ -Strecke $n$ -ter Ordnung und Totzeit ( $I-T_n-T_t$ ) . . . . .             | 778        |
|           | Literatur . . . . .   | 778        |
| <b>36</b> | <b>Regelung</b> . . . . .   | <b>779</b> |
|           | Rainer Scheuring, Michael Bongards und Helmut Reinhardt                         |            |
| 36.1      | Struktur und Größen des Regelkreises . . . . .                                  | 779        |
| 36.1.1    | Funktionsblöcke des Regelkreises . . . . .                                      | 779        |
| 36.1.2    | Größen des Regelkreises . . . . .   | 779        |
| 36.1.3    | Stell- und Störverhalten der Strecke . . . . .                                  | 780        |
| 36.2      | $PID$ -Regler . . . . .   | 781        |
| 36.2.1    | $P$ -Anteil, $P$ -Regler . . . . .  | 781        |
| 36.2.2    | $I$ -Anteil, $I$ -Regler . . . . .  | 782        |
| 36.2.3    | $PI$ -Regler . . . . .  | 782        |
| 36.2.4    | $PD$ -Regler . . . . .  | 782        |
| 36.2.5    | $PID$ -Regler . . . . .   | 782        |
| 36.3      | Linearer Regelkreis . . . . .   | 783        |
| 36.3.1    | Führungs-, Störungs- und Rauschverhalten des<br>Regelkreises . . . . .          | 783        |
| 36.3.2    | Stabilität des Regelkreises . . . . .   | 785        |
| 36.3.3    | Regelgüte . . . . .   | 786        |
| 36.3.4    | Einstellregeln für Regelkreise . . . . .  | 787        |
| 36.3.5    | Signalskalierung . . . . .  | 788        |
| 36.4      | Spezielle Formen der Regelung . . . . .   | 789        |
| 36.4.1    | Regelung mit Störgrößenaufschaltung . . . . .                                   | 789        |
| 36.4.2    | Kaskadenregelung . . . . .  | 790        |
| 36.4.3    | Zweipunkt-Regelung . . . . .  | 790        |
| 36.4.4    | Fuzzy-Regelung . . . . .  | 792        |
|           | Literatur . . . . .   | 793        |
| <b>37</b> | <b>Mechatronische und regelungstechnische Systeme</b> . . . . .                 | <b>795</b> |
|           | Dietmar Göhlich, Heinz Lehr und Jan Hummel                                      |            |
| 37.1      | Einführung . . . . .  | 795        |
| 37.2      | Modellbildung und Entwurf . . . . .   | 795        |

|        |   |            |
|--------|---|------------|
| 37.3   | Komponenten . . . . .                                   | 796        |
| 37.3.1 | Sensoren . . . . .                                      | 796        |
| 37.3.2 | Aktoren . . . . .                                       | 797        |
| 37.3.3 | Prozessdatenverarbeitung und Bussysteme . . . . .       | 799        |
| 37.4   | Beispiele mechatronischer Systeme . . . . .             | 801        |
|        | Literatur . . . . .                                     | 804        |
|        | <b>Literatur zu Teil VII Regelungstechnik . . . . .</b> | <b>805</b> |

## Teil VIII Fertigungsverfahren

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>38</b> | <b>Übersicht über die Fertigungsverfahren . . . . .</b>            | <b>809</b> |
|           | Berend Denkena   |            |
| 38.1      | Definition und Kriterien . . . . .                                 | 809        |
| 38.2      | Systematik . . . . .   | 810        |
|           | Literatur . . . . .  | 810        |
| <b>39</b> | <b>Urformen . . . . .</b>  | <b>813</b> |
|           | Rüdiger Bähr   |            |
| 39.1      | Einordnung des Urformens in die Fertigungsverfahren . . . . .      | 813        |
| 39.2      | Begriffsbestimmung . . . . .                                       | 813        |
| 39.3      | Das Urformen im Prozess der Herstellung von Einzelteilen . . . . . | 813        |
| 39.4      | Wirtschaftliche Bedeutung des Formgießens . . . . .                | 815        |
| 39.5      | Technologischer Prozess des Formgießens . . . . .                  | 816        |
| 39.6      | Formverfahren und -ausrüstungen . . . . .                          | 817        |
| 39.6.1    | Urformwerkzeuge . . . . .  | 818        |
| 39.6.2    | Verfahren mit verlorenen Formen . . . . .                          | 818        |
| 39.6.3    | Dauerformverfahren . . . . .                                       | 834        |
| 39.7      | Kerne . . . . .  | 844        |
| 39.7.1    | Verfahrensüberblick . . . . .                                      | 844        |
| 39.7.2    | Aushärtung verlorener Kerne . . . . .                              | 847        |
|           | Literatur . . . . .  | 848        |
| <b>40</b> | <b>Umformen . . . . .</b>  | <b>851</b> |
|           | Mathias Liewald und Stefan Wagner                                  |            |
| 40.1      | Systematik der Umformverfahren . . . . .                           | 851        |
| 40.2      | Grundlagen der Umformtechnik . . . . .                             | 852        |
| 40.2.1    | Fließspannung . . . . .  | 852        |
| 40.2.2    | Formänderung . . . . .   | 852        |
| 40.2.3    | Fließkriterien . . . . .   | 853        |
| 40.2.4    | Fließgesetz . . . . .  | 854        |
| 40.2.5    | Fließkurve . . . . .   | 854        |
| 40.2.6    | Verfestigungsverhalten . . . . .                                   | 855        |
| 40.2.7    | Umformvermögen . . . . .   | 855        |
| 40.3      | Verfahren der Druckumformung . . . . .                             | 856        |
| 40.3.1    | Kaltfließpressen . . . . .   | 856        |
| 40.3.2    | Warm Schmieden . . . . .   | 856        |

|           |                |   |            |
|-----------|----------------|---|------------|
|           | 40.3.3         | Strangpressen . . . . .   | 859        |
|           | 40.3.4         | Walzen . . . . .  | 860        |
|           | 40.4           | Verfahren der Zug-Druckumformung . . . . .                                | 862        |
|           | 40.4.1         | Gleitziehen . . . . .   | 862        |
|           | 40.4.2         | Tiefziehen . . . . .  | 863        |
|           | 40.4.3         | Ziehen von unsymmetrischen Blechformteilen . . . . .                      | 866        |
|           | 40.4.4         | Tiefziehen im Weiterzug . . . . .   | 867        |
|           | 40.4.5         | Stülpziehen . . . . .   | 867        |
|           | 40.4.6         | Abstreckgleitziehen . . . . .   | 868        |
|           | 40.5           | Verfahren der Zugumformung . . . . .                                      | 868        |
|           | 40.5.1         | Streckziehen . . . . .  | 868        |
|           | 40.6           | Verfahren der Biegeumformung . . . . .                                    | 869        |
|           | 40.6.1         | Biegeverfahren . . . . .  | 869        |
|           | 40.6.2         | Rückfederung . . . . .  | 869        |
|           | 40.6.3         | Biegen mit geradliniger Werkzeugbewegung . . . . .                        | 871        |
|           | 40.6.4         | Biegen mit drehender Werkzeugbewegung . . . . .                           | 872        |
|           | 40.7           | Wirkmedienbasierte Umformverfahren . . . . .                              | 873        |
|           | 40.7.1         | Hydromechanisches Tiefziehen . . . . .                                    | 873        |
|           | 40.7.2         | Superplastisches Umformen . . . . .                                       | 874        |
|           | 40.7.3         | Innenhochdruck-Umformung (IHU) . . . . .                                  | 875        |
|           | 40.8           | Warmumformung (Presshärten) . . . . .                                     | 876        |
|           |                | Literatur . . . . .   | 876        |
| <b>41</b> | <b>Trennen</b> | . . . . .   | <b>879</b> |
|           |                | Stefan Wagner, Berend Denkena und Mathias Liewald                         |            |
|           | 41.1           | Allgemeines . . . . .   | 879        |
|           | 41.2           | Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden . . . . .                     | 879        |
|           | 41.2.1         | Grundlagen . . . . .  | 879        |
|           | 41.2.2         | Drehen . . . . .  | 882        |
|           | 41.2.3         | Bohren . . . . .  | 887        |
|           | 41.2.4         | Fräsen . . . . .  | 890        |
|           | 41.2.5         | Sonstige Verfahren: Hobeln und Stoßen, Räumen,<br>Sägen . . . . .         | 895        |
|           | 41.2.6         | Schneidstoffe . . . . .   | 897        |
|           | 41.3           | Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide . . . . .                    | 899        |
|           | 41.3.1         | Grundlagen . . . . .  | 899        |
|           | 41.3.2         | Schleifen mit rotierendem Werkzeug . . . . .                              | 902        |
|           | 41.3.3         | Honen . . . . .   | 904        |
|           | 41.3.4         | Sonstige Verfahren: Läppen, Innendurchmesser-<br>Trennschleifen . . . . . | 906        |
|           | 41.4           | Abtragen . . . . .  | 907        |
|           | 41.4.1         | Gliederung . . . . .  | 907        |
|           | 41.4.2         | Thermisches Abtragen mit Funken<br>(Funkenerosives Abtragen) . . . . .    | 908        |
|           | 41.4.3         | Lasertrennen . . . . .  | 910        |
|           | 41.4.4         | Elektrochemisches Abtragen . . . . .                                      | 912        |
|           | 41.4.5         | Chemisches Abtragen . . . . .   | 912        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 41.5      | Scheren und Schneiden . . . . .  | 913        |
| 41.5.1    | Systematik der Schneidverfahren . . . . .  | 913        |
| 41.5.2    | Technologie des Scherschneidens . . . . .  | 914        |
| 41.5.3    | Kräfte beim Schneiden . . . . .  | 916        |
| 41.5.4    | Werkstückeigenschaften . . . . .   | 918        |
| 41.5.5    | Materialausnutzungsgrad . . . . .  | 919        |
| 41.5.6    | Schneidwerkzeuge . . . . .   | 919        |
| 41.5.7    | Sonderschneidverfahren . . . . .   | 921        |
|           | Anhang . . . . .   | 924        |
|           | Literatur . . . . .  | 926        |
| <b>42</b> | <b>Sonderverfahren</b> . . . . .   | <b>929</b> |
|           | Andreas Dietzel, Nico Troß, Jens Brimmers, Eckart Uhlmann,<br>Christian Brecher, Stephanus Büttgenbach, Berend Denkena und<br>Manfred Weck |            |
| 42.1      | Gewindefertigung . . . . .   | 929        |
| 42.1.1    | Einleitung . . . . .   | 929        |
| 42.1.2    | Gewindefertigung mit geometrisch bestimmter<br>Schneide . . . . .  | 930        |
| 42.1.3    | Gewindefertigung mit geometrisch unbestimmter<br>Schneide . . . . .  | 934        |
| 42.1.4    | Gewindefertigung mit abtragenden und<br>umformenden Verfahren . . . . .  | 935        |
| 42.1.5    | Entwicklungstrends . . . . .   | 937        |
| 42.2      | Verzahnen . . . . .  | 938        |
| 42.2.1    | Verzahnen von Stirnrädern . . . . .  | 938        |
| 42.2.2    | Verzahnen von Schnecken . . . . .  | 949        |
| 42.2.3    | Verzahnen von Schneckenrädern . . . . .  | 951        |
| 42.2.4    | Verzahnen von Kegelrädern . . . . .  | 952        |
| 42.3      | Fertigungsverfahren der Mikrotechnik . . . . .   | 955        |
| 42.3.1    | Einführung . . . . .   | 955        |
| 42.3.2    | Maskengebundene Fertigungsverfahren . . . . .  | 956        |
| 42.3.3    | Direkte Strukturierungsmethoden . . . . .  | 962        |
| 42.4      | Beschichten . . . . .  | 971        |
| 42.5      | Additive Fertigungsverfahren . . . . .   | 973        |
| 42.5.1    | Einleitung . . . . .   | 973        |
| 42.5.2    | Folienbasierte Verfahren . . . . .   | 975        |
| 42.5.3    | Drahtbasierte Verfahren . . . . .  | 977        |
| 42.5.4    | Pulverbasierte Verfahren . . . . .   | 977        |
| 42.5.5    | Flüssigkeitsbasierte Verfahren . . . . .   | 980        |
|           | Literatur . . . . .  | 982        |
| <b>43</b> | <b>Montage und Demontage</b> . . . . .   | <b>987</b> |
|           | Günther Seliger  |            |
| 43.1      | Begriffe . . . . .   | 987        |
| 43.2      | Aufgaben der Montage und Demontage . . . . .   | 989        |
| 43.2.1    | Montage . . . . .  | 989        |
| 43.2.2    | Demontage . . . . .  | 990        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 43.3      | Durchführung der Montage und Demontage               | 990        |
| 43.3.1    | Montageprozess                                       | 990        |
| 43.3.2    | Demontageprozess                                     | 991        |
| 43.3.3    | Montageplanung                                       | 992        |
| 43.3.4    | Organisationsformen der Montage                      | 992        |
| 43.3.5    | Montagesysteme                                       | 992        |
| 43.3.6    | Automatisierte Montage                               | 993        |
|           | Literatur  | 995        |
| <b>44</b> | <b>Fertigungs- und Fabrikbetrieb</b>                 | <b>997</b> |
|           | Engelbert Westkämper und Alexander Schloske          |            |
| 44.1      | Einleitung   | 997        |
| 44.2      | Das industrielle System der Produktion               | 997        |
| 44.3      | Management des Systems Produktion                    | 1000       |
| 44.3.1    | Operative Ziele der Planung und des Fabrikbetriebes  | 1002       |
| 44.3.2    | Gestaltungsprinzipien der Produktion                 | 1002       |
| 44.4      | Planung und Steuerung der Produktion                 | 1003       |
| 44.4.1    | Planung der Produktion Industrial Engineering        | 1003       |
| 44.4.2    | Traditionelle Arbeitsplanung                         | 1005       |
| 44.4.3    | Arbeitsteuerung bzw. Auftragsmanagement              | 1010       |
| 44.5      | Fertigung und Montage                                | 1012       |
| 44.5.1    | Teilefertigung                                       | 1012       |
| 44.5.2    | Einteilung von Fertigungssystemen                    | 1014       |
| 44.5.3    | Montage  | 1015       |
| 44.5.4    | Automatisierung von Handhabung und Montage           | 1017       |
| 44.6      | Digitale Produktion                                  | 1018       |
| 44.6.1    | Architektur der Informationssysteme                  | 1019       |
| 44.6.2    | CAX-Systeme  | 1020       |
| 44.6.3    | Auftragsmanagementsysteme                            | 1021       |
| 44.6.4    | Leitstände und Manufacturing Execution Systeme (MES) | 1022       |
| 44.7      | Qualitätsmanagement                                  | 1023       |
| 44.7.1    | Aufgaben des Qualitätsmanagements                    | 1024       |
| 44.7.2    | Qualitätsmanagementsysteme (QM-Systeme)              | 1024       |
| 44.7.3    | Werkzeuge des Qualitätsmanagements                   | 1026       |
| 44.7.4    | Methoden des Qualitätsmanagements                    | 1028       |
| 44.7.5    | Prüfverfahren  | 1032       |
| 44.8      | Kostenmanagement und Wirtschaftlichkeitsrechnung     | 1033       |
| 44.8.1    | Betriebliches Rechnungswesen und Kostenrechnung      | 1033       |
| 44.8.2    | Kostenartenrechnung                                  | 1034       |
| 44.8.3    | Kostenstellenrechnung                                | 1035       |
| 44.8.4    | Kostenträgerrechnung                                 | 1036       |
| 44.8.5    | Herstellkosten                                       | 1037       |
| 44.8.6    | Vollkostenrechnung und Teilkostenrechnung            | 1039       |
| 44.8.7    | Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung        | 1039       |

|   |      |
|---|------|
| 44.9 Zusammenfassung und Ausblick . . . . . | 1042 |
| Literatur . . . . .                         | 1042 |

## Teil IX Fertigungsmittel

|  |             |
|--|-------------|
| <b>45 Elemente der Werkzeugmaschinen . . . . .</b>   | <b>1049</b> |
| Christian Brecher, Manfred Weck, Marcel Fey und Stephan<br>Neus                              |             |
| 45.1 Grundlagen . . . . .  | 1049        |
| 45.1.1 Funktionsgliederung . . . . .   | 1049        |
| 45.1.2 Mechanisches Verhalten . . . . .  | 1051        |
| 45.2 Antriebe . . . . .  | 1054        |
| 45.2.1 Motoren . . . . .   | 1054        |
| 45.2.2 Getriebe . . . . .  | 1064        |
| 45.2.3 Mechanische Vorschubübertragungselemente . . . . .                                    | 1070        |
| 45.3 Gestelle . . . . .  | 1078        |
| 45.3.1 Anforderungen und Bauformen . . . . .   | 1078        |
| 45.3.2 Werkstoffe für Gestellbauteile . . . . .  | 1081        |
| 45.3.3 Gestaltung der Gestellbauteile . . . . .  | 1082        |
| 45.3.4 Berechnung und Optimierung . . . . .  | 1084        |
| 45.4 Führungen . . . . .   | 1086        |
| 45.4.1 Linearführungen . . . . .   | 1087        |
| 45.4.2 Drehführungen . . . . .   | 1093        |
| Literatur . . . . .  | 1096        |
| <b>46 Steuerungen . . . . .</b>  | <b>1099</b> |
| Alexander Verl und Günter Pritschow  |             |
| 46.1 Steuerungstechnische Grundlagen . . . . .   | 1099        |
| 46.1.1 Zum Begriff Steuerung . . . . .   | 1099        |
| 46.1.2 Informationsdarstellung . . . . .   | 1099        |
| 46.1.3 Programmsteuerung und Funktionssteuerung . . . . .                                    | 1099        |
| 46.1.4 Signaleingabe und -ausgabe . . . . .  | 1100        |
| 46.1.5 Signalbildung . . . . .   | 1100        |
| 46.1.6 Signalverarbeitung . . . . .  | 1100        |
| 46.1.7 Steuerungsprogramme . . . . .   | 1103        |
| 46.1.8 Aufbauorganisation von Steuerungen . . . . .  | 1103        |
| 46.1.9 Aufbau von Steuerungssystemen . . . . .   | 1104        |
| 46.1.10 Dezentralisierung durch den Einsatz industrieller<br>Kommunikationssysteme . . . . . | 1105        |
| 46.1.11 Feldbusse . . . . .  | 1106        |
| 46.1.12 Offene Steuerungssysteme . . . . .   | 1107        |
| 46.2 Steuerungsmittel . . . . .  | 1109        |
| 46.2.1 Mechanische Speicher und Steuerungen . . . . .  | 1109        |
| 46.2.2 Fluidische Steuerungen . . . . .  | 1110        |
| 46.2.3 Elektrische Steuerungen . . . . .   | 1110        |

|           |  |             |
|-----------|--|-------------|
| 46.3      | Speicherprogrammierbare Steuerungen        | 1111        |
| 46.3.1    | Aufbau                                     | 1112        |
| 46.3.2    | Arbeitsweise                               | 1112        |
| 46.3.3    | Programmierung                             | 1113        |
| 46.4      | Numerische Steuerungen                     | 1114        |
| 46.4.1    | Zum Begriff                                | 1114        |
| 46.4.2    | Bewegungssteuerungen                       | 1115        |
| 46.4.3    | NC-Programmierung                          | 1115        |
| 46.4.4    | Datenschnittstellen                        | 1115        |
| 46.4.5    | Steuerdatenverarbeitung                    | 1117        |
| 46.4.6    | Numerische Grundfunktionen                 | 1118        |
| 46.4.7    | Lageeinstellung                            | 1120        |
|           | Literatur                                  | 1123        |
| <b>47</b> | <b>Maschinen zum Scheren und Schneiden</b> | <b>1125</b> |
|           | Mathias Liewald und Stefan Wagner          |             |
| 47.1      | Kraft- und Arbeitsbedarf                   | 1125        |
| 47.2      | Maschinen zum Scheren                      | 1125        |
| 47.3      | Längs- und Querteilanlagen                 | 1126        |
| 47.4      | Platinenschneidanlagen                     | 1127        |
| 47.5      | Feinschneidpressen                         | 1128        |
| 47.6      | Stanz- und Nibbelmaschinen                 | 1128        |
|           | Literatur                                  | 1130        |
| <b>48</b> | <b>Werkzeugmaschinen zum Umformen</b>      | <b>1131</b> |
|           | Mathias Liewald und Stefan Wagner          |             |
| 48.1      | Aufbau von Pressen                         | 1131        |
| 48.1.1    | Pressengestell                             | 1131        |
| 48.1.2    | Pressenstößel                              | 1132        |
| 48.1.3    | Stößelantrieb                              | 1132        |
| 48.1.4    | Funktionsweise von Tiefziehpressen         | 1133        |
| 48.1.5    | Zieheinrichtungen                          | 1134        |
| 48.2      | Pressenkenngößen                           | 1134        |
| 48.2.1    | Leistungskenngrößen                        | 1134        |
| 48.2.2    | Genauigkeitskenngrößen                     | 1135        |
| 48.2.3    | Geometrische Pressenkenngößen              | 1136        |
| 48.2.4    | Umweltkenngrößen                           | 1136        |
| 48.2.5    | Richtlinien, Normen                        | 1136        |
| 48.3      | Weggebundene Pressen                       | 1136        |
| 48.3.1    | Arbeitsprinzip                             | 1136        |
| 48.3.2    | Bauarten                                   | 1136        |
| 48.3.3    | Servopressen                               | 1138        |
| 48.3.4    | Anwendungen                                | 1139        |
| 48.4      | Kraftgebundene Pressen                     | 1140        |
| 48.4.1    | Wirkprinzip                                | 1140        |
| 48.4.2    | Antrieb                                    | 1140        |
| 48.4.3    | Pressengestell                             | 1141        |
| 48.4.4    | Anwendungen                                | 1141        |

|           |  |             |
|-----------|--|-------------|
| 48.5      | Arbeitsgebundene Pressen                                       | 1142        |
| 48.5.1    | Hämmer   | 1142        |
| 48.5.2    | Spindelpressen   | 1143        |
|           | Literatur  | 1144        |
| <b>49</b> | <b>Spanende Werkzeugmaschinen</b>                              | <b>1147</b> |
|           | Eckart Uhlmann   |             |
| 49.1      | Drehmaschinen  | 1147        |
| 49.1.1    | Einleitung   | 1147        |
| 49.1.2    | Universaldrehmaschinen   | 1149        |
| 49.1.3    | Frontdrehmaschinen   | 1151        |
| 49.1.4    | Drehautomaten  | 1151        |
| 49.1.5    | Vertikaldrehmaschinen  | 1154        |
| 49.1.6    | Drehbearbeitungszentren  | 1155        |
| 49.1.7    | Sonderdrehmaschinen  | 1155        |
| 49.1.8    | Entwicklungstrends   | 1157        |
| 49.2      | Bohrmaschinen  | 1157        |
| 49.2.1    | Einleitung   | 1157        |
| 49.2.2    | Tischbohrmaschinen   | 1158        |
| 49.2.3    | Säulenbohrmaschinen  | 1158        |
| 49.2.4    | Ständerbohrmaschinen   | 1159        |
| 49.2.5    | Schwenkbohrmaschinen   | 1159        |
| 49.2.6    | Bohrwerke  | 1159        |
| 49.2.7    | Tiefbohrmaschinen  | 1160        |
| 49.2.8    | Weitere Typen  | 1160        |
| 49.2.9    | Entwicklungstrends   | 1161        |
| 49.3      | Fräsmaschinen  | 1163        |
| 49.3.1    | Einleitung   | 1163        |
| 49.3.2    | Konsolfräsmaschinen  | 1163        |
| 49.3.3    | Bettfräsmaschinen  | 1164        |
| 49.3.4    | Portalfräsmaschinen  | 1165        |
| 49.3.5    | Universal-Werkzeugfräsmaschinen                                | 1166        |
| 49.3.6    | Waagrecht-Bohr-Fräsmaschine                                    | 1166        |
| 49.3.7    | Hochgeschwindigkeitsfräsmaschinen                              | 1167        |
| 49.3.8    | Hochleistungsfräsmaschinen                                     | 1167        |
| 49.3.9    | Fräsmaschinen mit Parallelkinematik                            | 1168        |
| 49.3.10   | Sonderfräsmaschinen  | 1168        |
| 49.3.11   | Entwicklungstrends   | 1169        |
| 49.4      | Bearbeitungszentren  | 1170        |
| 49.4.1    | Einleitung   | 1170        |
| 49.4.2    | Bauformen  | 1171        |
| 49.4.3    | Werkzeugsysteme  | 1171        |
| 49.4.4    | Werkstückwechselsysteme  | 1172        |
| 49.4.5    | Integration von Fertigungsverfahren zur<br>Komplettbearbeitung | 1173        |
| 49.4.6    | Entwicklungstrends   | 1173        |

|         |   |      |
|---------|---|------|
| 49.5    | Hobel- und Stoßmaschinen . . . . .                              | 1173 |
| 49.5.1  | Einleitung . . . . .  | 1173 |
| 49.5.2  | Hobelmaschinen . . . . .  | 1174 |
| 49.5.3  | Stoßmaschinen . . . . .   | 1174 |
| 49.5.4  | Nutenstoß- und Nutzenziehmaschinen . . . . .                    | 1175 |
| 49.5.5  | Entwicklungstrends . . . . .                                    | 1175 |
| 49.6    | Räummaschinen . . . . .   | 1176 |
| 49.6.1  | Einleitung . . . . .  | 1176 |
| 49.6.2  | Innen- und Außenräummaschinen . . . . .                         | 1176 |
| 49.6.3  | Senkrecht-, Waagrecht- und Hubtisch-<br>Räummaschinen . . . . . | 1176 |
| 49.6.4  | Entwicklungstrends . . . . .                                    | 1178 |
| 49.7    | Säge- und Feilmaschinen . . . . .                               | 1178 |
| 49.7.1  | Einleitung . . . . .  | 1178 |
| 49.7.2  | Bügel-/Hubsäge- und Hubfeilmaschinen . . . . .                  | 1178 |
| 49.7.3  | Bandsäge- und Bandfeilmaschinen . . . . .                       | 1179 |
| 49.7.4  | Kreissägemaschinen . . . . .                                    | 1179 |
| 49.7.5  | Entwicklungstrends . . . . .                                    | 1180 |
| 49.8    | Schleifmaschinen . . . . .                                      | 1180 |
| 49.8.1  | Einleitung . . . . .  | 1180 |
| 49.8.2  | Planschleifmaschinen . . . . .                                  | 1180 |
| 49.8.3  | Pro Ischleifmaschinen . . . . .                                 | 1181 |
| 49.8.4  | Rundschleifmaschinen . . . . .                                  | 1182 |
| 49.8.5  | Unrund- und Exzenter schleifmaschinen . . . . .                 | 1183 |
| 49.8.6  | Koordinatenschleifmaschinen . . . . .                           | 1183 |
| 49.8.7  | Verzahnungsschleifmaschinen . . . . .                           | 1183 |
| 49.8.8  | Schraubenschleif-/Gewindeschleifmaschinen . . . . .             | 1184 |
| 49.8.9  | Kugelschleifmaschinen . . . . .                                 | 1184 |
| 49.8.10 | Werkzeugschleifmaschinen . . . . .                              | 1184 |
| 49.8.11 | Schleifzentren . . . . .  | 1185 |
| 49.8.12 | Sonderschleifmaschinen . . . . .                                | 1185 |
| 49.8.13 | Bandschleifmaschinen . . . . .                                  | 1185 |
| 49.8.14 | Entwicklungstrends . . . . .                                    | 1186 |
| 49.9    | Honmaschinen . . . . .  | 1187 |
| 49.9.1  | Einleitung . . . . .  | 1187 |
| 49.9.2  | Langhubhonmaschinen . . . . .                                   | 1187 |
| 49.9.3  | Kurzhubhonmaschinen . . . . .                                   | 1188 |
| 49.9.4  | Sonderhonmaschinen . . . . .                                    | 1190 |
| 49.9.5  | Entwicklungstrends . . . . .                                    | 1191 |
| 49.10   | Läppmaschinen . . . . .   | 1191 |
| 49.10.1 | Einleitung . . . . .  | 1191 |
| 49.10.2 | Einscheiben-Läppmaschinen . . . . .                             | 1192 |
| 49.10.3 | Zweischeiben-Läppmaschinen . . . . .                            | 1192 |
| 49.10.4 | Rundläppmaschinen . . . . .                                     | 1193 |
| 49.10.5 | Entwicklungstrends . . . . .                                    | 1193 |
| 49.11   | Mehrmaschinensysteme . . . . .                                  | 1193 |
| 49.11.1 | Einleitung . . . . .  | 1193 |
| 49.11.2 | Flexible Fertigungszellen . . . . .                             | 1194 |

|           |  |             |
|-----------|--|-------------|
|           | 49.11.3 Flexible Fertigungssysteme . . . . .                     | 1194        |
|           | 49.11.4 Transferstraßen . . . . .                                | 1195        |
|           | 49.11.5 Entwicklungstrends . . . . .                             | 1195        |
|           | Literatur . . . . .  | 1196        |
| <b>50</b> | <b>Schweiß- und Lötmaschinen</b> . . . . .                       | <b>1199</b> |
|           | Lutz Dorn und Uwe Füssel   |             |
|           | 50.1 Lichtbogenschweißmaschinen . . . . .                        | 1199        |
|           | 50.1.1 Bauausführungen . . . . .                                 | 1200        |
|           | 50.2 Widerstandsschweißmaschinen . . . . .                       | 1201        |
|           | 50.3 Laserstrahl-Schweiß- und Lötmaschinen . . . . .             | 1202        |
|           | 50.4 Lötmaschinen . . . . .                                      | 1202        |
|           | 50.4.1 Mechanisiertes Hartlöten . . . . .                        | 1202        |
|           | 50.4.2 Ofenlöten mit Weich- und Hartloten . . . . .              | 1203        |
|           | 50.4.3 Weichlöten in der Elektronik . . . . .                    | 1203        |
|           | Literatur . . . . .  | 1203        |
| <b>51</b> | <b>Industrieroboter</b> . . . . .                                | <b>1205</b> |
|           | Eckart Uhlmann und Jörg Krüger                                   |             |
|           | 51.1 Definition, Abgrenzung und Grundlagen . . . . .             | 1205        |
|           | 51.2 Mechatronischer Aufbau . . . . .                            | 1208        |
|           | 51.3 Kinematik und Dynamik . . . . .                             | 1208        |
|           | 51.3.1 Kinematisches Modell . . . . .                            | 1208        |
|           | 51.3.2 Dynamisches Modell . . . . .                              | 1209        |
|           | 51.4 Leistungskenngrößen und Kalibrierung . . . . .              | 1210        |
|           | 51.4.1 Leistungskenngrößen . . . . .                             | 1210        |
|           | 51.4.2 Kalibrierung . . . . .                                    | 1210        |
|           | 51.5 Steuerung und Regelung . . . . .                            | 1211        |
|           | 51.5.1 Aufbau der Robotersteuerung . . . . .                     | 1211        |
|           | 51.5.2 Regelungsverfahren . . . . .                              | 1211        |
|           | 51.5.3 Betriebsarten . . . . .                                   | 1213        |
|           | 51.6 Programmierung . . . . .                                    | 1214        |
|           | 51.6.1 Online-Verfahren . . . . .                                | 1214        |
|           | 51.6.2 Offline-Verfahren . . . . .                               | 1215        |
|           | 51.6.3 Weitere Programmierverfahren . . . . .                    | 1215        |
|           | 51.7 Integration und Anwendungen industrieller Roboter . . . . . | 1216        |
|           | Literatur . . . . .  | 1217        |
| <b>52</b> | <b>Werkzeugmaschinen für die Mikroproduktion</b> . . . . .       | <b>1219</b> |
|           | Eckart Uhlmann   |             |
|           | 52.1 Einleitung . . . . .  | 1219        |
|           | 52.2 Hochpräzisionsmaschinen . . . . .                           | 1219        |
|           | 52.2.1 Allgemeines . . . . .                                     | 1219        |
|           | 52.2.2 Anwendung . . . . .                                       | 1219        |
|           | 52.2.3 Ausrüstung . . . . .                                      | 1220        |
|           | 52.2.4 Entwicklungstrends . . . . .                              | 1222        |

---

|        |                             |      |
|--------|-----------------------------|------|
| 52.3   | Ultrapräzisionsmaschinen    | 1222 |
| 52.3.1 | Allgemeines                 | 1222 |
| 52.3.2 | Anwendung                   | 1222 |
| 52.3.3 | Ausrüstung                  | 1223 |
| 52.3.4 | Entwicklungstrends          | 1224 |
| 52.4   | Mikrofunkerosionsmaschinen  | 1224 |
| 52.4.1 | Allgemeines                 | 1224 |
| 52.4.2 | Anwendung                   | 1225 |
| 52.4.3 | Ausrüstung                  | 1225 |
| 52.4.4 | Entwicklungstrends          | 1226 |
| 52.5   | Laserbearbeitungsmaschinen  | 1226 |
| 52.5.1 | Allgemeines                 | 1226 |
| 52.5.2 | Anwendung                   | 1226 |
| 52.5.3 | Ausrüstung                  | 1227 |
| 52.5.4 | Entwicklungstrends          | 1227 |
|        | Literatur                   | 1227 |
|        | <b>Fachausdrücke</b>        | 1229 |
|        | <b>Stichwortverzeichnis</b> | 1305 |

---

# Inhaltsverzeichnis Band 1

## Teil I Mathematik

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Mengen, Funktionen und Boolesche Algebra</b> . . . . .      | <b>3</b>  |
|          | Uller Jarecki  |           |
| 1.1      | Mengen . . . . .   | 3         |
| 1.1.1    | Mengenbegriff . . . . .  | 3         |
| 1.1.2    | Mengenrelationen . . . . .                                     | 3         |
| 1.1.3    | Mengenverknüpfungen . . . . .                                  | 4         |
| 1.1.4    | Das kartesische oder Kreuzprodukt . . . . .                    | 4         |
| 1.2      | Funktionen . . . . .   | 5         |
| 1.3      | Boolesche Algebra . . . . .                                    | 6         |
| 1.3.1    | Grundbegriffe . . . . .  | 6         |
| 1.3.2    | Zweielementige Boolesche Algebra . . . . .                     | 6         |
|          | Allgemeine Literatur . . . . .                                 | 9         |
| <b>2</b> | <b>Zahlen</b> . . . . .  | <b>13</b> |
|          | Uller Jarecki  |           |
| 2.1      | Reelle Zahlen . . . . .  | 13        |
| 2.1.1    | Einführung . . . . .   | 13        |
| 2.1.2    | Grundgesetze der reellen Zahlen . . . . .                      | 13        |
| 2.1.3    | Der absolute Betrag . . . . .                                  | 15        |
| 2.1.4    | Mittelwerte und Ungleichungen . . . . .                        | 15        |
| 2.1.5    | Potenzen, Wurzeln und Logarithmen . . . . .                    | 15        |
| 2.1.6    | Zahlendarstellung in Stellenwertsystemen . . . . .             | 16        |
| 2.1.7    | Endliche Folgen und Reihen. Binomischer<br>Lehrsatz . . . . .  | 16        |
| 2.1.8    | Unendliche reelle Zahlenfolgen und Zahlenreihen                | 18        |
| 2.2      | Komplexe Zahlen . . . . .                                      | 20        |
| 2.2.1    | Komplexe Zahlen und ihre geometrische<br>Darstellung . . . . . | 20        |
| 2.2.2    | Addition und Multiplikation . . . . .                          | 20        |
| 2.2.3    | Darstellung in Polarkoordinaten. Absoluter<br>Betrag . . . . . | 21        |
| 2.2.4    | Potenzen und Wurzeln . . . . .                                 | 21        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.3      | Gleichungen . . . . .  | 22        |
| 2.3.1    | Algebraische Gleichungen . . . . .                                 | 22        |
| 2.3.2    | Polynome . . . . .   | 23        |
| 2.3.3    | Transzendente Gleichungen . . . . .                                | 25        |
|          | Allgemeine Literatur . . . . .                                     | 25        |
| <b>3</b> | <b>Lineare Algebra</b> . . . . .                                   | <b>27</b> |
|          | Uller Jarecki  |           |
| 3.1      | Vektoralgebra . . . . .  | 27        |
| 3.1.1    | Vektoren und ihre Eigenschaften . . . . .                          | 27        |
| 3.1.2    | Lineare Abhängigkeit und Basis . . . . .                           | 28        |
| 3.1.3    | Koordinatendarstellung von Vektoren . . . . .                      | 29        |
| 3.1.4    | Inneres oder skalares Produkt . . . . .                            | 30        |
| 3.1.5    | äußeres oder vektorielles Produkt . . . . .                        | 31        |
| 3.1.6    | Spatprodukt . . . . .  | 31        |
| 3.1.7    | Entwicklungssatz und mehrfache Produkte . . . . .                  | 32        |
| 3.2      | Der reelle $n$ -dimensionale Vektorraum $\mathbb{R}^n$ . . . . .   | 32        |
| 3.2.1    | Der reelle Euklidische Raum . . . . .                              | 33        |
| 3.2.2    | Determinanten . . . . .  | 34        |
| 3.2.3    | Cramer-Regel . . . . .   | 36        |
| 3.2.4    | Matrizen und lineare Abbildungen . . . . .                         | 37        |
| 3.2.5    | Lineare Gleichungssysteme . . . . .                                | 41        |
| 3.3      | Ergänzungen zur Höheren Mathematik . . . . .                       | 42        |
|          | Allgemeine Literatur . . . . .                                     | 43        |
| <b>4</b> | <b>Geometrie</b> . . . . .   | <b>45</b> |
|          | Hans-Joachim Schulz  |           |
| 4.1      | Bemerkungen zur elementaren Geometrie . . . . .                    | 45        |
| 4.2      | Ebene Geometrie (Planimetrie) . . . . .                            | 45        |
| 4.2.1    | Punkt, Gerade, Strahl, Strecke, Streckenzug . . . . .              | 45        |
| 4.2.2    | Orientierung einer Ebene . . . . .                                 | 46        |
| 4.2.3    | Winkel . . . . .   | 46        |
| 4.2.4    | Strahlensätze . . . . .  | 46        |
| 4.2.5    | Ähnlichkeit . . . . .  | 47        |
| 4.2.6    | Teilung von Strecken . . . . .                                     | 48        |
| 4.2.7    | Pythagoreische Sätze . . . . .                                     | 48        |
| 4.3      | Trigonometrie . . . . .  | 49        |
| 4.3.1    | Goniometrie . . . . .  | 49        |
| 4.3.2    | Berechnung von Dreiecken und Flächen . . . . .                     | 56        |
| 4.4      | Räumliche Geometrie (Stereometrie) . . . . .                       | 57        |
| 4.4.1    | Punkt, Gerade und Ebene im Raum . . . . .                          | 57        |
| 4.4.2    | Körper, Volumenmessung . . . . .                                   | 59        |
| 4.4.3    | Polyeder . . . . .   | 59        |
| 4.4.4    | Oberfläche und Volumen von Polyedern . . . . .                     | 60        |
| 4.4.5    | Oberfläche und Volumen von einfachen<br>Rotationskörpern . . . . . | 60        |
| 4.4.6    | Guldinsche Regeln . . . . .  | 60        |
|          | Allgemeine Literatur . . . . .                                     | 63        |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>5</b> | <b>Analytische Geometrie</b> . . . . .  | 65  |
|          | Uller Jarecki   |     |
| 5.1      | Analytische Geometrie der Ebene . . . . .   | 65  |
| 5.1.1    | Das kartesische Koordinatensystem . . . . .   | 65  |
| 5.1.2    | Strecke . . . . .   | 65  |
| 5.1.3    | Dreieck . . . . .   | 66  |
| 5.1.4    | Winkel . . . . .  | 66  |
| 5.1.5    | Gerade . . . . .  | 67  |
| 5.1.6    | Koordinatentransformationen . . . . .   | 68  |
| 5.1.7    | Kegelschnitte . . . . .   | 69  |
| 5.1.8    | Allgemeine Kegelschnittgleichung . . . . .  | 73  |
| 5.2      | Analytische Geometrie des Raumes . . . . .  | 75  |
| 5.2.1    | Das kartesische Koordinatensystem . . . . .   | 75  |
| 5.2.2    | Strecke . . . . .   | 75  |
| 5.2.3    | Dreieck und Tetraeder . . . . .   | 76  |
| 5.2.4    | Gerade . . . . .  | 76  |
| 5.2.5    | Ebene . . . . .   | 78  |
| 5.2.6    | Koordinatentransformationen . . . . .   | 79  |
|          | Allgemeine Literatur . . . . .  | 80  |
| <b>6</b> | <b>Differential- und Integralrechnung</b> . . . . .   | 81  |
|          | Uller Jarecki   |     |
| 6.1      | Reellwertige Funktionen einer reellen Variablen . . . . .   | 81  |
| 6.1.1    | Grundbegriffe . . . . .   | 81  |
| 6.1.2    | Grundfunktionen . . . . .   | 82  |
| 6.1.3    | Einteilung der Funktionen . . . . .   | 84  |
| 6.1.4    | Grenzwert und Stetigkeit . . . . .  | 84  |
| 6.1.5    | Ableitung einer Funktion . . . . .  | 86  |
| 6.1.6    | Differentiale . . . . .   | 88  |
| 6.1.7    | Sätze über differenzierbare Funktionen . . . . .  | 88  |
| 6.1.8    | Monotonie, Konvexität und Extrema von<br>differenzierbaren Funktionen . . . . .                   | 90  |
| 6.1.9    | Grenzwertbestimmung durch Differenzieren.<br>Regel von de l Hospital . . . . .                    | 92  |
| 6.1.10   | Das bestimmte Integral . . . . .  | 92  |
| 6.1.11   | Integralfunktion, Stammfunktion und Hauptsatz<br>der Differential- und Integralrechnung . . . . . | 94  |
| 6.1.12   | Das unbestimmte Integral . . . . .  | 94  |
| 6.1.13   | Integrationsmethoden . . . . .  | 95  |
| 6.1.14   | Integration rationaler Funktionen . . . . .   | 96  |
| 6.1.15   | Integration von irrationalen algebraischen und<br>transzendenten Funktionen . . . . .             | 98  |
| 6.1.16   | Uneigentliche Integrale . . . . .   | 98  |
| 6.1.17   | Geometrische Anwendungen der Differential-<br>und Integralrechnung . . . . .                      | 101 |
| 6.1.18   | Unendliche Funktionenreihen . . . . .   | 101 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.2      | Reellwertige Funktionen mehrerer reeller Variablen . . .                              | 106        |
| 6.2.1    | Grundbegriffe . . . . .   | 106        |
| 6.2.2    | Grenzwerte und Stetigkeit . . . . .   | 107        |
| 6.2.3    | Partielle Ableitungen . . . . .   | 108        |
| 6.2.4    | Integraldarstellung von Funktionen und<br>Doppelintegrale . . . . .                   | 113        |
| 6.2.5    | Flächen- und Raumintegrale . . . . .  | 113        |
|          | Allgemeine Literatur . . . . .  | 118        |
| <b>7</b> | <b>Kurven und Flächen, Vektoranalysis . . . . .</b>                                   | <b>119</b> |
|          | Uller Jarecki   |            |
| 7.1      | Kurven in der Ebene . . . . .   | 119        |
| 7.1.1    | Grundbegriffe . . . . .   | 119        |
| 7.1.2    | Tangenten und Normalen . . . . .  | 120        |
| 7.1.3    | Bogenlänge . . . . .  | 122        |
| 7.1.4    | Krümmung . . . . .  | 123        |
| 7.1.5    | Einhüllende einer Kurvenschar . . . . .   | 124        |
| 7.1.6    | Spezielle ebene Kurven . . . . .  | 124        |
| 7.1.7    | Kurvenintegrale . . . . .   | 128        |
| 7.2      | Kurven im Raum . . . . .  | 131        |
| 7.2.1    | Grundbegriffe . . . . .   | 131        |
| 7.2.2    | Tangente und Bogenlänge . . . . .   | 131        |
| 7.2.3    | Kurvenintegrale . . . . .   | 132        |
| 7.3      | Fläche . . . . .  | 134        |
| 7.3.1    | Grundbegriffe . . . . .   | 134        |
| 7.3.2    | Tangentialebene . . . . .   | 135        |
| 7.3.3    | Oberflächenintegrale . . . . .  | 136        |
| 7.4      | Vektoranalysis . . . . .  | 137        |
| 7.4.1    | Grundbegriffe . . . . .   | 137        |
| 7.4.2    | Der $\nabla$ -(Nabla-)Operator . . . . .  | 138        |
| 7.4.3    | Integralsätze . . . . .   | 139        |
|          | Allgemeine Literatur . . . . .  | 140        |
| <b>8</b> | <b>Differentialgleichungen . . . . .</b>  | <b>141</b> |
|          | Uller Jarecki   |            |
| 8.1      | Gewöhnliche Differentialgleichungen . . . . .   | 141        |
| 8.1.1    | Grundbegriffe . . . . .   | 141        |
| 8.1.2    | Differentialgleichung 1. Ordnung . . . . .  | 142        |
| 8.1.3    | Differentialgleichungen $n$ -ter Ordnung . . . . .                                    | 145        |
| 8.1.4    | Lineare Differentialgleichungen . . . . .   | 146        |
| 8.1.5    | Lineare Differentialgleichungen mit konstanten<br>Koef zienten . . . . .              | 147        |
| 8.1.6    | Systeme von linearen Differentialgleichungen<br>mit konstanten Koef zienten . . . . . | 150        |
| 8.1.7    | Randwertaufgabe . . . . .   | 153        |
| 8.1.8    | Eigenwertaufgabe . . . . .  | 154        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 8.2       | Partielle Differentialgleichungen . . . . .                             | 155        |
| 8.2.1     | Lineare partielle Differentialgleichungen<br>2. Ordnung . . . . .       | 155        |
| 8.2.2     | Trennung der Veränderlichen . . . . .                                   | 156        |
| 8.2.3     | Anfangs- und Randbedingungen . . . . .                                  | 157        |
|           | Allgemeine Literatur . . . . .  | 159        |
| <b>9</b>  | <b>Stochastik und Statistik . . . . .</b>                               | <b>161</b> |
|           | Hans-Joachim Schulz   |            |
| 9.1       | Kombinatorik . . . . .  | 161        |
| 9.1.1     | Permutationen . . . . .   | 161        |
| 9.1.2     | Variationen . . . . .   | 162        |
| 9.1.3     | Kombinationen . . . . .   | 162        |
| 9.2       | Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten<br>Quadrate . . . . . | 163        |
| 9.2.1     | Grundlagen . . . . .  | 163        |
| 9.2.2     | Ausgleich direkter Messungen gleicher<br>Genauigkeit . . . . .          | 163        |
| 9.2.3     | Fehlerfortpflanzung bei zufälligen Fehlergrößen                         | 165        |
| 9.2.4     | Ausgleich direkter Messungen ungleicher<br>Genauigkeit . . . . .        | 165        |
| 9.3       | Wahrscheinlichkeitsrechnung . . . . .                                   | 166        |
| 9.3.1     | Definitionen und Rechengesetze der<br>Wahrscheinlichkeit . . . . .      | 166        |
| 9.3.2     | Zufallsvariable und Verteilungsfunktion . . . . .                       | 170        |
| 9.3.3     | Parameter der Verteilungsfunktion . . . . .                             | 171        |
| 9.3.4     | Einige spezielle Verteilungsfunktionen . . . . .                        | 174        |
| 9.4       | Statistik . . . . .   | 175        |
| 9.4.1     | Häufigkeitsverteilung . . . . .   | 176        |
| 9.4.2     | Arithmetischer Mittelwert, Varianz und<br>Standardabweichung . . . . .  | 176        |
| 9.4.3     | Regression und Korrelation . . . . .                                    | 178        |
|           | Literatur . . . . .   | 180        |
| <b>10</b> | <b>Numerische Verfahren . . . . .</b>                                   | <b>181</b> |
|           | Hans-Joachim Schulz   |            |
| 10.1      | Numerische Analytische Lösung . . . . .                                 | 181        |
| 10.2      | Näherungsverfahren (Iterationsverfahren) . . . . .                      | 181        |
| 10.2.1    | Splineinterpolation und Bezier-Kurven . . . . .                         | 182        |
| 10.2.2    | Methode der schrittweisen Näherung<br>(Iterationsverfahren) . . . . .   | 189        |
| 10.2.3    | Newtonsches Näherungsverfahren . . . . .                                | 190        |
| 10.2.4    | Sekantenverfahren und Regula falsi . . . . .                            | 190        |
| 10.2.5    | Konvergenzordnung . . . . .   | 190        |
| 10.2.6    | Probleme der Genauigkeit . . . . .                                      | 191        |
| 10.3      | Interpolationsverfahren . . . . .                                       | 191        |
| 10.3.1    | Aufgabenstellung, Existenz und Eindeutigkeit<br>der Lösung . . . . .    | 191        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 10.3.2    | Ansatz nach Lagrange . . . . .   | 192        |
| 10.3.3    | Ansatz nach Newton . . . . .   | 192        |
| 10.3.4    | Polynomberechnung nach dem Horner-Schema . . . . .                                     | 194        |
| 10.4      | Gaußsches Eliminationsverfahren . . . . .  | 195        |
| 10.4.1    | Teilweise Pivotierung . . . . .  | 196        |
| 10.4.2    | Vollständige Pivotierung . . . . .   | 196        |
| 10.5      | Standardaufgabe der linearen Algebra . . . . .   | 197        |
| 10.6      | Integrationsverfahren . . . . .  | 199        |
| 10.6.1    | Newton-Cotes-Formeln . . . . .   | 199        |
| 10.6.2    | Graphisches Integrationsverfahren . . . . .  | 202        |
| 10.6.3    | Differenzenoperatoren . . . . .  | 202        |
| 10.7      | Steifheit von Anfangswertproblemen . . . . .   | 204        |
| 10.8      | Numerische Lösungsverfahren für<br>Differentialgleichungen . . . . .                   | 205        |
| 10.8.1    | Aufgabenstellung des Anfangswertproblems . . . . .                                     | 205        |
| 10.8.2    | Das Eulersche Streckenzugverfahren . . . . .   | 205        |
| 10.8.3    | Runge-Kutta-Verfahren . . . . .  | 206        |
|           | Anhang . . . . .   | 207        |
|           | Allgemeine Literatur . . . . .   | 212        |
| <b>11</b> | <b>Optimierung . . . . .</b>   | <b>213</b> |
|           | Hans-Joachim Schulz  |            |
| 11.1      | Lineare Optimierung . . . . .  | 213        |
| 11.1.1    | Graphisches Verfahren für zwei Variablen . . . . .                                     | 214        |
| 11.1.2    | Simplexverfahren . . . . .   | 214        |
| 11.1.3    | Parametrische lineare Optimierung . . . . .  | 219        |
| 11.2      | Nichtlineare Optimierung . . . . .   | 221        |
| 11.2.1    | Problemstellung . . . . .  | 221        |
| 11.2.2    | Einige spezielle Algorithmen . . . . .   | 221        |
| 11.3      | Optimierungsverfahren zur Eigenwertbestimmung . . . . .                                | 223        |
|           | <b>Literatur Teil I Mathematik . . . . .</b>   | <b>225</b> |
|           | <b>Teil II Mechanik</b>  |            |
| <b>12</b> | <b>Statik starrer Körper . . . . .</b>   | <b>231</b> |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |            |
| 12.1      | Allgemeines . . . . .  | 231        |
| 12.2      | Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften<br>mit gemeinsamem Angriffspunkt . . . . .     | 232        |
| 12.2.1    | Ebene Kräftegruppe . . . . .   | 232        |
| 12.2.2    | Räumliche Kräftegruppe . . . . .   | 233        |
| 12.3      | Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften<br>mit verschiedenen Angriffspunkten . . . . . | 234        |
| 12.3.1    | Kräfte in der Ebene . . . . .  | 234        |
| 12.3.2    | Kräfte im Raum . . . . .   | 235        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 12.4      | Gleichgewicht und Gleichgewichtsbedingungen . . . . .                         | 236        |
| 12.4.1    | Kräfte-System im Raum . . . . .   | 236        |
| 12.4.2    | Kräfte-System in der Ebene . . . . .  | 239        |
| 12.4.3    | Prinzip der virtuellen Arbeiten . . . . .                                     | 239        |
| 12.4.4    | Arten des Gleichgewichts . . . . .  | 239        |
| 12.4.5    | Standsicherheit . . . . .   | 240        |
| 12.5      | Lagerungsarten, Freimachungsprinzip . . . . .                                 | 241        |
| 12.6      | Auflagerreaktionen an Körpern . . . . .                                       | 241        |
| 12.6.1    | Körper in der Ebene . . . . .   | 241        |
| 12.6.2    | Körper im Raum . . . . .  | 243        |
| 12.7      | Systeme starrer Körper . . . . .  | 244        |
| 12.8      | Fachwerke . . . . .   | 245        |
| 12.8.1    | Ebene Fachwerke . . . . .   | 245        |
| 12.8.2    | Räumliche Fachwerke . . . . .   | 247        |
| 12.9      | Seile und Ketten . . . . .  | 247        |
| 12.9.1    | Seil unter Eigengewicht (Kettenlinie) . . . . .                               | 248        |
| 12.9.2    | Seil unter konstanter Streckenlast . . . . .                                  | 248        |
| 12.9.3    | Seil mit Einzellast . . . . .   | 249        |
| 12.10     | Schwerpunkt (Massenmittelpunkt) . . . . .                                     | 249        |
| 12.11     | Haftung und Reibung . . . . .   | 250        |
| 12.11.1   | Anwendungen zur Haftung und Gleitreibung . . . . .                            | 253        |
| 12.11.2   | Rollwiderstand . . . . .  | 255        |
| 12.11.3   | Widerstand an Seilrollen . . . . .  | 255        |
|           | Literatur . . . . .   | 256        |
| <b>13</b> | <b>Kinematik</b> . . . . .  | <b>257</b> |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau  |            |
| 13.1      | Bewegung eines Punkts . . . . .   | 257        |
| 13.1.1    | Allgemeines . . . . .   | 257        |
| 13.1.2    | Ebene Bewegung . . . . .  | 260        |
| 13.1.3    | Räumliche Bewegung . . . . .  | 263        |
| 13.2      | Bewegung starrer Körper . . . . .   | 264        |
| 13.2.1    | Translation (Parallelverschiebung, Schiebung) . . . . .                       | 264        |
| 13.2.2    | Rotation (Drehbewegung, Drehung) . . . . .                                    | 264        |
| 13.2.3    | Allgemeine Bewegung des starren Körpers . . . . .                             | 265        |
| <b>14</b> | <b>Kinetik</b> . . . . .  | <b>273</b> |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau  |            |
| 14.1      | Energetische Grundbegriffe Arbeit, Leistung,<br>Wirkungsgrad . . . . .        | 273        |
| 14.1.1    | Spezielle Arbeiten . . . . .  | 274        |
| 14.2      | Kinetik des Massenpunkts und des translatorisch<br>bewegten Körpers . . . . . | 275        |
| 14.2.1    | Dynamisches Grundgesetz von Newton<br>(2. Newton'sches Axiom) . . . . .       | 275        |
| 14.2.2    | Arbeits- und Energiesatz . . . . .  | 276        |
| 14.2.3    | Impulssatz . . . . .  | 276        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 14.2.4    | Prinzip von d'Alembert und geführte Bewegungen . . . . .                     | 276        |
| 14.2.5    | Impulsmomenten- (Flächen-) und Drehimpulssatz . . . . .                      | 277        |
| 14.3      | Kinetik des Massenpunktsystems . . . . .                                     | 278        |
| 14.3.1    | Schwerpunktsatz . . . . .  | 278        |
| 14.3.2    | Arbeits- und Energiesatz . . . . .   | 279        |
| 14.3.3    | Impulssatz . . . . .   | 279        |
| 14.3.4    | Prinzip von d'Alembert und geführte Bewegungen . . . . .                     | 280        |
| 14.3.5    | Impulsmomenten- und Drehimpulssatz . . . . .                                 | 281        |
| 14.3.6    | Lagrange'sche Gleichungen . . . . .  | 281        |
| 14.3.7    | Prinzip von Hamilton . . . . .   | 282        |
| 14.3.8    | Systeme mit veränderlicher Masse . . . . .                                   | 282        |
| 14.4      | Kinetik starrer Körper . . . . .   | 282        |
| 14.4.1    | Rotation eines starren Körpers um eine feste Achse . . . . .                 | 283        |
| 14.4.2    | Allgemeines über Massenträgheitsmomente . . . . .                            | 285        |
| 14.4.3    | Allgemeine ebene Bewegung starrer Körper . . . . .                           | 287        |
| 14.4.4    | Allgemeine räumliche Bewegung . . . . .                                      | 289        |
| 14.5      | Kinetik der Relativbewegung . . . . .  | 292        |
| 14.6      | Stoß . . . . .   | 292        |
| 14.6.1    | Gerader zentraler Stoß . . . . .   | 293        |
| 14.6.2    | Schiefer zentraler Stoß . . . . .  | 293        |
| 14.6.3    | Exzentrischer Stoß . . . . .   | 294        |
| 14.6.4    | Drehstoß . . . . .   | 294        |
|           | Literatur . . . . .  | 294        |
| <b>15</b> | <b>Schwingungslehre . . . . .</b>  | <b>295</b> |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |            |
| 15.1      | Systeme mit einem Freiheitsgrad . . . . .                                    | 295        |
| 15.1.1    | Freie ungedämpfte Schwingungen . . . . .                                     | 295        |
| 15.1.2    | Freie gedämpfte Schwingungen . . . . .                                       | 297        |
| 15.1.3    | Ungedämpfte erzwungene Schwingungen . . . . .                                | 298        |
| 15.1.4    | Gedämpfte erzwungene Schwingungen . . . . .                                  | 299        |
| 15.1.5    | Kritische Drehzahl und Biegeschwingung der einfach besetzten Welle . . . . . | 300        |
| 15.2      | Systeme mit mehreren Freiheitsgraden (Koppelschwingungen) . . . . .          | 301        |
| 15.2.1    | Freie Schwingungen mit zwei und mehr Freiheitsgraden . . . . .               | 301        |
| 15.2.2    | Erzwungene Schwingungen mit zwei und mehr Freiheitsgraden . . . . .          | 302        |
| 15.2.3    | Eigenfrequenzen ungedämpfter Systeme . . . . .                               | 303        |
| 15.2.4    | Schwingungen der Kontinua . . . . .  | 303        |
| 15.3      | Nichtlineare Schwingungen . . . . .  | 307        |
| 15.3.1    | Schwinger mit nichtlinearer Federkennlinie oder Rückstellkraft . . . . .     | 307        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 15.3.2    | Schwingungen mit periodischen Koeffizienten<br>(rheoliner Schwingungen) . . . . .        | 308        |
|           | Literatur . . . . .  | 308        |
| <b>16</b> | <b>Hydrostatik (Statik der Flüssigkeiten)</b> . . . . .                                  | <b>311</b> |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |            |
| <b>17</b> | <b>Hydro- und Aerodynamik (Strömungslehre, Dynamik<br/>der Fluide)</b> . . . . .         | <b>315</b> |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |            |
| 17.1      | Eindimensionale Strömungen idealer Flüssigkeiten . . . . .                               | 316        |
| 17.1.1    | Anwendungen der Bernoulli'schen Gleichung<br>für den stationären Fall . . . . .          | 317        |
| 17.1.2    | Anwendung der Bernoulli'schen Gleichung<br>für den instationären Fall . . . . .          | 318        |
| 17.2      | Eindimensionale Strömungen zäher Newton'scher<br>Flüssigkeiten (Rohrhydraulik) . . . . . | 318        |
| 17.2.1    | Stationäre laminare Strömung in Rohren<br>mit Kreisquerschnitt . . . . .                 | 319        |
| 17.2.2    | Stationäre turbulente Strömung in Rohren<br>mit Kreisquerschnitt . . . . .               | 319        |
| 17.2.3    | Strömung in Leitungen<br>mit nicht vollkreisförmigen Querschnitten . . . . .             | 322        |
| 17.2.4    | Strömungsverluste durch spezielle<br>Rohrleitungselemente und Einbauten . . . . .        | 322        |
| 17.2.5    | Stationärer Ausfluss aus Behältern . . . . .   | 325        |
| 17.2.6    | Stationäre Strömung durch offene Gerinne . . . . .                                       | 326        |
| 17.2.7    | Instationäre Strömung<br>zäher Newton'scher Flüssigkeiten . . . . .                      | 326        |
| 17.2.8    | Freier Strahl . . . . .  | 326        |
| 17.3      | Eindimensionale Strömung Nicht-Newton'scher<br>Flüssigkeiten . . . . .                   | 327        |
| 17.3.1    | Berechnung von Rohrströmungen . . . . .  | 327        |
| 17.4      | Kraftwirkungen strömender inkompressibler Flüssigkeiten                                  | 328        |
| 17.4.1    | Impulssatz . . . . .   | 328        |
| 17.4.2    | Anwendungen . . . . .  | 328        |
| 17.5      | Mehrdimensionale Strömung idealer Flüssigkeiten . . . . .                                | 330        |
| 17.5.1    | Allgemeine Grundgleichungen . . . . .  | 330        |
| 17.5.2    | Potentialströmungen . . . . .  | 331        |
| 17.6      | Mehrdimensionale Strömung zäher Flüssigkeiten . . . . .                                  | 334        |
| 17.6.1    | Bewegungsgleichungen von Navier-Stokes . . . . .   | 334        |
| 17.6.2    | Einige Lösungen für kleine Reynolds'sche<br>Zahlen (laminare Strömung) . . . . .         | 334        |
| 17.6.3    | Grenzschichttheorie . . . . .  | 335        |
| 17.6.4    | Strömungswiderstand von Körpern . . . . .  | 336        |
| 17.6.5    | Tragflügel und Schaufeln . . . . .   | 339        |
| 17.6.6    | Schaufeln und Profile im Gitterverband . . . . .   | 341        |
|           | Literatur . . . . .  | 342        |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>18</b> | <b>Ähnlichkeitsmechanik</b> . . . . .  | 343 |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |     |
|           | 18.1 Allgemeines . . . . .   | 343 |
|           | 18.2 Ähnlichkeitsgesetze (Modellgesetze) . . . . .                               | 344 |
|           | 18.2.1 Statische Ähnlichkeit . . . . .   | 344 |
|           | 18.2.2 Dynamische Ähnlichkeit . . . . .  | 345 |
|           | 18.2.3 Thermische Ähnlichkeit . . . . .  | 347 |
|           | 18.2.4 Analyse der Einheiten (Dimensionsanalyse)<br>und $\Pi$ -Theorem . . . . . | 347 |
|           | Literatur . . . . .  | 348 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Literatur zu Teil II Mechanik</b> . . . . . | 349 |
|--|-----|

### Teil III Festigkeitslehre

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>19</b> | <b>Allgemeine Grundlagen</b> . . . . .   | 353 |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |     |
|           | 19.1 Spannungen und Verformungen . . . . .                                     | 353 |
|           | 19.1.1 Spannungen . . . . .  | 353 |
|           | 19.1.2 Verformungen . . . . .  | 357 |
|           | 19.1.3 Formänderungsarbeit . . . . .   | 358 |
|           | 19.2 Festigkeitsverhalten der Werkstoffe . . . . .                             | 358 |
|           | 19.3 Festigkeitshypothesen und Vergleichsspannungen . . . . .                  | 361 |
|           | 19.3.1 Normalspannungshypothese . . . . .                                      | 361 |
|           | 19.3.2 Schubspannungshypothese . . . . .                                       | 361 |
|           | 19.3.3 Gestaltänderungsenergiehypothese . . . . .                              | 361 |
|           | 19.3.4 Anstrengungsverhältnis nach Bach . . . . .                              | 362 |
|           | Literatur . . . . .  | 363 |
| <b>20</b> | <b>Beanspruchung stabförmiger Bauteile</b> . . . . .                           | 365 |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |     |
|           | 20.1 Zug- und Druckbeanspruchung . . . . .                                     | 365 |
|           | 20.1.1 Stäbe mit konstantem Querschnitt<br>und konstanter Längskraft . . . . . | 365 |
|           | 20.1.2 Stäbe mit veränderlicher Längskraft . . . . .                           | 365 |
|           | 20.1.3 Stäbe mit veränderlichem Querschnitt . . . . .                          | 365 |
|           | 20.1.4 Stäbe mit Kerben . . . . .  | 366 |
|           | 20.1.5 Stäbe unter Temperatureinfluss . . . . .                                | 366 |
|           | 20.2 Abscherbeanspruchung . . . . .  | 366 |
|           | 20.3 Flächenpressung und Lochleibung . . . . .                                 | 367 |
|           | 20.3.1 Ebene Flächen . . . . .   | 367 |
|           | 20.3.2 Gewölbte Flächen . . . . .  | 367 |
|           | 20.4 Biegebeanspruchung . . . . .  | 368 |
|           | 20.4.1 Schnittlasten: Normalkraft, Querkraft,<br>Biegemoment . . . . .         | 368 |
|           | 20.4.2 Schnittlasten am geraden Träger in der Ebene . . . . .                  | 368 |
|           | 20.4.3 Schnittlasten an gekrümmten ebenen Trägern . . . . .                    | 370 |

|           |        |  |            |
|-----------|--------|--|------------|
|           | 20.4.4 | Schnittlasten an räumlichen Trägern . . . . .  | 370        |
|           | 20.4.5 | Biegespannungen in geraden Balken . . . . .  | 370        |
|           | 20.4.6 | Schubspannungen und Schubmittelpunkt<br>am geraden Träger . . . . .  | 376        |
|           | 20.4.7 | Biegespannungen in stark gekrümmten Trägern .  | 380        |
|           | 20.4.8 | Durchbiegung von Trägern . . . . .   | 382        |
|           | 20.4.9 | Formänderungsarbeit bei Biegung und<br>Energimethoden zur Berechnung von<br>Einzeldurchbiegungen . . . . . | 391        |
|           | 20.5   | Torsionsbeanspruchung . . . . .  | 395        |
|           | 20.5.1 | Stäbe mit Kreisquerschnitt und konstantem<br>Durchmesser . . . . .   | 395        |
|           | 20.5.2 | Stäbe mit Kreisquerschnitt und veränderlichem<br>Durchmesser . . . . .                                     | 398        |
|           | 20.5.3 | Dünnwandige Hohlquerschnitte<br>(Bredt'sche Formeln) . . . . .   | 398        |
|           | 20.5.4 | Stäbe mit beliebigem Querschnitt . . . . .   | 398        |
|           | 20.6   | Zusammengesetzte Beanspruchung . . . . .   | 399        |
|           | 20.6.1 | Biegung und Längskraft . . . . .   | 399        |
|           | 20.6.2 | Biegung und Schub . . . . .  | 400        |
|           | 20.6.3 | Biegung und Torsion . . . . .  | 400        |
|           | 20.6.4 | Längskraft und Torsion . . . . .   | 401        |
|           | 20.6.5 | Schub und Torsion . . . . .  | 401        |
|           | 20.6.6 | Biegung mit Längskraft sowie Schub und Torsion   | 401        |
|           | 20.7   | Statisch unbestimmte Systeme . . . . .   | 401        |
|           |        | Anhang . . . . .   | 403        |
|           |        | Literatur . . . . .  | 413        |
| <b>21</b> |        | <b>Elastizitätstheorie . . . . .</b>   | <b>415</b> |
|           |        | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |            |
|           | 21.1   | Allgemeines . . . . .  | 415        |
|           | 21.2   | Rotationssymmetrischer Spannungszustand . . . . .  | 416        |
|           | 21.3   | Ebener Spannungszustand . . . . .  | 418        |
|           |        | Literatur . . . . .  | 419        |
| <b>22</b> |        | <b>Beanspruchung bei Berührung zweier Körper (Hertz'sche<br/>Formeln) . . . . .</b>                        | <b>421</b> |
|           |        | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |            |
|           | 22.1   | Kugel . . . . .  | 421        |
|           | 22.2   | Zylinder . . . . .   | 422        |
|           | 22.3   | Beliebig gewölbte Fläche . . . . .   | 422        |
|           |        | Literatur . . . . .  | 423        |
| <b>23</b> |        | <b>Flächentragwerke . . . . .</b>  | <b>425</b> |
|           |        | Andreas Hanau und Joachim Villwock   |            |
|           | 23.1   | Platten . . . . .  | 425        |
|           | 23.1.1 | Rechteckplatten . . . . .  | 426        |
|           | 23.1.2 | Kreisplatten . . . . .   | 427        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 23.1.3    | Elliptische Platten . . . . .  | 428        |
| 23.1.4    | Gleichseitige Dreieckplatte . . . . .  | 428        |
| 23.1.5    | Temperaturspannungen in Platten . . . . .  | 428        |
| 23.2      | Scheiben . . . . .   | 428        |
| 23.2.1    | Kreisscheibe . . . . .   | 428        |
| 23.2.2    | Ringförmige Scheibe . . . . .  | 429        |
| 23.2.3    | Unendlich ausgedehnte Scheibe mit Bohrung . . . . .                                  | 429        |
| 23.2.4    | Keilförmige Scheibe unter Einzelkräften . . . . .                                    | 429        |
| 23.3      | Schalen . . . . .  | 430        |
| 23.3.1    | Biegeschlaffe Rotationsschalen und<br>Membrantheorie für Innendruck . . . . .        | 430        |
| 23.3.2    | Biegesteife Schalen . . . . .  | 431        |
|           | Literatur . . . . .  | 432        |
| <b>24</b> | <b>Dynamische Beanspruchung umlaufender Bauteile<br/>durch Fliehkräfte . . . . .</b> | <b>433</b> |
|           | Andreas Hanau und Joachim Villwock   |            |
| 24.1      | Umlaufender Stab . . . . .   | 433        |
| 24.2      | Umlaufender dünnwandiger Ring oder Hohlzylinder . . . . .                            | 433        |
| 24.3      | Umlaufende Scheiben . . . . .  | 434        |
| 24.3.1    | Vollscheibe konstanter Dicke . . . . .   | 434        |
| 24.3.2    | Ringförmige Scheibe konstanter Dicke . . . . .                                       | 434        |
| 24.3.3    | Scheiben gleicher Festigkeit . . . . .   | 435        |
| 24.3.4    | Scheiben veränderlicher Dicke . . . . .  | 435        |
| 24.3.5    | Umlaufender dickwandiger Hohlzylinder . . . . .                                      | 435        |
|           | Literatur . . . . .  | 435        |
| <b>25</b> | <b>Stabilitätsprobleme . . . . .</b>   | <b>437</b> |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau   |            |
| 25.1      | Knickung . . . . .   | 437        |
| 25.1.1    | Knicken im elastischen (Euler-)Bereich . . . . .                                     | 437        |
| 25.1.2    | Knicken im unelastischen (Tetmajer-)Bereich . . . . .                                | 438        |
| 25.1.3    | Näherungsverfahren zur Knicklastberechnung . . . . .                                 | 439        |
| 25.1.4    | Stäbe bei Änderung des Querschnitts bzw.<br>der Längskraft . . . . .                 | 440        |
| 25.1.5    | Knicken von Ringen, Rahmen und Stabsystemen . . . . .                                | 440        |
| 25.1.6    | Biegedrillknicken . . . . .  | 441        |
| 25.2      | Kugel . . . . .  | 442        |
| 25.2.1    | Träger mit Rechteckquerschnitt . . . . .   | 442        |
| 25.2.2    | Träger mit I-Querschnitt . . . . .   | 442        |
| 25.3      | Beulung . . . . .  | 442        |
| 25.3.1    | Beulen von Platten . . . . .   | 443        |
| 25.3.2    | Beulen von Schalen . . . . .   | 445        |
| 25.3.3    | Beulspannungen im unelasti-<br>schen (plastischen) Bereich . . . . .                 | 446        |
|           | Literatur . . . . .  | 446        |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>26</b> | <b>Finite Berechnungsverfahren</b> . . . . .            | 447 |
|           | Joachim Villwock und Andreas Hanau                      |     |
|           | 26.1 Finite Elemente Methode . . . . .                  | 447 |
|           | 26.2 Randelemente . . . . .                             | 452 |
|           | 26.3 Finite Differenzen Methode . . . . .               | 455 |
|           | Literatur . . . . .                                     | 456 |
| <b>27</b> | <b>Plastizitätstheorie</b> . . . . .                    | 457 |
|           | Andreas Hanau und Joachim Villwock                      |     |
|           | 27.1 Allgemeines . . . . .                              | 457 |
|           | 27.2 Anwendungen . . . . .                              | 458 |
|           | 27.2.1 Biegung des Rechteckbalkens . . . . .            | 458 |
|           | 27.2.2 Räumlicher und ebener Spannungszustand . . . . . | 459 |
|           | Literatur . . . . .                                     | 461 |
| <b>28</b> | <b>Festigkeitsnachweis</b> . . . . .                    | 463 |
|           | Heinz Mertens und Robert Liebich                        |     |
|           | 28.1 Berechnungs- und Bewertungskonzepte . . . . .      | 463 |
|           | 28.2 Nennspannungskonzepte . . . . .                    | 464 |
|           | 28.3 Kerbgrundkonzepte . . . . .                        | 466 |
|           | Literatur . . . . .                                     | 468 |
|           | <b>Literatur zu Teil III Festigkeitslehre</b> . . . . . | 471 |

#### Teil IV Werkstofftechnik

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>29</b> | <b>Werkstoff- und Bauteileigenschaften</b> . . . . .                                 | 475 |
|           | Matthias Oechsner, Christina Berger und Karl-Heinz Kloos                             |     |
|           | 29.1 Beanspruchungs- und Versagensarten . . . . .                                    | 475 |
|           | 29.1.1 Beanspruchungsfälle . . . . .   | 475 |
|           | 29.1.2 Versagen durch mechanische Beanspruchung . . . . .                            | 477 |
|           | 29.1.3 Versagen durch komplexe Beanspruchungen . . . . .                             | 478 |
|           | 29.2 Grundlegende Konzepte für den Festigkeitsnachweis . . . . .                     | 480 |
|           | 29.2.1 Festigkeitshypothesen . . . . .   | 480 |
|           | 29.2.2 Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept . . . . .                           | 481 |
|           | 29.2.3 Örtliches Konzept . . . . .   | 481 |
|           | 29.2.4 Plastisches Grenzlastkonzept . . . . .  | 482 |
|           | 29.2.5 Bruchmechanikkonzepte . . . . .   | 482 |
|           | 29.3 Werkstoffkennwerte für die Bauteildimensionierung . . . . .                     | 484 |
|           | 29.3.1 Statische Festigkeit . . . . .  | 485 |
|           | 29.3.2 Schwingfestigkeit . . . . .   | 485 |
|           | 29.3.3 Bruchmechanische Werkstoffkennwerte bei<br>statischer Beanspruchung . . . . . | 487 |
|           | 29.3.4 Bruchmechanische Werkstoffkennwerte bei<br>zyklischer Beanspruchung . . . . . | 489 |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 29.4      | Einflüsse auf die Werkstoffeigenschaften . . . . .   | 490        |
| 29.4.1    | Werkstoffphysikalische Grundlagen der<br>Festigkeit und Zähigkeit metallischer Werkstoffe                          | 490        |
| 29.4.2    | Metallurgische Einflüsse . . . . .   | 491        |
| 29.4.3    | Technologische Einflüsse . . . . .   | 492        |
| 29.4.4    | Oberflächeneinflüsse . . . . .   | 492        |
| 29.4.5    | Umgebungseinflüsse . . . . .   | 493        |
| 29.4.6    | Gestalt einfluss auf statische<br>Festigkeitseigenschaften . . . . .   | 494        |
| 29.4.7    | Gestalt einfluss auf Schwing-<br>festigkeitseigenschaften . . . . .  | 496        |
| 29.5      | Festigkeitsnachweis von Bauteilen . . . . .  | 497        |
| 29.5.1    | Festigkeitsnachweis bei statischer Beanspruchung   | 497        |
| 29.5.2    | Festigkeitsnachweis bei Schwingbeanspruchung<br>mit konstanter Amplitude . . . . .                                 | 497        |
| 29.5.3    | Festigkeitsnachweis bei Schwingbeanspruchung<br>mit variabler Amplitude<br>(Betriebsfestigkeitsnachweis) . . . . . | 498        |
| 29.5.4    | Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis unter<br>statischer Beanspruchung . . . . .                                  | 501        |
| 29.5.5    | Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis unter<br>zyklischer Beanspruchung . . . . .                                  | 502        |
| 29.5.6    | Festigkeitsnachweis unter Zeitstand und<br>Kriechermüdungsbeanspruchung . . . . .                                  | 503        |
|           | Anhang . . . . .   | 505        |
|           | Literatur . . . . .  | 517        |
| <b>30</b> | <b>Werkstoffprüfung . . . . .</b>  | <b>521</b> |
|           | Matthias Oechsner, Christina Berger und Karl-Heinz Kloos   |            |
| 30.1      | Grundlagen . . . . .   | 521        |
| 30.1.1    | Probenentnahme . . . . .   | 521        |
| 30.1.2    | Versuchsauswertung . . . . .   | 522        |
| 30.2      | Prüfverfahren . . . . .  | 523        |
| 30.2.1    | Zugversuch . . . . .   | 523        |
| 30.2.2    | Druckversuch . . . . .   | 524        |
| 30.2.3    | Biegeversuch . . . . .   | 525        |
| 30.2.4    | Härteprüfverfahren . . . . .   | 526        |
| 30.2.5    | Kerbschlagbiegeversuch . . . . .   | 529        |
| 30.2.6    | Bruchmechanische Prüfungen . . . . .   | 530        |
| 30.2.7    | Chemische und physikalische Analysemethoden  | 532        |
| 30.2.8    | Materialographische Untersuchungen . . . . .   | 533        |
| 30.2.9    | Technologische Prüfungen . . . . .   | 535        |
| 30.2.10   | Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung . . . . .  | 535        |
| 30.2.11   | Dauerversuche . . . . .  | 537        |
|           | Literatur . . . . .  | 538        |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>31</b> | <b>Eigenschaften und Verwendung der Werkstoffe</b> . . . . .                   | 539 |
|           | Matthias Oechsner, Christina Berger und Karl-Heinz Kloos                       |     |
| 31.1      | Eisenwerkstoffe . . . . .  | 539 |
| 31.1.1    | Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff . . . . .                              | 539 |
| 31.1.2    | Stahlerzeugung . . . . .   | 541 |
| 31.1.3    | Wärmebehandlung . . . . .  | 543 |
| 31.1.4    | Stähle . . . . .   | 550 |
| 31.1.5    | Gusseisenwerkstoffe . . . . .  | 570 |
| 31.2      | Nichteisenmetalle . . . . .  | 574 |
| 31.2.1    | Kupfer und seine Legierungen . . . . .   | 574 |
| 31.2.2    | Aluminium und seine Legierungen . . . . .                                      | 578 |
| 31.2.3    | Magnesiumlegierungen . . . . .   | 581 |
| 31.2.4    | Titanlegierungen . . . . .   | 582 |
| 31.2.5    | Nickel und seine Legierungen . . . . .   | 583 |
| 31.2.6    | Zink und seine Legierungen . . . . .   | 584 |
| 31.2.7    | Blei . . . . .   | 585 |
| 31.2.8    | Zinn . . . . .   | 585 |
| 31.2.9    | Überzüge auf Metallen . . . . .  | 585 |
| 31.3      | Nichtmetallische anorganische Werkstoffe    Keramische<br>Werkstoffe . . . . . | 590 |
| 31.4      | Werkstoffauswahl . . . . .   | 593 |
|           | Anhang . . . . .   | 594 |
|           | Literatur . . . . .  | 625 |
| <br>      |  |     |
| <b>32</b> | <b>Kunststoffe</b> . . . . .   | 627 |
|           | Michael Kübler, Andreas Müller und Helmut Schürmann                            |     |
| 32.1      | Einführung . . . . .   | 627 |
| 32.2      | Aufbau und Verhalten von Kunststoffen . . . . .                                | 628 |
| 32.3      | Eigenschaften . . . . .  | 629 |
| 32.4      | Wichtige Thermoplaste . . . . .  | 629 |
| 32.5      | Fluorhaltige Kunststoffe . . . . .   | 633 |
| 32.6      | Duroplaste . . . . .   | 634 |
| 32.7      | Kunststoffschäume . . . . .  | 637 |
| 32.8      | Elastomere . . . . .   | 638 |
| 32.9      | Prüfung von Kunststoffen . . . . .   | 640 |
| 32.9.1    | Kennwertermittlung an Probekörpern . . . . .                                   | 640 |
| 32.9.2    | Prüfung von Fertigteilen . . . . .   | 644 |
| 32.10     | Verarbeiten von Kunststoffen . . . . .   | 645 |
| 32.10.1   | Urformen von Kunststoffen . . . . .  | 645 |
| 32.10.2   | Umformen von Kunststoffen . . . . .  | 649 |
| 32.10.3   | Fügen von Kunststoffen . . . . .   | 649 |
| 32.11     | Gestalten und Fertigungsgenauigkeit von Kunststoff-<br>Formteilen . . . . .    | 651 |
| 32.12     | Nachbehandlungen . . . . .   | 652 |
| 32.13     | Faser-Kunststoff-Verbunde . . . . .  | 653 |
| 32.13.1   | Charakterisierung und Einsatzgebiete . . . . .                                 | 653 |
| 32.13.2   | Fasern, Matrix-Kunststoffe und Halbzeuge . . . . .                             | 653 |
| 32.13.3   | Spannungsanalyse von Laminaten . . . . .                                       | 657 |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
|           | 32.13.4 Laminattypen . . . . .  | 658        |
|           | 32.13.5 Festigkeitsanalyse von Laminaten . . . . .  | 661        |
|           | 32.13.6 Fügeverfahren . . . . .   | 664        |
|           | 32.13.7 Fertigungsverfahren . . . . .   | 666        |
|           | Anhang . . . . .  | 667        |
|           | Literatur . . . . .   | 670        |
| <b>33</b> | <b>Tribologie . . . . .</b>   | <b>673</b> |
|           | Karl-Heinz Habig und Mathias Woydt  |            |
|           | 33.1 Reibung . . . . .  | 673        |
|           | 33.2 Verschleiß . . . . .   | 675        |
|           | 33.3 Systemanalyse von Reibungs- und Verschleißvorgängen .                                  | 676        |
|           | 33.3.1 Funktion von Tribosystemen . . . . .   | 676        |
|           | 33.3.2 Beanspruchungskollektiv . . . . .  | 677        |
|           | 33.3.3 Struktur tribologischer Systeme . . . . .  | 677        |
|           | 33.3.4 Tribologische Kenngrößen . . . . .   | 677        |
|           | 33.3.5 Checkliste zur Erfassung der wichtigsten<br>tribologisch relevanten Größen . . . . . | 679        |
|           | 33.4 Schmierung . . . . .   | 680        |
|           | 33.5 Schmierstoffe . . . . .  | 680        |
|           | 33.5.1 Schmieröle . . . . .   | 680        |
|           | 33.5.2 Schmierfette . . . . .   | 684        |
|           | 33.5.3 Festschmierstoffe . . . . .  | 685        |
|           | Anhang . . . . .  | 686        |
|           | Literatur . . . . .   | 688        |
| <b>34</b> | <b>Korrosion und Korrosionsschutz . . . . .</b>   | <b>691</b> |
|           | Thomas Böllinghaus, Michael Rhode und Thora Falkenreck                                      |            |
|           | 34.1 Einleitung . . . . .   | 691        |
|           | 34.2 Elektrochemische Korrosion . . . . .   | 693        |
|           | 34.2.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion . . . . .  | 697        |
|           | 34.2.2 Galvanische und Kontaktkorrosion . . . . .   | 699        |
|           | 34.2.3 Selektive und interkristalline Korrosion . . . . .                                   | 701        |
|           | 34.2.4 Passivierung, Loch- und Spaltkorrosion . . . . .                                     | 704        |
|           | 34.2.5 Risskorrosion . . . . .  | 709        |
|           | 34.2.6 Erosions- und Kavitationskorrosion . . . . .   | 715        |
|           | 34.2.7 Reibkorrosion . . . . .  | 716        |
|           | 34.2.8 Mikrobiologisch beeinflusste Korrosion . . . . .                                     | 716        |
|           | 34.3 Chemische Korrosion und Hochtemperaturkorrosion . . .                                  | 717        |
|           | 34.3.1 Hochtemperaturkorrosion ohne mechanische<br>Beanspruchung . . . . .                  | 718        |
|           | 34.3.2 Hochtemperaturkorrosion mit mechanischer<br>Beanspruchung . . . . .                  | 723        |
|           | 34.4 Korrosionsprüfung . . . . .  | 724        |
|           | Literatur . . . . .   | 725        |

**Teil V Thermodynamik**

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>35</b> | <b>Thermodynamik. Grundbegriffe</b> . . . . .                                   | 729 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
| 35.1      | Systeme, Systemgrenzen, Umgebung . . . . .                                      | 729 |
| 35.2      | Beschreibung des Zustands eines Systems.<br>Thermodynamische Prozesse . . . . . | 730 |
| <b>36</b> | <b>Temperaturen. Gleichgewichte</b> . . . . .                                   | 733 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
| 36.1      | Thermisches Gleichgewicht . . . . .   | 733 |
| 36.2      | Nullter Hauptsatz und empirische Temperatur . . . . .                           | 733 |
| 36.3      | Temperaturskalen . . . . .  | 734 |
|           | 36.3.1 Die Internationale Praktische Temperaturskala . . . . .                  | 735 |
|           | Literatur . . . . .   | 736 |
| <b>37</b> | <b>Erster Hauptsatz</b> . . . . .   | 737 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
| 37.1      | Allgemeine Formulierung . . . . .   | 737 |
| 37.2      | Die verschiedenen Energieformen . . . . .                                       | 737 |
|           | 37.2.1 Arbeit . . . . .   | 737 |
|           | 37.2.2 Innere Energie und Systemenergie . . . . .                               | 738 |
|           | 37.2.3 Wärme . . . . .  | 739 |
| 37.3      | Anwendung auf geschlossene Systeme . . . . .                                    | 739 |
| 37.4      | Anwendung auf offene Systeme . . . . .  | 740 |
|           | 37.4.1 Stationäre Prozesse . . . . .  | 740 |
|           | 37.4.2 Instationäre Prozesse . . . . .  | 741 |
| <b>38</b> | <b>Zweiter Hauptsatz</b> . . . . .  | 743 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
| 38.1      | Das Prinzip der Irreversibilität . . . . .                                      | 743 |
| 38.2      | Allgemeine Formulierung . . . . .   | 744 |
| 38.3      | Spezielle Formulierungen . . . . .  | 745 |
|           | 38.3.1 Adiabate, geschlossene Systeme . . . . .                                 | 745 |
|           | 38.3.2 Systeme mit Wärmezufuhr . . . . .  | 745 |
| <b>39</b> | <b>Exergie und Anergie</b> . . . . .  | 747 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
| 39.1      | Exergie eines geschlossenen Systems . . . . .                                   | 747 |
| 39.2      | Exergie eines offenen Systems . . . . .   | 748 |
| 39.3      | Exergie einer Wärme . . . . .   | 748 |
| 39.4      | Anergie . . . . .   | 749 |
| 39.5      | Exergieverluste . . . . .   | 749 |
| <b>40</b> | <b>Stoffthermodynamik</b> . . . . .   | 751 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
| 40.1      | Thermische Zustandsgrößen von Gasen und Dämpfen . . . . .                       | 751 |
|           | 40.1.1 Ideale Gase . . . . .  | 751 |
|           | 40.1.2 Gaskonstante und das Gesetz von Avogadro . . . . .                       | 751 |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 40.1.3    | Reale Gase . . . . .                                      | 752        |
| 40.1.4    | Dämpfe . . . . .  | 753        |
| 40.2      | Kalorische Zustandsgrößen von Gasen und Dämpfen . . . . . | 755        |
| 40.2.1    | Ideale Gase . . . . .                                     | 755        |
| 40.2.2    | Reale Gase und Dämpfe . . . . .                           | 755        |
| 40.3      | Inkompressible Fluide . . . . .                           | 757        |
| 40.4      | Feste Stoffe . . . . .                                    | 757        |
| 40.4.1    | Wärmedehnung . . . . .                                    | 757        |
| 40.4.2    | Schmelz- und Sublimationsdruckkurve . . . . .             | 757        |
| 40.4.3    | Kalorische Zustandsgrößen . . . . .                       | 758        |
|           | Tabellen zu Kap. 40 . . . . .                             | 759        |
|           | Literatur . . . . .                                       | 776        |
| <b>41</b> | <b>Zustandsänderungen von Gasen und Dämpfen . . . . .</b> | <b>777</b> |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan                            |            |
| 41.1      | Zustandsänderungen ruhender Gase und Dämpfe . . . . .     | 777        |
| 41.2      | Zustandsänderungen strömender Gase und Dämpfe . . . . .   | 779        |
| 41.2.1    | Strömung idealer Gase . . . . .                           | 779        |
| 41.2.2    | Düsen- und Diffusorströmung . . . . .                     | 780        |
| <b>42</b> | <b>Thermodynamische Prozesse . . . . .</b>                | <b>783</b> |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan                            |            |
| 42.1      | Energiewandlung mittels Kreisprozessen . . . . .          | 783        |
| 42.2      | Carnot-Prozess . . . . .                                  | 783        |
| 42.3      | Wärmeanlagen . . . . .                                    | 784        |
| 42.3.1    | Ackeret-Keller-Prozess . . . . .                          | 784        |
| 42.3.2    | Geschlossene Gasturbinenanlage . . . . .                  | 785        |
| 42.3.3    | Dampfkraftanlage . . . . .                                | 786        |
| 42.4      | Verbrennungskraftanlagen . . . . .                        | 787        |
| 42.4.1    | Offene Gasturbinenanlage . . . . .                        | 788        |
| 42.4.2    | Ottomotor . . . . .                                       | 788        |
| 42.4.3    | Dieselmotor . . . . .                                     | 789        |
| 42.4.4    | Brennstoffzellen . . . . .                                | 789        |
| 42.5      | Kälteanlagen und Wärmepumpen . . . . .                    | 790        |
| 42.5.1    | Kompressionskälteanlage . . . . .                         | 790        |
| 42.5.2    | Kompressionswärmepumpe . . . . .                          | 791        |
| 42.6      | Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .                            | 792        |
|           | Literatur . . . . .                                       | 792        |
| <b>43</b> | <b>Gemische . . . . .</b>                                 | <b>793</b> |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan                            |            |
| 43.1      | Gemische idealer Gase . . . . .                           | 793        |
| 43.2      | Gas-Dampf-Gemische . . . . .                              | 794        |
| 43.2.1    | Mollier-Diagramm der feuchten Luft . . . . .              | 795        |
| 43.2.2    | Zustandsänderungen feuchter Luft . . . . .                | 796        |
|           | Tabellen zu Kap. 43 . . . . .                             | 798        |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>44</b> | <b>Verbrennung</b> . . . . .  | 801 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
|           | 44.1 Reaktionsgleichungen . . . . .   | 801 |
|           | 44.2 Heizwert und Brennwert . . . . .   | 802 |
|           | 44.3 Verbrennungstemperatur . . . . .   | 803 |
|           | Tabellen zu Kap. 44 . . . . .   | 804 |
|           | Literatur . . . . .   | 805 |
| <b>45</b> | <b>Wärmeübertragung</b> . . . . .   | 807 |
|           | Peter Stephan und Karl Stephan  |     |
|           | 45.1 Stationäre Wärmeleitung . . . . .  | 807 |
|           | 45.2 Wärmeübergang und Wärmedurchgang . . . . .   | 808 |
|           | 45.3 Nichtstationäre Wärmeleitung . . . . .   | 810 |
|           | 45.3.1 Der halbbunendliche Körper . . . . .   | 811 |
|           | 45.3.2 Zwei halbbunendliche Körper in thermischem<br>Kontakt . . . . .                      | 812 |
|           | 45.3.3 Temperaturlausgleich in einfachen Körpern . . . . .                                  | 812 |
|           | 45.4 Wärmeübergang durch Konvektion . . . . .   | 813 |
|           | 45.4.1 Wärmeübergang ohne Phasenumwandlung . . . . .  | 814 |
|           | 45.4.2 Wärmeübergang beim Kondensieren und<br>beim Sieden . . . . .                         | 817 |
|           | 45.5 Wärmeübertragung durch Strahlung . . . . .   | 818 |
|           | 45.5.1 Gesetz von Stefan-Boltzmann . . . . .  | 818 |
|           | 45.5.2 Kirchhoffsches Gesetz . . . . .  | 819 |
|           | 45.5.3 Wärmeaustausch durch Strahlung . . . . .   | 819 |
|           | 45.5.4 Gasstrahlung . . . . .   | 819 |
|           | Tabellen zu Kap. 45 . . . . .   | 820 |
|           | Literatur . . . . .   | 824 |
|           | <b>Literatur zu Teil V Thermodynamik</b> . . . . .  | 825 |
|           | <b>Teil VI Maschinendynamik</b>   |     |
| <b>46</b> | <b>Schwingungen</b> . . . . .   | 829 |
|           | Holger Hanselka, Sven Herold, Rainer Nordmann und Tamara<br>Nestorovic                      |     |
|           | 46.1 Problematik der Maschinenschwingungen . . . . .  | 829 |
|           | 46.2 Grundbegriffe der Schwingungsanalyse . . . . .   | 830 |
|           | 46.2.1 Mechanisches Ersatzsystem . . . . .  | 830 |
|           | 46.2.2 Bewegungsgleichungen, Systemmatrizen . . . . .                                       | 830 |
|           | 46.2.3 Modale Parameter Eigenfrequenzen, modale<br>Dämpfungen, Eigenvektoren . . . . .      | 831 |
|           | 46.2.4 Modale Analyse . . . . .   | 833 |
|           | 46.2.5 Frequenzgangfunktionen mechanischer Systeme,<br>Amplituden- und Phasengang . . . . . | 833 |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 46.3      | Grundaufgaben der Maschinendynamik . . . . .   | 835        |
| 46.3.1    | Direktes Problem . . . . .   | 835        |
| 46.3.2    | Eingangsproblem . . . . .  | 836        |
| 46.3.3    | Identifikationsproblem . . . . .   | 836        |
| 46.3.4    | Entwurfsproblem . . . . .  | 839        |
| 46.3.5    | Verbesserung des Schwingungszustands<br>einer Maschine . . . . .                     | 839        |
| 46.4      | Darstellung von Schwingungen im Zeit- und<br>Frequenzbereich . . . . .               | 839        |
| 46.4.1    | Darstellung von Schwingungen im Zeitbereich .  | 839        |
| 46.4.2    | Darstellung von Schwingungen<br>im Frequenzbereich . . . . .                         | 840        |
| 46.5      | Entstehung von Maschinenschwingungen, Erregerkräfte<br>$F(t)$ . . . . .              | 842        |
| 46.5.1    | Freie Schwingungen (Eigenschwingungen) . . .   | 843        |
| 46.5.2    | Selbsterregte Schwingungen . . . . .   | 843        |
| 46.5.3    | Parametererregte Schwingungen . . . . .  | 843        |
| 46.5.4    | Erzwungene Schwingungen . . . . .  | 843        |
| 46.6      | Mechanische Ersatzsysteme, Bewegungsgleichungen . .                                  | 848        |
| 46.6.1    | Strukturfestlegung . . . . .   | 848        |
| 46.6.2    | Parameterermittlung . . . . .  | 849        |
| 46.7      | Anwendungsbeispiele für Maschinenschwingungen . . .                                  | 849        |
| 46.7.1    | Drehschwinger mit zwei Drehmassen . . . . .  | 850        |
| 46.7.2    | Torsionsschwingungen einer Turbogruppe . . . .                                       | 851        |
| 46.7.3    | Maschinenwelle mit einem Laufrad (Ventilator)  | 854        |
| 46.7.4    | Tragstruktur (Balken) mit aufgesetzter Maschine                                      | 858        |
|           | Literatur . . . . .  | 861        |
| <b>47</b> | <b>Kurbeltrieb, Massenkräfte und -momente,<br/>Schwungradberechnung . . . . .</b>    | <b>863</b> |
|           | Rainer Nordmann und Tamara Nestorovic  |            |
| 47.1      | Drehkraftdiagramm von Mehrzylindermaschinen . . . . .                                | 863        |
| 47.2      | Massenkräfte und Momente . . . . .   | 866        |
| 47.2.1    | Analytische Verfahren . . . . .  | 866        |
| 47.2.2    | Ausgleich der Kräfte und Momente . . . . .   | 876        |
|           | Literatur . . . . .  | 877        |
| <b>48</b> | <b>Maschinenakustik . . . . .</b>  | <b>879</b> |
|           | Holger Hanselka, Joachim Bös und Tamara Nestorovic                                   |            |
| 48.1      | Grundbegriffe . . . . .  | 879        |
| 48.1.1    | Schall, Frequenz, Hörbereich, Schalldruck,<br>Schalldruckpegel, Lautstärke . . . . . | 879        |
| 48.1.2    | Schnelle, Schnellepegel, Kennimpedanz . . . . .                                      | 880        |
| 48.1.3    | Schallintensität, Schallintensitätspegel . . . . .                                   | 881        |
| 48.1.4    | Schallleistung, Schallleistungspegel . . . . .                                       | 881        |
| 48.1.5    | Fourierspektrum, Spektrogramm,<br>Geräuschanalyse . . . . .                          | 881        |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 48.1.6 | Frequenzbewertung, A-, C- und Z-Bewertung . . .                             | 882 |
| 48.1.7 | Bezugswerte, Pegelarithmetik . . . . .                                      | 883 |
| 48.2   | Geräuschenstehung . . . . .   | 884 |
| 48.2.1 | Direkte und indirekte Geräuschenstehung . . . .                             | 884 |
| 48.2.2 | Maschinenakustische Grundgleichung . . . . .                                | 884 |
| 48.2.3 | Anregungskräfte . . . . .   | 885 |
| 48.2.4 | Körperschallfunktion . . . . .  | 886 |
| 48.2.5 | Luftschallabstrahlung . . . . .   | 886 |
| 48.3   | Möglichkeiten zur Geräuschminderung . . . . .                               | 888 |
| 48.3.1 | Verminderung der Kraftanregung . . . . .                                    | 888 |
| 48.3.2 | Verminderung der Körperschallfunktion . . . . .                             | 889 |
| 48.3.3 | Verminderung der Luftschallabstrahlung . . . . .                            | 890 |
| 48.4   | Aktive Maßnahmen zur Lärm- und<br>Schwingungsminderung . . . . .            | 891 |
| 48.5   | Numerische Verfahren zur Simulation von Luft- und<br>Körperschall . . . . . | 895 |
| 48.6   | Strukturintensität und Körperschallfluss . . . . .                          | 895 |
|        | Literatur . . . . .   | 898 |

## **Teil VII Allgemeine Tabellen**

|           |                                       |            |
|-----------|---------------------------------------|------------|
| <b>49</b> | <b>Allgemeine Tabellen</b> . . . . .  | <b>903</b> |
|           | Karl-Heinrich Grote                   |            |
|           | <b>Fachausdrücke</b> . . . . .        | <b>923</b> |
|           | <b>Stichwortverzeichnis</b> . . . . . | <b>999</b> |

---

# Inhaltsverzeichnis Band 3

## Teil I Kolbenmaschinen

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Allgemeine Grundlagen der Kolbenmaschinen</b> . . . . .        | <b>3</b>  |
|          | Helmut Tschöke und Klaus Mollenhauer                              |           |
| 1.1      | Definition und Einteilung der Kolbenmaschinen . . . . .           | 3         |
| 1.2      | Vollkommene und reale Kolbenmaschine . . . . .                    | 4         |
| 1.2.1    | Die vollkommene Maschine . . . . .                                | 4         |
| 1.2.2    | Die reale Maschine . . . . .                                      | 5         |
| 1.3      | Hubkolbenmaschinen . . . . .                                      | 8         |
| 1.3.1    | Triebwerksbauarten . . . . .                                      | 8         |
| 1.3.2    | Kinematik des Kurbeltriebs . . . . .                              | 9         |
| 1.3.3    | Kräfte am Kurbeltrieb . . . . .                                   | 11        |
| 1.4      | Elemente der Kolbenmaschine . . . . .                             | 14        |
| 1.4.1    | Kurbeltrieb . . . . .   | 14        |
| 1.4.2    | Abdichten des Arbeitsraumes . . . . .                             | 17        |
| 1.4.3    | Zylinderanordnung und -zahl . . . . .                             | 18        |
| 1.4.4    | Lagerung und Schmierung . . . . .                                 | 19        |
| 1.4.5    | Kühlung . . . . .   | 20        |
|          | Literatur . . . . .   | 20        |
| <b>2</b> | <b>Verdrängerpumpen</b> . . . . .                                 | <b>21</b> |
|          | Helmut Tschöke und Herbert Hölz                                   |           |
| 2.1      | Bauarten und Anwendungsgebiete . . . . .                          | 21        |
| 2.2      | Berechnungsgrundlagen . . . . .                                   | 23        |
| 2.2.1    | Förderhöhen, Geschwindigkeiten und Drücke . . . . .               | 23        |
| 2.2.2    | Förderleistung, Antriebsleistung,<br>Gesamtwirkungsgrad . . . . . | 23        |
| 2.2.3    | Instationäre Strömung . . . . .                                   | 24        |
| 2.2.4    | Kavitation . . . . .  | 25        |
| 2.2.5    | Pulsationsdämpfung . . . . .                                      | 25        |
| 2.3      | Verlustteilung . . . . .  | 27        |
| 2.3.1    | Betriebsverhalten der verlustfreien<br>Verdrängerpumpe . . . . .  | 27        |
| 2.3.2    | Definition von Wirkungsgraden . . . . .                           | 28        |
| 2.3.3    | Volumetrische Verluste . . . . .                                  | 28        |
| 2.3.4    | Mechanisch-hydraulische Verluste . . . . .                        | 29        |
| 2.3.5    | Nutzliefergrad und Gesamtwirkungsgrad . . . . .                   | 30        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.4      | Auslegung und Hauptabmessungen . . . . .               | 31        |
| 2.4.1    | Oszzillierende Verdrängerpumpen . . . . .             | 31        |
| 2.4.2    | Rotierende Verdrängerpumpen . . . . .                 | 32        |
| 2.5      | Baugruppen und konstruktive Gestaltung . . . . .       | 33        |
| 2.5.1    | Baugruppen zur Ein- und Auslasssteuerung . . .         | 33        |
| 2.5.2    | Verstellung und Regelung . . . . .                     | 34        |
| 2.5.3    | Verwendungsbedingte Ausführung . . . . .              | 34        |
|          | Literatur . . . . .                                    | 38        |
| <b>3</b> | <b>Kompressoren, Verdichter . . . . .</b>              | <b>39</b> |
|          | Helmut Tschocke und Herbert Hölz                     |           |
| 3.1      | Bauarten und Anwendungsgebiete . . . . .               | 39        |
| 3.2      | Grundlagen und Vergleichsprozesse . . . . .            | 40        |
| 3.2.1    | Volumenstrom, Eintrittspunkt, Austrittspunkt . .       | 40        |
| 3.2.2    | Verdichtung idealer und realer Gase . . . . .          | 41        |
| 3.2.3    | Vergleichsprozesse für einstufige Verdichtung . .     | 42        |
| 3.2.4    | Definition von Wirkungsgraden . . . . .                | 44        |
| 3.2.5    | Mehrstufige Verdichtung . . . . .                      | 44        |
| 3.2.6    | Verdichtung feuchter Gase . . . . .                    | 45        |
| 3.3      | Arbeitszyklus, Liefergrade und Druckverluste . . . . . | 46        |
| 3.3.1    | Arbeitszyklus . . . . .                                | 46        |
| 3.3.2    | Liefergrade . . . . .                                  | 47        |
| 3.3.3    | Druckverluste . . . . .                                | 49        |
| 3.4      | Auslegung und Hauptabmessungen . . . . .               | 50        |
| 3.4.1    | Hubkolbenverdichter . . . . .                          | 50        |
| 3.4.2    | Schraubenverdichter . . . . .                          | 51        |
| 3.4.3    | Rotationsverdichter . . . . .                          | 53        |
| 3.4.4    | Flussigkeitsringverdichter . . . . .                  | 53        |
| 3.4.5    | Roots-Gebläse . . . . .                               | 54        |
| 3.5      | Ein- und Auslasssteuerung . . . . .                    | 55        |
| 3.5.1    | Aufbau selbsttätiger Ventile . . . . .                | 55        |
| 3.5.2    | Ventileinbau . . . . .                                 | 56        |
| 3.5.3    | Ventilauslegung . . . . .                              | 57        |
| 3.6      | Regelung und Betriebsverhalten . . . . .               | 59        |
| 3.6.1    | Regelung . . . . .                                     | 59        |
| 3.6.2    | Betriebsverhalten . . . . .                            | 62        |
| 3.7      | Bauformen und Baugruppen . . . . .                     | 62        |
| 3.7.1    | Hubkolbenverdichter . . . . .                          | 62        |
| 3.7.2    | Membranverdichter . . . . .                            | 64        |
| 3.7.3    | Schraubenverdichter . . . . .                          | 64        |
| 3.7.4    | Rotationsverdichter . . . . .                          | 66        |
|          | Literatur . . . . .                                    | 67        |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>4</b> | <b>Verbrennungsmotoren</b> . . . . .  | 69  |
|          | Helmut Tschöke und Klaus Mollenhauer  |     |
| 4.1      | Einteilung und Anwendung . . . . .  | 69  |
| 4.2      | Arbeitsverfahren und Arbeitsprozesse . . . . .                              | 70  |
|          | 4.2.1 Arbeitsverfahren . . . . .  | 70  |
|          | 4.2.2 Vergleichsprozesse . . . . .  | 70  |
|          | 4.2.3 Wirklicher Arbeitsprozess . . . . .                                   | 73  |
| 4.3      | Ladungswechsel . . . . .  | 79  |
|          | 4.3.1 Kenngrößen des Ladungswechsels . . . . .                              | 79  |
|          | 4.3.2 Steuerorgane für den Ladungswechsel . . . . .                         | 80  |
|          | 4.3.3 Ladungswechsel des Viertaktmotors . . . . .                           | 83  |
|          | 4.3.4 Ladungswechsel des Zweitaktmotors . . . . .                           | 85  |
|          | 4.3.5 Aufladung von Motoren . . . . .                                       | 87  |
| 4.4      | Verbrennung im Motor . . . . .  | 91  |
|          | 4.4.1 Motoren-Kraftstoffe . . . . .   | 91  |
|          | 4.4.2 Gemischbildung und Verbrennung im Ottomotor                           | 92  |
|          | 4.4.3 Gemischbildung und Verbrennung im<br>Dieselmotor . . . . .            | 94  |
|          | 4.4.4 Hybride Verfahren für Gemischbildung und<br>Verbrennung . . . . .     | 97  |
| 4.5      | Verfahren zur Gemischbildung und Zündung bei<br>Ottomotoren . . . . .       | 98  |
|          | 4.5.1 Anforderungen an Gemischbildung . . . . .                             | 98  |
|          | 4.5.2 Vergaser . . . . .  | 98  |
|          | 4.5.3 Saugrohr-Benzin-Einspritzung . . . . .                                | 99  |
|          | 4.5.4 Direkte Benzin-Einspritzung . . . . .                                 | 100 |
|          | 4.5.5 Zündausrüstung . . . . .  | 102 |
| 4.6      | Einrichtungen zur Gemischbildung und Zündung bei<br>Dieselmotoren . . . . . | 104 |
|          | 4.6.1 Einspritzsysteme . . . . .  | 104 |
|          | 4.6.2 Einspritzdüse . . . . .   | 107 |
|          | 4.6.3 Start- und Zündhilfen . . . . .                                       | 108 |
| 4.7      | Betriebsverhalten und Kenngrößen . . . . .                                  | 109 |
|          | 4.7.1 Leistung, Drehmoment und Verbrauch . . . . .                          | 109 |
|          | 4.7.2 Kenngrößen . . . . .  | 110 |
|          | 4.7.3 Umweltverhalten . . . . .   | 111 |
|          | 4.7.4 Verbrennungsmotor als Antriebsaggregat . . . . .                      | 120 |
| 4.8      | Konstruktion von Motoren . . . . .  | 122 |
|          | 4.8.1 Ähnlichkeitsbeziehungen und Beanspruchung . . . . .                   | 122 |
|          | 4.8.2 Motorbauarten . . . . .   | 124 |
|          | 4.8.3 Motorbauteile . . . . .   | 126 |
|          | 4.8.4 Ausgeführte Motorkonstruktionen . . . . .                             | 130 |
|          | Literatur . . . . .   | 136 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>5</b> | <b>Motoren für den maritimen Betrieb</b> . . . . . | 139 |
|          | Udo Schlemmer-Kelling und Lars Nerheim             |     |
| 5.1      | Grundsätzliches . . . . .                          | 139 |
| 5.2      | Kraftstoffe . . . . .                              | 142 |
|          | 5.2.1 Flüssige Kraftstoffe . . . . .               | 142 |
|          | 5.2.2 Gasförmige Kraftstoffe . . . . .             | 145 |
| 5.3      | Motor Auslegung und Design . . . . .               | 146 |
| 5.4      | Thermodynamik . . . . .                            | 154 |
|          | 5.4.1 Grundausslegung . . . . .                    | 154 |
|          | 5.4.2 Brennverfahren . . . . .                     | 156 |
|          | 5.4.3 Emissionen . . . . .                         | 158 |
|          | 5.4.4 Motorapplikation und Betrieb . . . . .       | 161 |
|          | Literatur . . . . .                                | 164 |

## Teil II Strömungsmaschinen

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>6</b> | <b>Grundlagen der Strömungsmaschinen</b> . . . . .  | 169 |
|          | Jörg Seume und Ronald Mailach   |     |
| 6.1      | Strömungstechnik . . . . .  | 169 |
|          | 6.1.1 Einleitung und Definitionen . . . . .   | 169 |
|          | 6.1.2 Wirkungsweise . . . . .   | 170 |
|          | 6.1.3 Strömungsgesetze . . . . .  | 170 |
|          | 6.1.4 Absolute und relative Strömung . . . . .  | 172 |
|          | 6.1.5 Schaufelanordnung für Pumpen und Verdichter<br>(Arbeitsmaschinen) . . . . .               | 173 |
|          | 6.1.6 Schaufelanordnung für Turbinen<br>(Kraftmaschinen) . . . . .                              | 173 |
|          | 6.1.7 Schaufelgitter, Stufe, Maschine, Anlage . . . . .   | 173 |
| 6.2      | Thermodynamik . . . . .   | 174 |
|          | 6.2.1 Thermodynamische Gesetze . . . . .  | 174 |
|          | 6.2.2 Zustandsänderung . . . . .  | 175 |
|          | 6.2.3 Totaler Wirkungsgrad . . . . .  | 176 |
|          | 6.2.4 Statischer Wirkungsgrad . . . . .   | 176 |
|          | 6.2.5 Polytroper und isentroper Wirkungsgrad . . . . .  | 176 |
|          | 6.2.6 Mechanische Verluste . . . . .  | 178 |
| 6.3      | Arbeitsfluid . . . . .  | 178 |
|          | 6.3.1 Allgemeiner Zusammenhang zwischen<br>thermischen und kalorischen Zustandsgrößen . . . . . | 178 |
|          | 6.3.2 Ideale Flüssigkeit . . . . .  | 179 |
|          | 6.3.3 Ideales Gas . . . . .   | 179 |
|          | 6.3.4 Reales Fluid . . . . .  | 179 |
|          | 6.3.5 Kavitation bei Flüssigkeiten . . . . .  | 182 |
|          | 6.3.6 Kondensation bei Dämpfen . . . . .  | 182 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.4      | Schaufelgitter . . . . .  | 182        |
| 6.4.1    | Anordnung der Schaufeln im Gitter . . . . .                               | 182        |
| 6.4.2    | Leit- und Laufgitter . . . . .  | 183        |
| 6.4.3    | Einteilung nach Geschwindigkeits- und<br>Druckänderung . . . . .          | 184        |
| 6.4.4    | Reale Strömung in Schaufelgittern . . . . .                               | 185        |
| 6.4.5    | Gitterauslegung . . . . .   | 185        |
| 6.4.6    | Strömungsverluste . . . . .   | 187        |
| 6.5      | Stufen . . . . .  | 188        |
| 6.5.1    | Zusammensetzen von Gittern zu Stufen . . . . .                            | 188        |
| 6.5.2    | Stufenkenngrößen . . . . .  | 190        |
| 6.5.3    | Axiale Repetierstufe eines vielstu-<br>gen Verdichters . . . . .          | 192        |
| 6.5.4    | Radiale Repetierstufe eines Verdichters . . . . .                         | 192        |
| 6.5.5    | Kenngrößen-Bereiche für Verdichterstufen . . . . .                        | 193        |
| 6.5.6    | Axiale Repetierstufe einer Turbine . . . . .                              | 193        |
| 6.5.7    | Radiale Turbinenstufe . . . . .   | 194        |
| 6.5.8    | Kenngrößen-Bereiche für Turbinenstufen . . . . .                          | 195        |
| 6.6      | Maschine . . . . .  | 196        |
| 6.6.1    | Beschaufelung, Ein- und Austrittsgehäuse . . . . .                        | 196        |
| 6.6.2    | Maschinenkenngrößen . . . . .   | 196        |
| 6.6.3    | Wahl der Bauweise . . . . .   | 197        |
| 6.7      | Betriebsverhalten und Regelmöglichkeiten . . . . .                        | 199        |
| 6.7.1    | Zusammenwirken von Strömungsmaschine und<br>Anlage . . . . .              | 199        |
| 6.7.2    | Regelung von Strömungsmaschinen . . . . .                                 | 200        |
| 6.7.3    | Kennfeld und Betriebsverhalten von Verdichtern . . . . .                  | 201        |
| 6.8      | Beanspruchung und Festigkeit der wichtigsten Bauteile . . . . .           | 202        |
| 6.8.1    | Rotierende Scheibe, rotierender Zylinder . . . . .                        | 203        |
| 6.8.2    | Durchbiegung, kritische Drehzahlen von Rotoren . . . . .                  | 205        |
| 6.8.3    | Beanspruchung der Schaufeln durch Fliehkräfte . . . . .                   | 205        |
| 6.8.4    | Beanspruchung der Schaufeln durch stationäre<br>Strömungskräfte . . . . . | 206        |
| 6.8.5    | Schaufelschwingungen . . . . .  | 207        |
| 6.8.6    | Gehäuse . . . . .   | 210        |
| 6.8.7    | Thermische Beanspruchung . . . . .  | 211        |
|          | Literatur . . . . .   | 213        |
| <b>7</b> | <b>Wasserturbinen</b> . . . . .   | <b>215</b> |
|          | Paul Thamsen  |            |
| 7.1      | Allgemeines . . . . .   | 215        |
| 7.1.1    | Kennzeichen . . . . .   | 215        |
| 7.1.2    | Wasserkraftwerke . . . . .  | 216        |
| 7.1.3    | Wirtschaftliches . . . . .  | 217        |
| 7.2      | Gleichdruckturbinen . . . . .   | 217        |
| 7.2.1    | Peltonurbinen . . . . .   | 217        |
| 7.2.2    | Ossbergerturbinen . . . . .   | 218        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 7.3       | Überdruckturbinen . . . . .                                    | 218        |
| 7.3.1     | Francisturbinen . . . . .                                      | 218        |
| 7.3.2     | Kaplanturbinen . . . . .                                       | 219        |
| 7.3.3     | D riazturbinen . . . . .                                       | 220        |
| 7.4       | Werkstoffe . . . . .   | 220        |
| 7.5       | Kennliniendarstellungen . . . . .                              | 220        |
| 7.6       | Extreme Betriebsverhältnisse . . . . .                         | 221        |
| 7.7       | Laufwasser- und Speicherkraftwerke . . . . .                   | 222        |
|           | Literatur . . . . .  | 223        |
| <b>8</b>  | <b>Kreiselpumpen</b> . . . . .                                 | <b>225</b> |
|           | Paul Thamsen   |            |
| 8.1       | Allgemeines . . . . .  | 225        |
| 8.2       | Bauarten . . . . .   | 225        |
| 8.2.1     | Laufrad . . . . .  | 225        |
| 8.2.2     | Gehäuse . . . . .  | 227        |
| 8.2.3     | Fluid . . . . .  | 227        |
| 8.2.4     | Werkstoff . . . . .  | 227        |
| 8.2.5     | Antrieb . . . . .  | 228        |
| 8.3       | Betriebsverhalten . . . . .                                    | 228        |
| 8.3.1     | Kavitation . . . . .   | 228        |
| 8.3.2     | Kennlinien . . . . .   | 230        |
| 8.3.3     | Anpassung der Kreiselpumpe<br>an den Leistungsbedarf . . . . . | 231        |
| 8.3.4     | Achsschubausgleich . . . . .                                   | 234        |
| 8.4       | Ausgeführte Pumpen . . . . .                                   | 235        |
| 8.4.1     | Wasserwirtschaft . . . . .                                     | 235        |
| 8.4.2     | Kraftwerkstechnik . . . . .                                    | 235        |
| 8.4.3     | Verfahrenstechnik . . . . .                                    | 235        |
| 8.4.4     | Andere Einsatzgebiete . . . . .                                | 236        |
|           | Literatur . . . . .  | 240        |
| <b>9</b>  | <b>Schiffspropeller</b> . . . . .                              | <b>241</b> |
|           | Paul Thamsen   |            |
| 9.1       | Allgemeines . . . . .  | 241        |
| 9.2       | Schiffspropeller . . . . .                                     | 241        |
|           | Literatur . . . . .  | 243        |
| <b>10</b> | <b>Föttinger-Getriebe</b> . . . . .                            | <b>245</b> |
|           | Paul Thamsen   |            |
| 10.1      | Prinzip und Bauformen . . . . .                                | 245        |
| 10.2      | Auslegung . . . . .  | 247        |
| 10.3      | Föttinger-Kupplungen . . . . .                                 | 247        |
| 10.4      | Bremsen . . . . .  | 248        |
| 10.5      | Föttinger-Wandler . . . . .                                    | 249        |
|           | Literatur . . . . .  | 250        |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>11</b> | <b>Dampfturbinen</b> . . . . .                           | 251 |
|           | Edwin Krämer   |     |
| 11.1      | Benennungen . . . . .                                    | 251 |
| 11.2      | Bauarten . . . . .                                       | 252 |
| 11.2.1    | Kraftwerksturbinen . . . . .                             | 252 |
| 11.2.2    | Industrieturbinen . . . . .                              | 257 |
| 11.2.3    | Kleinturbinen . . . . .                                  | 260 |
| 11.3      | Konstruktionselemente . . . . .                          | 261 |
| 11.3.1    | Gehäuse . . . . .  | 261 |
| 11.3.2    | Ventile und Klappen . . . . .                            | 261 |
| 11.3.3    | Beschaufelung . . . . .                                  | 262 |
| 11.3.4    | Wellendichtungen . . . . .                               | 264 |
| 11.3.5    | Läufer-Dreheinrichtung . . . . .                         | 264 |
| 11.3.6    | Lager . . . . .  | 264 |
| 11.4      | Anfahren und Betrieb . . . . .                           | 264 |
| 11.5      | Regelung, Sicherheits- und Schutzeinrichtungen . . . . . | 265 |
| 11.6      | Berechnungsverfahren . . . . .                           | 265 |
| 11.6.1    | Allgemeines . . . . .                                    | 265 |
| 11.6.2    | Auslegung von Industrieturbinen . . . . .                | 265 |
| <b>12</b> | <b>Turboverdichter</b> . . . . .                         | 269 |
|           | Harald Stricker  |     |
| 12.1      | Einteilung und Einsatzbereiche . . . . .                 | 269 |
| 12.1.1    | Allgemeines . . . . .                                    | 269 |
| 12.1.2    | Ventilatoren . . . . .                                   | 269 |
| 12.1.3    | Axialverdichter . . . . .                                | 269 |
| 12.1.4    | Radialverdichter . . . . .                               | 270 |
| 12.2      | Radiale Laufradbauarten . . . . .                        | 272 |
| 12.2.1    | Allgemeine Anforderungen . . . . .                       | 272 |
| 12.2.2    | Das geschlossene 2D-Laufrad . . . . .                    | 272 |
| 12.2.3    | Das geschlossene 3D-Laufrad . . . . .                    | 273 |
| 12.2.4    | Das offene 3D-Laufrad . . . . .                          | 273 |
| 12.2.5    | Laufradverwendung . . . . .                              | 273 |
| 12.2.6    | Laufradherstellung . . . . .                             | 274 |
| 12.2.7    | Laufradfestigkeit und Strukturodynamik . . . . .         | 275 |
| 12.3      | Radiale Verdichterbauarten . . . . .                     | 275 |
| 12.3.1    | Einwellenverdichter . . . . .                            | 275 |
| 12.3.2    | Getriebeverdichter . . . . .                             | 278 |
| 12.3.3    | Gekapselte, direkt angetriebene Verdichter . . . . .     | 280 |
| 12.4      | Regelung und Maschinenschutz . . . . .                   | 281 |
| 12.4.1    | Verdichterkennfeld . . . . .                             | 281 |
| 12.4.2    | Drehzahlregelung . . . . .                               | 282 |
| 12.4.3    | Saugdrosselregelung . . . . .                            | 282 |
| 12.4.4    | Eintrittsleitschaufel-Regelung . . . . .                 | 283 |
| 12.4.5    | Bypass-Regelung . . . . .                                | 283 |
| 12.4.6    | Maschinenüberwachung und -schutz . . . . .               | 284 |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 12.5      | Beispiel einer Radialverdichterauslegung . . . . .       | 285        |
| 12.5.1    | Vereinfachtes Verfahren . . . . .                        | 285        |
| 12.5.2    | Betriebsbedingungen (vorgegeben) . . . . .               | 285        |
| 12.5.3    | Gasdaten . . . . .                                       | 286        |
| 12.5.4    | Volumenstrom, Laufraddurchmesser, Drehzahl . . . . .     | 286        |
| 12.5.5    | Endtemperatur, spezielle polytrope Arbeit . . . . .      | 287        |
| 12.5.6    | Wirkungsgrad, Stufenzahl . . . . .                       | 287        |
| 12.5.7    | Leistung . . . . .                                       | 287        |
|           | Literatur . . . . .                                      | 288        |
| <b>13</b> | <b>Gasturbinen . . . . .</b>                             | <b>289</b> |
|           | Jörg Seume und Jochen Gier                               |            |
| 13.1      | Einteilung und Verwendung . . . . .                      | 289        |
| 13.2      | Thermodynamische Grundlagen . . . . .                    | 290        |
| 13.2.1    | Idealisierte Kreisprozesse . . . . .                     | 290        |
| 13.2.2    | Reale Gasturbinenprozesse . . . . .                      | 292        |
| 13.3      | Baugruppen . . . . .                                     | 293        |
| 13.3.1    | Verdichter . . . . .                                     | 293        |
| 13.3.2    | Turbine . . . . .  | 294        |
| 13.3.3    | Brennkammer . . . . .                                    | 295        |
| 13.4      | Gasturbine im Kraftwerk . . . . .                        | 297        |
| 13.4.1    | Allgemeines und Bauweise . . . . .                       | 297        |
| 13.4.2    | Gas- und Dampf-Anlagen . . . . .                         | 297        |
| 13.4.3    | Luftspeicher-Kraftwerk . . . . .                         | 298        |
| 13.5      | Gasturbinen im Verkehr . . . . .                         | 298        |
| 13.5.1    | Flugtriebwerke . . . . .                                 | 298        |
| 13.5.2    | Schifffahrt . . . . .                                    | 306        |
| 13.5.3    | Straßenfahrzeuge . . . . .                               | 306        |
| 13.5.4    | Abgasturbolader . . . . .                                | 306        |
| 13.6      | Brennstoffe . . . . .                                    | 307        |
| 13.7      | Beanspruchungen und Werkstoffe . . . . .                 | 307        |
| 13.8      | Betriebsverhalten . . . . .                              | 307        |
| 13.8.1    | Ähnlichkeitskennfelder . . . . .                         | 307        |
| 13.8.2    | Teillastbetrieb . . . . .                                | 309        |
| 13.9      | Abgasemission . . . . .                                  | 309        |
|           | Literatur . . . . .                                      | 310        |
|           | <b>Literatur zu Teil II Strömungsmaschinen . . . . .</b> | <b>311</b> |

**Teil III Fördertechnik**

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>14</b> | <b>Grundlagen</b> . . . . .  | 315 |
|           | Thorsten Schmidt, Jan Scholten, Michael Ketting und Karl-Heinz Wehking |     |
| 14.1      | Begriffsbestimmungen und Übersicht . . . . .                           | 315 |
| 14.1.1    | Einordnung der Fördertechnik . . . . .                                 | 315 |
| 14.1.2    | Fördergüter und Fördermaschinen . . . . .                              | 316 |
| 14.1.3    | Kenngrößen des Fördervorgangs . . . . .                                | 319 |
| 14.2      | Antriebe der Fördermaschinen . . . . .                                 | 319 |
| 14.2.1    | Hubwerke . . . . .   | 319 |
| 14.2.2    | Fahrwerke . . . . .  | 320 |
| 14.2.3    | Drehwerke . . . . .  | 323 |
| 14.2.4    | Einzieh- und Wippwerke . . . . .                                       | 326 |
| 14.2.5    | Kraftschlüssige Antriebe . . . . .                                     | 327 |
| 14.2.6    | Formschlüssige Antriebe . . . . .                                      | 327 |
| 14.2.7    | Antriebsmotoren und Steuerungen . . . . .                              | 328 |
| 14.3      | Tragwerke . . . . .  | 331 |
| 14.3.1    | Tragwerksgestaltung . . . . .  | 331 |
| 14.3.2    | Grundlagen der Tragwerksberechnung . . . . .                           | 332 |
| 14.3.3    | Lasten und Lastkombinationen . . . . .                                 | 334 |
| 14.3.4    | Zu führende Einzelnachweise . . . . .                                  | 337 |
| 14.4      | Charakteristische Maschinenelemente der Fördertechnik                  | 338 |
| 14.4.1    | Ketten und Kettentriebe . . . . .                                      | 338 |
| 14.4.2    | Seile und Seiltriebe . . . . .   | 341 |
| 14.4.3    | Faserseile . . . . .   | 351 |
| 14.4.4    | Mechanische Elemente der Antriebe . . . . .                            | 354 |
| 14.4.5    | Laufрад und Schiene (Schienefahrwerke) . . . . .                       | 359 |
| 14.4.6    | Raupenfahrwerke . . . . .  | 363 |
|           | Literatur . . . . .  | 368 |
| <b>15</b> | <b>Hebezeuge und Krane</b> . . . . .                                   | 371 |
|           | Jan Scholten   |     |
| 15.1      | Tragmittel und Lastaufnahmemittel . . . . .                            | 371 |
| 15.1.1    | Lasthaken . . . . .  | 371 |
| 15.1.2    | Lastaufnahmemittel für Stückgüter . . . . .                            | 372 |
| 15.1.3    | Lastaufnahmemittel für Schüttgüter . . . . .                           | 373 |
| 15.2      | Hubwerksausführungen . . . . .   | 374 |
| 15.2.1    | Serienhebezeuge . . . . .  | 377 |
| 15.2.2    | Einzelhebezeuge . . . . .  | 378 |
| 15.3      | Kranarten . . . . .  | 379 |
| 15.3.1    | Brücken- und Portalkrane . . . . .                                     | 379 |
| 15.3.2    | Drehkrane . . . . .  | 384 |
| 15.3.3    | Fahrzeugkrane . . . . .  | 390 |
| 15.3.4    | Weitere Kranarten . . . . .  | 391 |
|           | Literatur . . . . .  | 392 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>16</b> | <b>Flurförderzeuge</b> . . . . .                  | 395 |
|           | Rainer Bruns                                      |     |
| 16.1      | Baugruppen und Komponenten . . . . .              | 395 |
| 16.1.1    | Fahrwerk . . . . .                                | 395 |
| 16.1.2    | Fahrtrieb . . . . .                               | 396 |
| 16.1.3    | Hubgerüst . . . . .                               | 396 |
| 16.1.4    | Lastaufnahmevorrichtung . . . . .                 | 397 |
| 16.1.5    | Hubtrieb, Antrieb der Nebenfunktionen . . . . .   | 397 |
| 16.2      | Handbetriebene Flurförderzeuge . . . . .          | 398 |
| 16.2.1    | Handwagen . . . . .                               | 398 |
| 16.2.2    | Rollwagen . . . . .                               | 398 |
| 16.2.3    | Handgabelhubwagen . . . . .                       | 398 |
| 16.3      | Motorisch betriebene Flurförderzeuge . . . . .    | 398 |
| 16.3.1    | Niederhubwagen . . . . .                          | 398 |
| 16.3.2    | Gabelhochhubwagen . . . . .                       | 399 |
| 16.3.3    | Spreizenstapler . . . . .                         | 400 |
| 16.3.4    | Gegengewichtstapler . . . . .                     | 400 |
| 16.3.5    | Schubstapler . . . . .                            | 400 |
| 16.3.6    | Mehrwegestapler . . . . .                         | 400 |
| 16.3.7    | Querstapler . . . . .                             | 401 |
| 16.3.8    | Schmalgangstapler . . . . .                       | 401 |
| 16.3.9    | Kommissionier-Flurförderzeuge . . . . .           | 401 |
| 16.3.10   | Wagen . . . . .                                   | 402 |
| 16.3.11   | Schlepper . . . . .                               | 403 |
| 16.3.12   | Schleppzüge . . . . .                             | 403 |
| 16.3.13   | Portalstapler . . . . .                           | 403 |
| 16.3.14   | Fahrerlose Transportsysteme (FTS) . . . . .       | 405 |
|           | Literatur . . . . .                               | 405 |
| <b>17</b> | <b>Weitere Unstetigförderer</b> . . . . .         | 407 |
|           | Ludger Overmeyer                                  |     |
| 17.1      | Elektrohängebahn . . . . .                        | 407 |
|           | Literatur . . . . .                               | 407 |
| <b>18</b> | <b>Aufzüge und Schachtförderanlagen</b> . . . . . | 409 |
|           | Karl-Heinz Wehking                                |     |
| 18.1      | Übersicht . . . . .                               | 409 |
| 18.2      | Aufzüge . . . . .                                 | 409 |
| 18.2.1    | Hydraulikaufzüge . . . . .                        | 409 |
| 18.2.2    | Seilaufzüge . . . . .                             | 410 |
| 18.2.3    | Bemessung, Förderstrom, Steuerung . . . . .       | 410 |
| 18.2.4    | Steuerungen . . . . .                             | 412 |
| 18.2.5    | Spezielle Sicherheitseinrichtungen . . . . .      | 414 |
| 18.3      | Schachtförderanlagen . . . . .                    | 415 |
|           | Literatur . . . . .                               | 415 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>19</b> | <b>Stetigförderer</b> . . . . .   | 417 |
|           | Andre Katterfeld, Friedrich Krause, Ludger Overmeyer,<br>Karl-Heinz Wehking, Willibald Günthner und Michael ten<br>Hompel |     |
| 19.1      | Berechnungsgrundlagen . . . . .   | 417 |
| 19.2      | Stetigförderer mit Zugmittel . . . . .  | 418 |
| 19.2.1    | Grundlagen der Berechnung . . . . .   | 418 |
| 19.2.2    | Gurtförderer . . . . .  | 422 |
| 19.2.3    | Becherwerke (Becherförderer) . . . . .  | 436 |
| 19.2.4    | Kreisförderer . . . . .   | 440 |
| 19.2.5    | Gliederbandförderer . . . . .   | 441 |
| 19.2.6    | Kratzerförderer . . . . .   | 442 |
| 19.2.7    | Trogkettenförderer . . . . .  | 443 |
| 19.3      | Stetigförderer ohne Zugmittel . . . . .   | 444 |
| 19.3.1    | Förderer mit Schnecken . . . . .  | 444 |
| 19.3.2    | Schwingförderer . . . . .   | 446 |
| 19.3.3    | Rollen- und Kugelbahnen . . . . .   | 448 |
| 19.4      | Sorter . . . . .  | 450 |
| 19.4.1    | Sortiersystem Sortieranlage Sorter . . . . .  | 450 |
| 19.4.2    | Systematik der Verteilförderer . . . . .  | 451 |
| 19.4.3    | Quergurtsorter . . . . .  | 451 |
| 19.4.4    | Kippschalensorter . . . . .   | 452 |
| 19.4.5    | Schiebeschuhsorter . . . . .  | 452 |
| 19.5      | Weitere Stetigförderer . . . . .  | 452 |
| 19.5.1    | Plattenbandförderer . . . . .   | 452 |
| 19.5.2    | Schubplattformförderer . . . . .  | 452 |
| 19.5.3    | Schuppenförderer . . . . .  | 453 |
| 19.5.4    | Umlauf-S-Förderer . . . . .   | 454 |
| 19.5.5    | Rutschen und Fallrohre . . . . .  | 454 |
| 19.6      | Strömungsförderer . . . . .   | 454 |
| 19.6.1    | Pneumatische Förderer . . . . .   | 455 |
| 19.6.2    | Hydraulische Förderer . . . . .   | 456 |
| 19.6.3    | Berechnungsgrundlagen . . . . .   | 457 |
|           | Literatur . . . . .   | 457 |
| <b>20</b> | <b>Lager- und Systemtechnik</b> . . . . .   | 459 |
|           | Willibald Günthner, Michael ten Hompel, Andre Katterfeld und<br>Friedrich Krause  |     |
| 20.1      | Stückgut-Systemtechnik . . . . .  | 459 |
| 20.1.1    | Transporteinheiten (TE) und Transporthilfsmittel<br>(THM) . . . . .   | 459 |
| 20.1.2    | Funktion und Subsysteme . . . . .   | 460 |
| 20.1.3    | Theoretische Behandlung<br>von Materialflusssystemen . . . . .  | 463 |
| 20.1.4    | Lagereinrichtung und Lagerbedienung . . . . .   | 465 |
| 20.1.5    | Belegungs- und Bedienstrategien . . . . .   | 471 |
| 20.1.6    | Lagerkennzahlen . . . . .   | 473 |
| 20.1.7    | Kommissionierung . . . . .  | 474 |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 20.1.8  | Steuerung automatischer Lagersysteme . . . . .                        | 478        |
| 20.1.9  | Betrieb von Lagersystemen . . . . .                                   | 480        |
| 20.2  | Schüttgut-Systemtechnik . . . . .                                     | 482        |
| 20.2.1  | Übersicht . . . . .   | 482        |
| 20.2.2  | Schüttgutlager . . . . .  | 482        |
|   | Literatur . . . . .   | 482        |
| <b>21</b>   | <b>Automatisierung in der Materialflusstechnik . . . . .</b>          | <b>485</b> |
|   | Ludger Overmeyer  |            |
| 21.1  | Materialflussteuerungen . . . . .                                     | 485        |
| 21.2  | Sensorik . . . . .  | 485        |
| 21.3  | Aktuatoren . . . . .  | 485        |
| 21.4  | Identifikationssysteme . . . . .                                      | 486        |
| 21.4.1  | Identifikation durch Personen und Geräte . . . . .                    | 486        |
| 21.4.2  | Optische Datenerfassung und -übertragung . . . . .                    | 487        |
| 21.4.3  | Elektronische Datenerfassung und -übertragung<br>durch RFID . . . . . | 491        |
| 21.4.4  | Magnetische Datenübertragung . . . . .                                | 495        |
| 21.4.5  | Mechanische Datenübertragung . . . . .                                | 495        |
| 21.4.6  | Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten . . . . .                     | 495        |
|   | Literatur . . . . .   | 495        |
| <b>22</b>   | <b>Baumaschinen . . . . .</b>   | <b>497</b> |
|   | Günter Kunze  |            |
| 22.1  | Einteilung und Begriffe . . . . .                                     | 497        |
| 22.2  | Hochbaumaschinen . . . . .  | 497        |
| 22.2.1  | Turmdrehkrane . . . . .   | 497        |
| 22.2.2  | Betonmischanlagen . . . . .   | 497        |
| 22.2.3  | Transportbetonmischer . . . . .                                       | 499        |
| 22.2.4  | Betonpumpen . . . . .   | 499        |
| 22.2.5  | Verteilmasten . . . . .   | 500        |
| 22.3  | Erdbaumaschinen . . . . .   | 502        |
| 22.3.1  | Bagger . . . . .  | 502        |
| 22.3.2  | Schaufellader . . . . .   | 504        |
| 22.3.3  | Planiermaschinen . . . . .  | 507        |
| 22.3.4  | Transportfahrzeuge . . . . .  | 508        |
|   | Literatur . . . . .   | 509        |
| <br><b>Teil IV Grundlagen der Verfahrenstechnik</b> |   |            |
| <b>23</b>   | <b>Einführung . . . . .</b>   | <b>513</b> |
|   | Matthias Bohnet   |            |
|   | Literatur . . . . .   | 514        |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>24</b> | <b>Mechanische Verfahrenstechnik</b> . . . . .                    | 517 |
|           | Arno Kwade und Jörg Schwedes                                      |     |
| 24.1      | Einführung . . . . .  | 517 |
| 24.2      | Zerkleinern . . . . .   | 518 |
| 24.2.1    | Bruchphysik . . . . .   | 518 |
| 24.2.2    | Zerkleinerungsmaschinen . . . . .                                 | 519 |
| 24.3      | Agglomerieren/Granulieren . . . . .                               | 520 |
| 24.3.1    | Bindemechanismen, Agglomeratfestigkeit . . . . .                  | 521 |
| 24.3.2    | Granulationstechnik . . . . .                                     | 521 |
| 24.4      | Trennen . . . . .   | 522 |
| 24.4.1    | Abscheiden von Partikeln aus Gasen . . . . .                      | 523 |
| 24.4.2    | Abscheiden von Feststoffpartikeln<br>aus Flüssigkeiten . . . . .  | 523 |
| 24.4.3    | Klassieren in Gasen . . . . .                                     | 525 |
| 24.5      | Mischen von Feststoffen . . . . .                                 | 526 |
| 24.6      | Lagern . . . . .  | 527 |
| 24.6.1    | Fließverhalten von Schüttgütern . . . . .                         | 527 |
| 24.6.2    | Dimensionierung von Silos . . . . .                               | 527 |
|           | Literatur . . . . .   | 528 |
| <b>25</b> | <b>Thermische Verfahrenstechnik</b> . . . . .                     | 529 |
|           | Stephan Scholl und Alfons Mersmann                                |     |
| 25.1      | Absorbieren, Rektifizieren, Flüssig-flüssig-Extrahieren . . . . . | 529 |
| 25.1.1    | Durchsatz . . . . .   | 531 |
| 25.1.2    | Stofftrennung . . . . .   | 531 |
| 25.2      | Verdampfen und Kristallisieren . . . . .                          | 534 |
| 25.3      | Adsorbieren, Trocknen, Fest-flüssig-Extrahieren . . . . .         | 536 |
| 25.4      | Membrantrennverfahren . . . . .                                   | 539 |
|           | Literatur . . . . .   | 540 |
| <b>26</b> | <b>Chemische Verfahrenstechnik</b> . . . . .                      | 541 |
|           | Andreas Seidel-Morgenstern  |     |
| 26.1      | Einleitung . . . . .  | 541 |
| 26.2      | Stöchiometrie . . . . .   | 541 |
| 26.3      | Chemische Thermodynamik . . . . .                                 | 543 |
| 26.4      | Kinetik chemischer Reaktionen . . . . .                           | 544 |
| 26.5      | Ideale isotherme Reaktoren . . . . .                              | 547 |
| 26.6      | Reale Reaktoren . . . . .   | 549 |
|           | Literatur . . . . .   | 552 |
| <b>27</b> | <b>Mehrphasenströmungen</b> . . . . .                             | 553 |
|           | Matthias Bohnet   |     |
| 27.1      | Einphasenströmung . . . . .                                       | 553 |
| 27.2      | Widerstand fester und fluider Partikel . . . . .                  | 554 |
| 27.3      | Feststoff/Fluidströmung . . . . .                                 | 555 |
| 27.3.1    | Pneumatische Förderung . . . . .                                  | 555 |
| 27.3.2    | Hydraulische Förderung . . . . .                                  | 559 |
| 27.3.3    | Wirbelschicht . . . . .   | 560 |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 27.4      | Gas-/Flüssigkeitsströmung . . . . .  | 562        |
| 27.4.1    | Strömungsform . . . . .  | 562        |
| 27.4.2    | Druckverlust . . . . .   | 562        |
| 27.4.3    | Filmströmung . . . . .   | 563        |
|           | Literatur . . . . .  | 564        |
| <b>28</b> | <b>Bioverfahrenstechnik . . . . .</b>                                      | <b>565</b> |
|           | Rainer Krull, Dietmar Hempel und Thomas Wucherpennig                       |            |
| 28.1      | Mikroorganismen mit technischer Bedeutung . . . . .                        | 565        |
| 28.1.1    | Bakterien . . . . .  | 565        |
| 28.1.2    | Pilze . . . . .  | 566        |
| 28.1.3    | Hefen . . . . .  | 567        |
| 28.1.4    | Algen . . . . .  | 567        |
| 28.1.5    | Viren . . . . .  | 568        |
| 28.1.6    | Pflanzliche und tierische Zellen . . . . .                                 | 568        |
| 28.2      | Kultivierungsbedingungen . . . . .   | 569        |
| 28.2.1    | Wachstumsbedingungen . . . . .   | 569        |
| 28.2.2    | Phänomenologie des Wachstums . . . . .                                     | 571        |
| 28.2.3    | Ablauf technischer Kultivierungen . . . . .                                | 573        |
| 28.2.4    | Prozessbeispiel Produktion monoklonaler<br>Antikörper . . . . .            | 575        |
| 28.3      | Sterilisation . . . . .  | 577        |
| 28.3.1    | Hitzesterilisation . . . . .   | 577        |
| 28.3.2    | Sterilfiltration . . . . .   | 579        |
| 28.4      | Bioreaktoren . . . . .   | 580        |
| 28.4.1    | Oberflächenkultivierung . . . . .  | 580        |
| 28.4.2    | Submerskultivierung . . . . .  | 580        |
| 28.4.3    | Mess- und Regelungstechnik . . . . .                                       | 583        |
| 28.4.4    | Schaumzerstörung . . . . .   | 583        |
| 28.4.5    | Steriler Betrieb . . . . .   | 584        |
| 28.5      | Kinetik enzymatischer Reaktionen . . . . .                                 | 584        |
| 28.5.1    | Katalytische Wirkung der Enzyme . . . . .                                  | 584        |
| 28.5.2    | Michaelis-Menten-Kinetik . . . . .   | 585        |
| 28.5.3    | Transformationen der Michaelis-Menten-<br>Gleichung . . . . .              | 586        |
| 28.5.4    | Einfluss von Temperatur, pH-Wert, Inhibitoren<br>und Aktivatoren . . . . . | 586        |
| 28.6      | Kinetik des mikrobiellen Wachstums . . . . .                               | 588        |
| 28.6.1    | Substratlimitiertes Wachstum . . . . .                                     | 588        |
| 28.6.2    | Wachstumshemmung . . . . .   | 590        |
| 28.6.3    | Wachstum mit Transportlimitierung . . . . .                                | 591        |
| 28.6.4    | Wachstum in kontinuierlicher Kultivierung . . . . .                        | 591        |
| 28.6.5    | <i>Fed Batch</i> -Kultivierung . . . . .                                   | 594        |
| 28.6.6    | Zellerhaltung . . . . .  | 594        |
| 28.6.7    | Filamentöses Wachstum . . . . .  | 595        |
| 28.6.8    | Rheologie von Kultivierungsbrühen . . . . .                                | 598        |
| 28.6.9    | Produktbildungskinetik . . . . .   | 599        |
|           | Literatur . . . . .  | 600        |

**Teil V Thermischer Apparatebau und Industrieöfen**

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>29</b> | <b>Industrieöfen</b> . . . . .                           | 603 |
|           | Eckehard Specht und Friedherz Becker                     |     |
|           | 29.1 Grundlagen . . . . .                                | 603 |
|           | 29.2 Charakterisierung . . . . .                         | 603 |
|           | 29.3 Spezieller Energieverbrauch . . . . .               | 606 |
|           | 29.4 Wärmerückgewinnung durch Luftvorwärmung . . . . .   | 608 |
|           | Literatur . . . . .                                      | 610 |
| <b>30</b> | <b>Drehrohröfen</b> . . . . .                            | 611 |
|           | Eckehard Specht und Friedherz Becker                     |     |
|           | 30.1 Bauarten und Prozesse . . . . .                     | 611 |
|           | 30.1.1 Wirkungsweise . . . . .                           | 611 |
|           | 30.1.2 Materialtransport . . . . .                       | 612 |
|           | 30.1.3 Beheizung . . . . .                               | 613 |
|           | 30.1.4 Drehrohrmantel . . . . .                          | 614 |
|           | 30.1.5 Lagerung und Antrieb . . . . .                    | 614 |
|           | 30.1.6 Ofenköpfe . . . . .                               | 616 |
|           | 30.1.7 Thermische Behandlungsprozesse . . . . .          | 616 |
|           | 30.2 Quertransport . . . . .                             | 616 |
|           | 30.2.1 Arten der Querbewegung . . . . .                  | 616 |
|           | 30.2.2 Rolling Motion . . . . .                          | 617 |
|           | 30.2.3 Segregation . . . . .                             | 618 |
|           | 30.3 Axialtransport . . . . .                            | 618 |
|           | 30.3.1 Betttiefenprofil . . . . .                        | 618 |
|           | 30.3.2 Mittlere Verweilzeit . . . . .                    | 619 |
|           | 30.4 Wärmeübergang . . . . .                             | 619 |
|           | 30.4.1 Gesamtmechanismus . . . . .                       | 619 |
|           | 30.4.2 Direkter Wärmeübergang . . . . .                  | 620 |
|           | 30.4.3 Regenerativer Wärmeübergang . . . . .             | 620 |
|           | 30.4.4 Axiale Temperaturverläufe . . . . .               | 621 |
|           | Literatur . . . . .                                      | 622 |
| <b>31</b> | <b>Schacht-, Kupol- und Hochöfen</b> . . . . .           | 625 |
|           | Eckehard Specht und Friedherz Becker                     |     |
|           | 31.1 Prozesse und Funktionsweisen . . . . .              | 625 |
|           | 31.2 Strömung . . . . .                                  | 626 |
|           | 31.2.1 Druckverlust . . . . .                            | 626 |
|           | 31.2.2 Lückengrad . . . . .                              | 627 |
|           | 31.3 Wärme- und Stoffübertragung . . . . .               | 628 |
|           | 31.4 Axiale Temperatur- und Massenstromprofile . . . . . | 628 |
|           | Literatur . . . . .                                      | 629 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>32</b> | <b>Öfen für geformtes Gut</b> . . . . .                        | 631 |
|           | Eckehard Specht und Friedherz Becker                           |     |
| 32.1      | Betriebsweise . . . . .  | 631 |
| 32.2      | Durchlauföfen . . . . .  | 632 |
| 32.2.1    | Stoßofen . . . . .   | 632 |
| 32.2.2    | Hubbalkenofen . . . . .  | 633 |
| 32.2.3    | Tunnelwagenofen . . . . .                                      | 633 |
| 32.2.4    | Rollenherdofen . . . . .                                       | 634 |
| 32.2.5    | Konstruktive Merkmale . . . . .                                | 637 |
| 32.2.6    | Verfahrenstechnische Merkmale . . . . .                        | 638 |
| 32.3      | Beschreibung von Chargenöfen . . . . .                         | 639 |
| 32.4      | Beheizung . . . . .  | 640 |
| 32.4.1    | Direkte Beheizung . . . . .                                    | 640 |
| 32.4.2    | Indirekte Beheizung . . . . .                                  | 643 |
| 32.4.3    | Elektrobeheizung . . . . .                                     | 643 |
| 32.5      | Wärmeübertragung . . . . .                                     | 646 |
| 32.5.1    | Strahlung in Industrieöfen . . . . .                           | 646 |
| 32.5.2    | Konvektion . . . . .   | 655 |
| 32.5.3    | Wärmeübergang ins Solid . . . . .                              | 657 |
|           | Literatur . . . . .  | 657 |
| <b>33</b> | <b>Feuerfestmaterialien</b> . . . . .                          | 659 |
|           | Eckehard Specht und Friedherz Becker                           |     |
|           | Literatur . . . . .  | 662 |
| <b>34</b> | <b>Wärmeübertrager</b> . . . . .                               | 663 |
|           | Lothar Mörl und Eckehard Specht                                |     |
| 34.1      | Konstante Wärmestromdichte . . . . .                           | 663 |
| 34.2      | Konstante Wandtemperatur . . . . .                             | 664 |
| 34.3      | Wärmeübertragung Fluid Fluid . . . . .                         | 665 |
| 34.3.1    | Temperaturverläufe . . . . .                                   | 665 |
| 34.3.2    | Gleiche Kapazitätsströme (Gegenstrom) . . . . .                | 666 |
| 34.3.3    | Ungleiche Kapazitätsstromverhältnisse . . . . .                | 666 |
| 34.4      | Auslegung von Wärmeübertragern . . . . .                       | 667 |
| 34.5      | Kondensatoren . . . . .  | 668 |
| 34.5.1    | Grundbegriffe der Kondensation . . . . .                       | 668 |
| 34.5.2    | Oberflächenkondensatoren . . . . .                             | 668 |
| 34.5.3    | Luftgekühlte Kondensatoren . . . . .                           | 670 |
|           | Literatur . . . . .  | 671 |
| <b>35</b> | <b>Konstruktionselemente von Apparaten und Rohrleitungen</b> . | 673 |
|           | Lothar Mörl und Horst Gelbe                                    |     |
| 35.1      | Berechnungsgrundlagen . . . . .                                | 673 |
| 35.2      | Zylindrische Mäntel und Rohre unter innerem Überdruck          | 674 |
| 35.3      | Zylindrische Mäntel unter äußerem Überdruck . . . . .          | 675 |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 35.4      | Ebene Böden . . . . .  | 676        |
| 35.4.1    | Wanddicke verschraubter runder ebener Böden<br>ohne Ausschnitt . . . . . | 677        |
| 35.4.2    | Wanddicke ebener Böden mit Ausschnitten . . .                            | 678        |
| 35.5      | Gewölbte Böden . . . . .   | 678        |
| 35.6      | Ausschnitte . . . . .  | 680        |
| 35.6.1    | Spannungsbeanspruchte Querschnitte . . . . .                             | 680        |
| 35.6.2    | Druckbeanspruchte Querschnittsflächen $A_p$ . . .                        | 681        |
| 35.7      | Flanschverbindungen . . . . .  | 682        |
| 35.7.1    | Schrauben . . . . .  | 682        |
| 35.7.2    | Flansche . . . . .   | 684        |
| 35.8      | Rohrleitungen . . . . .  | 687        |
| 35.8.1    | Rohrdurchmesser . . . . .  | 687        |
| 35.8.2    | Strömungsverluste . . . . .  | 688        |
| 35.8.3    | Rohrarten, Normen, Werkstoffe . . . . .                                  | 688        |
| 35.8.4    | Rohrverbindungen . . . . .   | 689        |
| 35.8.5    | Dehnungsausgleicher . . . . .  | 691        |
| 35.8.6    | Rohrhalterungen . . . . .  | 692        |
| 35.9      | Absperr- und Regelorgane . . . . .                                       | 695        |
| 35.9.1    | Allgemeines . . . . .  | 695        |
| 35.9.2    | Ventile . . . . .  | 697        |
| 35.9.3    | Schieber . . . . .   | 698        |
| 35.9.4    | Hähne (Drehschieber) . . . . .   | 699        |
| 35.9.5    | Klappen . . . . .  | 700        |
| 35.10     | Dichtungen . . . . .   | 700        |
| 35.10.1   | Berührungsdichtungen an ruhenden Flächen . . .                           | 700        |
| 35.10.2   | Berührungsdichtungen an gleitenden Flächen . .                           | 702        |
|           | Anhang . . . . .   | 704        |
|           | Literatur . . . . .  | 706        |
| <b>36</b> | <b>Intensivkühlung heißer Metalle mit Flüssigkeiten</b> . . . . .        | <b>709</b> |
|           | Eckehard Specht  |            |
| 36.1      | Phänomenologie . . . . .   | 709        |
| 36.2      | Tauchkühlung . . . . .   | 712        |
| 36.3      | Spritzkühlung . . . . .  | 713        |
| 36.3.1    | Düsenteknik . . . . .  | 713        |
| 36.3.2    | Wärmeübergangsmechanismus . . . . .                                      | 715        |
| 36.3.3    | Filmverdampfung . . . . .  | 715        |
| 36.3.4    | Einfluss der Wassertemperatur . . . . .                                  | 717        |
| 36.4      | Wasserqualität . . . . .   | 717        |
|           | Literatur . . . . .  | 718        |
|           | <b>Literatur zu Teil V Thermischer Apparatebau und Industrieöfen</b> .   | <b>719</b> |

## Teil VI Kälte-, Klima- und Heizungstechnik

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>37</b> | <b>Kältetechnik</b> . . . . .                               | <b>723</b> |
|           | Christian Hainbach  |            |
| 37.1      | Einsatzgebiete . . . . .                                    | 723        |
| 37.2      | Kältetechnische Verfahren . . . . .                         | 724        |
| 37.2.1    | Kaltdampf-Kompressionskälteanlage . . . . .                 | 724        |
| 37.2.2    | Absorptionskälteanlage . . . . .                            | 725        |
| 37.2.3    | Verdunstungskühlverfahren . . . . .                         | 727        |
| 37.3      | Kältetechnische Betriebsstoffe . . . . .                    | 728        |
| 37.3.1    | Kältemittel . . . . .                                       | 728        |
| 37.3.2    | Kältemaschinen-Öle . . . . .                                | 733        |
| 37.3.3    | Kühlsolen . . . . .   | 734        |
| 37.4      | Systeme und Bauteile der kältetechnischen Anlagen . . . . . | 736        |
| 37.4.1    | Kältemittelverdichter . . . . .                             | 736        |
| 37.4.2    | Verdampfer . . . . .  | 739        |
| 37.4.3    | Verflüssiger . . . . .                                      | 740        |
| 37.4.4    | Sonstige Bauteile . . . . .                                 | 740        |
| 37.5      | Direktverdampfer-Anlagen . . . . .                          | 742        |
| 37.5.1    | Verflüssigersätze, Splitgeräte für Klimaanlage . . . . .    | 743        |
| 37.6      | Kaltwassersätze . . . . .                                   | 744        |
| 37.6.1    | Kompressions-Kaltwassersätze . . . . .                      | 744        |
| 37.6.2    | Absorptions-Kaltwassersatz . . . . .                        | 744        |
| 37.7      | Rückkühlwerke . . . . .                                     | 745        |
| 37.7.1    | Kühlwassertemperaturen im Jahresverlauf . . . . .           | 746        |
| 37.7.2    | Wasserbehandlung . . . . .                                  | 747        |
| 37.8      | Freie Kühlung . . . . .                                     | 747        |
| 37.8.1    | Freie Kühlung . . . . .                                     | 747        |
| 37.8.2    | Freie Kühlung durch Solekreislauf . . . . .                 | 748        |
| 37.8.3    | Freie Kühlung durch Kältemittel-Pumpen-System . . . . .     | 748        |
| 37.8.4    | Freie Kühlung durch Rückkühlwerk . . . . .                  | 748        |
| 37.9      | Speichersysteme . . . . .                                   | 749        |
| 37.9.1    | Eisspeichersysteme . . . . .                                | 749        |
| 37.9.2    | Kältespeicherung in eutektischer Lösung . . . . .           | 750        |
| 37.9.3    | Kältespeicherung in Binäreis . . . . .                      | 751        |
| 37.10     | Wärmepumpenanlagen . . . . .                                | 752        |
| 37.10.1   | Wärmequellen . . . . .                                      | 754        |
| 37.10.2   | Kleinwärmepumpen . . . . .                                  | 754        |
| 37.10.3   | Wärmepumpen größerer Leistung . . . . .                     | 755        |
| 37.10.4   | Absorptionswärmepumpen . . . . .                            | 756        |
| 37.10.5   | Wärmepumpensysteme Heizbetrieb . . . . .                    | 757        |
| 37.10.6   | Systeme für gleichzeitigen Kühl- und Heizbetrieb . . . . .  | 758        |
| 37.10.7   | Wärmepumpen in Heizsystemen . . . . .                       | 760        |
|           | Anhang . . . . .  | 761        |
|           | Literatur . . . . .   | 762        |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>38</b> | <b>Klimatechnik</b> . . . . .  | 765 |
|           | Sylvia Schädlich   |     |
| 38.1      | Anforderungen an das Raumklima . . . . .   | 765 |
| 38.1.1    | Raumluftfeuchte . . . . .  | 769 |
| 38.1.2    | Raumluftgeschwindigkeit . . . . .  | 770 |
| 38.1.3    | Schadstoffgehalt . . . . .   | 770 |
| 38.1.4    | Weitere Einflussgrößen . . . . .   | 770 |
| 38.2      | Auslegung von Klimaanlageanlagen . . . . .   | 772 |
| 38.2.1    | Meteorologische Grundlagen . . . . .   | 772 |
| 38.2.2    | Heizlast . . . . .   | 772 |
| 38.2.3    | Kühllast . . . . .   | 775 |
| 38.2.4    | Luft-Volumenstrom . . . . .  | 777 |
| 38.3      | Luftführung und Luftdurchlässe . . . . .   | 777 |
| 38.3.1    | Luftführung . . . . .  | 777 |
| 38.3.2    | Luftdurchlässe . . . . .   | 781 |
| 38.4      | Komponenten von Lüftungs- und Klimaanlageanlagen . . . . .                         | 784 |
| 38.4.1    | Ventilatoren . . . . .   | 785 |
| 38.4.2    | Lufterhitzer, -kühler . . . . .  | 793 |
| 38.4.3    | Luftbefeuchter . . . . .   | 794 |
| 38.4.4    | Wärmerückgewinnung . . . . .   | 797 |
| 38.4.5    | Luft Iter . . . . .  | 801 |
| 38.4.6    | Schalldämpfer . . . . .  | 804 |
| 38.4.7    | Luftkanalsystem . . . . .  | 807 |
| 38.4.8    | Mess- und Regelungstechnik . . . . .   | 808 |
| 38.5      | Lüftungsanlage . . . . .   | 808 |
| 38.5.1    | Einrichtungen zur freien Lüftung . . . . .   | 808 |
| 38.5.2    | Mechanische Lüftungsanlagen . . . . .  | 810 |
| 38.6      | Zentrale Raumlufttechnische Anlagen . . . . .                                      | 810 |
| 38.6.1    | Klassifizierung raumlufttechnischer Systeme . . . . .                              | 810 |
| 38.6.2    | Nur-Luft-Anlagen . . . . .   | 812 |
| 38.6.3    | Luft-Wasser-Anlagen . . . . .  | 814 |
| 38.7      | Dezentrale Klimaanlage . . . . .   | 819 |
| 38.8      | Berücksichtigung von Klimaanlageanlagen nach<br>Energieeinsparverordnung . . . . . | 821 |
| 38.8.1    | Referenzgebäudeverfahren<br>für Nichtwohngebäude . . . . .                         | 821 |
| 38.8.2    | Wartung von Klimaanlageanlagen . . . . .   | 821 |
| 38.8.3    | Energetische Inspektion von Klimaanlageanlagen . . . . .                           | 822 |
| 38.8.4    | Vorgaben für die Planung von Lüftungs- und<br>Klimaanlagen . . . . .               | 822 |
| 38.8.5    | Berücksichtigung von Klimaanlageanlagen<br>in der DIN V 18599 . . . . .            | 823 |
| 38.8.6    | Endenergie für Ventilatoren . . . . .  | 824 |
|           | Literatur . . . . .  | 824 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>39</b> | <b>Systeme und Bauteile der Heizungstechnik</b> . . . . . | 827 |
|           | Christian Hainbach  |     |
| 39.1      | Einzelheizung . . . . .                                   | 827 |
| 39.2      | Zentralheizung . . . . .                                  | 828 |
| 39.2.1    | Systeme . . . . .   | 828 |
| 39.2.2    | Raum-Heizkörper, -Heizflächen . . . . .                   | 829 |
| 39.2.3    | Rohrnetz . . . . .  | 831 |
| 39.2.4    | Armaturen . . . . .                                       | 833 |
| 39.2.5    | Umwälzpumpen . . . . .                                    | 834 |
| 39.2.6    | Wärmeerzeugung . . . . .                                  | 835 |
| 39.2.7    | Heizzentrale . . . . .                                    | 837 |
| 39.2.8    | Wärmeverbrauchsermittlung . . . . .                       | 838 |
|           | Literatur . . . . .                                       | 839 |

## Teil VII Biomedizinische Technik

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>40</b> | <b>Einführung</b> . . . . .   | 845 |
|           | Stephan Klein und Marc Kraft  |     |
|           | Literatur . . . . .   | 846 |
| <b>41</b> | <b>Einteilung von Medizinprodukten</b> . . . . .  | 849 |
|           | Stephan Klein und Marc Kraft  |     |
|           | Literatur . . . . .   | 850 |
| <b>42</b> | <b>Ausgewählte Beispiele wichtiger medizintechnischer Geräte</b>  | 851 |
|           | Stephan Klein, Marc Kraft, Henrik Botterweck, Jürgen Manigel,<br>Martin Ryschka, Harald Hanke, Peter Schouwink und Jochim<br>Koch |     |
| 42.1      | Bildgebung . . . . .  | 851 |
| 42.1.1    | Definition und Aufgabe . . . . .  | 851 |
| 42.1.2    | Modalitäten . . . . .   | 852 |
| 42.1.3    | Trends und Aspekte . . . . .  | 858 |
| 42.2      | Monitoring . . . . .  | 859 |
| 42.2.1    | Patientenmonitoring . . . . .   | 859 |
| 42.2.2    | Maschinenmonitoring . . . . .   | 859 |
| 42.2.3    | Alarmgebung . . . . .   | 859 |
| 42.2.4    | Zentrale Überwachung . . . . .  | 860 |
| 42.2.5    | Gerätetechnik . . . . .   | 860 |
| 42.3      | Beatmung, Inhalationsnarkose . . . . .  | 861 |
| 42.3.1    | Beatmung . . . . .  | 861 |
| 42.3.2    | Inhalationsnarkose . . . . .  | 862 |
| 42.3.3    | Gasdosierung . . . . .  | 862 |
| 42.3.4    | Narkosemitteldosierung . . . . .  | 863 |
| 42.3.5    | Kreissystem . . . . .   | 863 |
| 42.3.6    | CO <sub>2</sub> -Absorber . . . . .   | 864 |
| 42.3.7    | Ventilator . . . . .  | 864 |
| 42.3.8    | Gas-, Druck- und Flussmessung . . . . .   | 865 |

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 42.4  | Therapie von Herzrhythmusstörungen . . . . .  | 865        |
| 42.5  | Blutreinigung (Dialyse) . . . . .   | 867        |
| 42.6  | Pumpen für Infusionen und Herzunterstützung . . . . .                                   | 870        |
| 42.6.1  | Herzunterstützungssysteme . . . . .   | 872        |
| 42.7  | Minimal-invasive Technologien . . . . .   | 873        |
| 42.7.1  | Endoskopische Techniken . . . . .   | 873        |
| 42.7.2  | Endoskope . . . . .   | 874        |
| 42.7.3  | Interventionelle Kardiologie . . . . .  | 876        |
| 42.8  | Orthopädische Implantate . . . . .  | 877        |
| 42.9  | Gliedmaßenprothetik (Exoprothetik der Extremitäten) . .                                 | 880        |
| 42.10   | Wärmetherapiegeräte für Früh- und Neugeborene . . . . .                                 | 883        |
|   | Literatur . . . . .   | 885        |
| <b>43</b>                                       | <b>Entwicklung und Marktzugang von Medizinprodukten</b> . . .                           | <b>887</b> |
|   | Stephan Klein, Marc Kraft und Folker Spitzenberger                                      |            |
|   | Literatur . . . . .   | 891        |
| <b>44</b>                                       | <b>Aufbereitung</b> . . . . .   | <b>893</b> |
|   | Marc Kraft  |            |
|   | Literatur . . . . .   | 893        |
| <b>45</b>                                       | <b>Telemedizin</b> . . . . .  | <b>895</b> |
|   | Marc Kraft  |            |
|   | Literatur . . . . .   | 896        |
| <b>46</b>                                       | <b>Physiologische Regelkreise</b> . . . . .   | <b>897</b> |
|   | Philipp Rostalski   |            |
|   | Literatur . . . . .   | 899        |
|   | <b>Literatur zu Teil VII Biomedizinische Technik</b> . . . . .                          | <b>901</b> |
| <br>  |   |            |
| <b>Teil VIII Energietechnik und -wirtschaft</b> |   |            |
| <b>47</b>                                       | <b>Grundsätze der Energieversorgung</b> . . . . .                                       | <b>905</b> |
|   | Hermann-Josef Wagner, Hendrik Hasenclever und Kathrin Hoffmann                          |            |
| 47.1  | Planung und Investitionen . . . . .   | 907        |
| 47.2  | Elektrizitätswirtschaft . . . . .   | 908        |
| 47.3  | Gaswirtschaft . . . . .   | 913        |
| 47.4  | Fernwärmewirtschaft . . . . .   | 915        |
|   | Literatur . . . . .   | 916        |
| <b>48</b>                                       | <b>Primärenergien</b> . . . . .   | <b>917</b> |
|   | Hermann-Josef Wagner, Christian Brat sch, Hendrik Hasencle-<br>ver und Kathrin Hoffmann |            |
| 48.1  | Definitionen . . . . .  | 917        |
| 48.2  | Feste Brennstoffe . . . . .   | 917        |
| 48.2.1  | Natürliche feste Brennstoffe . . . . .  | 917        |
| 48.2.2  | Künstliche feste Brennstoffe . . . . .  | 918        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 48.2.3    | Abfallbrennstoffe . . . . .   | 918        |
| 48.2.4    | Eigenschaften . . . . .   | 919        |
| 48.2.5    | Mineralische Bestandteile . . . . .   | 920        |
| 48.3      | Flüssige Brennstoffe . . . . .  | 921        |
| 48.3.1    | Zusammensetzung . . . . .   | 921        |
| 48.3.2    | Natürliche flüssige Brennstoffe . . . . .   | 921        |
| 48.3.3    | Künstliche flüssige Brennstoffe . . . . .   | 922        |
| 48.3.4    | Abfallbrennstoffe . . . . .   | 923        |
| 48.3.5    | Eigenschaften . . . . .   | 923        |
| 48.4      | Gasförmige Brennstoffe oder Brenngase . . . . .   | 925        |
| 48.4.1    | Natürliche Brenngase . . . . .  | 925        |
| 48.4.2    | Künstliche Brenngase . . . . .  | 926        |
| 48.4.3    | Abfallbrenngase . . . . .   | 926        |
| 48.4.4    | Eigenschaften . . . . .   | 926        |
| 48.5      | Kernbrennstoffe . . . . .   | 927        |
| 48.5.1    | Brutprozess . . . . .   | 929        |
| 48.5.2    | Brennstoffkreislauf . . . . .   | 930        |
| 48.5.3    | Endlagerung radioaktiver Abfälle . . . . .  | 931        |
| 48.6      | Regenerative Energien . . . . .   | 932        |
| 48.6.1    | Wasserenergie . . . . .   | 932        |
| 48.6.2    | Windenergie . . . . .   | 933        |
| 48.6.3    | Solarenergie . . . . .  | 934        |
| 48.6.4    | Geothermische Energie . . . . .   | 935        |
| 48.6.5    | Biogas . . . . .  | 936        |
| 48.6.6    | Biomasse . . . . .  | 936        |
|           | Anhang . . . . .  | 938        |
|           | Literatur . . . . .   | 941        |
| <b>49</b> | <b>Wandlung von Primärenergie in Nutzenergie . . . . .</b>                              | <b>943</b> |
|           | Hermann-Josef Wagner, Christian Brat sch, Hendrik Hasencle-<br>ver und Kathrin Hoffmann |            |
| 49.1      | Fossile Brennstoffe . . . . .   | 943        |
| 49.1.1    | Wärme­kraftwerke . . . . .  | 943        |
| 49.1.2    | Kombi-Kraftwerke . . . . .  | 950        |
| 49.1.3    | Brennstoffzelle . . . . .   | 952        |
| 49.2      | Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .  | 952        |
| 49.2.1    | KWK-Anlagen mit Verbrennungsmotoren . . . . .   | 953        |
| 49.2.2    | KWK-Anlagen mit Gasturbinen . . . . .   | 954        |
| 49.2.3    | KWK-Anlagen mit Dampfturbinen . . . . .   | 954        |
| 49.2.4    | Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen . . . . .  | 955        |
| 49.2.5    | Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz . . . . .   | 956        |
| 49.3      | Strom-/Wärmeerzeugung mit regenerativen Energien . . . . .                              | 956        |
| 49.3.1    | Wasserkraftanlagen (s. Abschn. 48.6) . . . . .  | 956        |
| 49.3.2    | Windkraftanlagen . . . . .  | 958        |
| 49.3.3    | Anlagen zur Nutzung der Sonnenenergie . . . . .   | 960        |
| 49.3.4    | Wärmepumpen . . . . .   | 965        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 49.4      | Kernkraftwerke . . . . .   | 966        |
| 49.4.1    | Bauteile des Reaktors und Reaktorgebäude . . .                                     | 967        |
| 49.4.2    | Sicherheitstechnik von Kernreaktoren . . . . .                                     | 968        |
| 49.4.3    | Leistungsregelung bei Kernreaktoren . . . . .                                      | 970        |
| 49.4.4    | Bauarten von Kernreaktoren . . . . .   | 970        |
| 49.5      | Umweltschutztechnologien . . . . .   | 974        |
| 49.5.1    | Rauchgasentstaubung . . . . .  | 974        |
| 49.5.2    | Rauchgasentschwefelung . . . . .   | 974        |
| 49.5.3    | Rauchgasentstickung . . . . .  | 976        |
| 49.5.4    | Kohlendioxidabscheidung . . . . .  | 977        |
| 49.5.5    | Entsorgung der Kraftwerksnebenprodukte . . . .                                     | 977        |
|           | Literatur . . . . .  | 978        |
| <b>50</b> | <b>Verteilen und Speicherung von Nutzenergie . . . . .</b>                         | <b>981</b> |
|           | Hermann-Josef Wagner, Hendrik Hasenclever und Kathrin Hoffmann                     |            |
| 50.1      | Energietransport . . . . .   | 981        |
| 50.1.1    | Mineralöltransporte . . . . .  | 981        |
| 50.1.2    | Erdgastransporte . . . . .   | 982        |
| 50.1.3    | Elektrische Verbundnetze . . . . .   | 983        |
| 50.1.4    | Fernwärmetransporte . . . . .  | 985        |
| 50.2      | Energiespeicherung . . . . .   | 985        |
| 50.2.1    | Pumpspeicherwerke . . . . .  | 986        |
| 50.2.2    | Druckluftspeicherwerke . . . . .   | 987        |
| 50.2.3    | Dampfspeicherung . . . . .   | 988        |
| 50.2.4    | Elektrische Speicher . . . . .   | 988        |
|           | Literatur . . . . .  | 990        |
| <b>51</b> | <b>Feuerungen . . . . .</b>  | <b>993</b> |
|           | Klaus Görner   |            |
| 51.1      | Technische Feuerungen . . . . .  | 993        |
| 51.1.1    | Feuerung in einem Dampferzeuger . . . . .  | 993        |
| 51.1.2    | Einteilung von Feuerungen für gasförmige, flüssige und feste Brennstoffe . . . . . | 993        |
| 51.2      | Verbrennung . . . . .  | 994        |
| 51.2.1    | Verbrennungsvorgang . . . . .  | 994        |
| 51.2.2    | Kennzahlen . . . . .   | 995        |
| 51.2.3    | Emissionsgrenzwerte . . . . .  | 997        |
| 51.3      | Feuerungen für gasförmige Brennstoffe . . . . .                                    | 998        |
| 51.3.1    | Verbrennung und Brennereinteilung . . . . .  | 998        |
| 51.3.2    | Brennerbauarten . . . . .  | 998        |
| 51.4      | Feuerungen für flüssige Brennstoffe . . . . .                                      | 999        |
| 51.4.1    | Besondere Eigenschaften . . . . .  | 999        |
| 51.4.2    | Brenner . . . . .  | 999        |
| 51.4.3    | Gesamtanlage . . . . .   | 1000       |

|           |   |             |
|-----------|---|-------------|
| 51.5      | Feuerungen für feste Brennstoffe . . . . .          | 1001        |
| 51.5.1    | Kohlenstaubfeuerung . . . . .                       | 1001        |
| 51.5.2    | Wirbelschichtfeuerung . . . . .                     | 1009        |
| 51.5.3    | Rostfeuerungen . . . . .                            | 1011        |
| 51.6      | Allgemeines Feuerungszubehör . . . . .              | 1016        |
| 51.6.1    | Gebläse . . . . .                                   | 1016        |
| 51.6.2    | Schornstein . . . . .                               | 1016        |
|           | Literatur . . . . .                                 | 1017        |
| <b>52</b> | <b>Dampferzeuger</b> . . . . .                      | <b>1019</b> |
|           | Gerd Oeljeklaus                                     |             |
| 52.1      | Angaben zum System . . . . .                        | 1019        |
| 52.1.1    | Entwicklungsstufen . . . . .                        | 1019        |
| 52.1.2    | Dampferzeugersysteme . . . . .                      | 1019        |
| 52.1.3    | Drücke . . . . .                                    | 1020        |
| 52.1.4    | Temperaturen . . . . .                              | 1020        |
| 52.1.5    | Dampfleistungen . . . . .                           | 1021        |
| 52.1.6    | Sicherheit . . . . .                                | 1021        |
| 52.2      | Ausgeführte Dampferzeuger . . . . .                 | 1021        |
| 52.2.1    | Großwasserraumkessel . . . . .                      | 1021        |
| 52.2.2    | Naturumlaufkessel für fossile Brennstoffe . . . . . | 1021        |
| 52.2.3    | Zwanglaufkessel für fossile Brennstoffe . . . . .   | 1023        |
| 52.3      | Bauelemente von Dampferzeugern . . . . .            | 1026        |
| 52.3.1    | Verdampfer . . . . .                                | 1026        |
| 52.3.2    | Überhitzer und Zwischenüberhitzer . . . . .         | 1026        |
| 52.3.3    | Speisewasservorwärmer (Eco) . . . . .               | 1028        |
| 52.3.4    | Luftvorwärmer (Luvo) . . . . .                      | 1028        |
| 52.3.5    | Speisewasseraufbereitung . . . . .                  | 1029        |
| 52.4      | Wärmetechnische Berechnung . . . . .                | 1030        |
| 52.4.1    | Energiebilanz und Wirkungsgrad . . . . .            | 1030        |
| 52.4.2    | Ermittlung der Heizfläche . . . . .                 | 1031        |
| 52.4.3    | Strömungswiderstände . . . . .                      | 1032        |
| 52.4.4    | Festigkeitsberechnung . . . . .                     | 1032        |
|           | Literatur . . . . .                                 | 1032        |

## Teil IX Fahrzeugtechnik

|           |  |             |
|-----------|--|-------------|
| <b>53</b> | <b>Kraftfahrzeugtechnik</b> . . . . .    | <b>1037</b> |
|           | Volker Schindler und Steffen Müller      |             |
| 53.1      | Definition von Kraftfahrzeugen . . . . . | 1037        |
| 53.2      | Bedeutung von Kraftfahrzeugen . . . . .  | 1039        |
| 53.3      | Karosserie . . . . .                     | 1041        |
| 53.4      | Fahrwerk . . . . .                       | 1045        |
| 53.4.1    | Räder . . . . .                          | 1046        |
| 53.4.2    | Radführungen . . . . .                   | 1049        |
| 53.4.3    | Federung und Dämpfung . . . . .          | 1050        |
| 53.4.4    | Lenkung . . . . .                        | 1051        |



# HIER ZÄHLT DAS WIR.

## **Erfahrung. Wissen. Fortschritt.**

Flüge ins All, weltweite Beförderung von Menschen und internationaler Transport von Gütern, Hochtechnologie im Maschinenbau, die Prägung großer Städte durch moderne Architektur...

... überall dort ist OTTO FUCHS mit Ideen, Produkten und Lösungen vertreten.

## **WERDEN SIE TEIL DAVON!**

### **Ihre Zukunft bei OTTO FUCHS.**

Im Rahmen Ihrer Ausbildung, eines Praktikums, Ihrer Abschlussarbeit oder als Berufseinsteiger/-in arbeiten Sie selbstständig an spannenden Projekten und übernehmen früh Verantwortung in Ihren Einsatzbereichen.

### **Neugierig geworden?**

Dann bewerben Sie sich jetzt ausschließlich online unter:

**[OTTO-FUCHS.COM/JOBS](https://otto-fuchs.com/jobs).**

**OTTO FUCHS KG**  
Derschlagler Straße 26  
58540 Meinerzhagen



**OTTO FUCHS**



|           |   |             |
|-----------|---|-------------|
| 53.5      | Antrieb und Bremsen . . . . .                               | 1053        |
| 53.5.1    | Bremsen . . . . .   | 1053        |
| 53.5.2    | Fahrdynamikregelsysteme . . . . .                           | 1054        |
| 53.5.3    | Energiewandlung . . . . .                                   | 1058        |
| 53.5.4    | Kupplung und Kennungswandler . . . . .                      | 1064        |
| 53.5.5    | Achsgetriebe . . . . .                                      | 1067        |
| 53.6      | Ausstattungen . . . . .                                     | 1067        |
| 53.6.1    | Verglasung, Scheibenwischer . . . . .                       | 1068        |
| 53.6.2    | Sitzanlage, Bedienelemente, Anzeigen . . . . .              | 1068        |
| 53.6.3    | Heizung und Klimatisierung . . . . .                        | 1069        |
| 53.6.4    | Systeme für den Insassenschutz . . . . .                    | 1069        |
| 53.6.5    | Licht und Beleuchtung . . . . .                             | 1070        |
| 53.6.6    | Fahrerassistenzsysteme . . . . .                            | 1071        |
| 53.6.7    | Automatisiertes Fahren . . . . .                            | 1072        |
| 53.7      | Elektrische Infrastruktur . . . . .                         | 1073        |
| 53.8      | Eigenschaften des Gesamtfahrzeugs . . . . .                 | 1076        |
| 53.8.1    | Package, Ergonomie, Mensch-Maschine-<br>Interface . . . . . | 1076        |
| 53.8.2    | Fahrdynamik . . . . .                                       | 1077        |
| 53.8.3    | Aerodynamik . . . . .                                       | 1081        |
| 53.8.4    | Verbrauch und CO <sub>2</sub> -Emission . . . . .           | 1081        |
| 53.8.5    | Abgasverhalten . . . . .                                    | 1083        |
| 53.8.6    | Geräusch . . . . .  | 1083        |
| 53.8.7    | Fahrzeugsicherheit . . . . .                                | 1083        |
| 53.8.8    | Betriebsfestigkeit . . . . .                                | 1084        |
| 53.9      | Typgenehmigung . . . . .                                    | 1085        |
| 53.10     | Entwicklungsprozesse und -methoden . . . . .                | 1085        |
|           | Literatur . . . . .   | 1086        |
| <b>54</b> | <b>Schienefahrzeuge . . . . .</b>                           | <b>1089</b> |
|           | Markus Hecht, Oldrich Polach und Ulrich Kleemann            |             |
| 54.1      | Grundsätzliche Randbedingungen . . . . .                    | 1089        |
| 54.1.1    | Fahrzeugbegrenzungspro 1 . . . . .                          | 1090        |
| 54.1.2    | Fahrgastwechselzeiten . . . . .                             | 1091        |
| 54.1.3    | Lebenszykluskosten LCC . . . . .                            | 1091        |
| 54.2      | Fahrwerke . . . . .   | 1092        |
| 54.2.1    | Grundbegriffe der Spurführungstechnik . . . . .             | 1092        |
| 54.2.2    | Radbauarten . . . . .                                       | 1094        |
| 54.2.3    | Radsatz . . . . .   | 1094        |
| 54.2.4    | Rad-Schiene-Kontakt . . . . .                               | 1095        |
| 54.2.5    | Fahrwerkskonstruktionen . . . . .                           | 1098        |
| 54.2.6    | Neigetechnik . . . . .                                      | 1102        |
| 54.3      | Aufbau, Fahrzeugarten . . . . .                             | 1103        |
| 54.3.1    | Rohbau . . . . .  | 1104        |
| 54.3.2    | Klimaanlage . . . . .                                       | 1104        |
| 54.3.3    | Türen . . . . .   | 1105        |
| 54.3.4    | Fenster . . . . .   | 1106        |
| 54.3.5    | Führerräume . . . . .                                       | 1106        |

|           |   |             |
|-----------|---|-------------|
| 54.3.6    | Zug-Stoßeinrichtungen . . . . .                                     | 1109        |
| 54.3.7    | Fahrzeugarten . . . . .   | 1113        |
| 54.4      | Antriebe . . . . .  | 1116        |
| 54.4.1    | Fahrwiderstand . . . . .  | 1116        |
| 54.4.2    | Konstruktionen . . . . .  | 1116        |
| 54.5      | Elektrische/Elektronische Ausrüstung/Diagnose . . . . .             | 1117        |
| 54.5.1    | Leistungselektrik . . . . .   | 1117        |
| 54.5.2    | Diagnosetechnik . . . . .   | 1119        |
| 54.6      | Sicherheitstechnik . . . . .  | 1120        |
| 54.6.1    | Aktive Sicherheitstechnik/Bremse,<br>Bremsbauarten . . . . .        | 1120        |
| 54.6.2    | Passive Sicherheit . . . . .  | 1125        |
| 54.7      | Entwicklungsmethodik . . . . .                                      | 1126        |
| 54.7.1    | Modelle . . . . .   | 1128        |
| 54.7.2    | Fahrkomfort . . . . .   | 1129        |
| 54.7.3    | Rad-Schiene-Kräfte . . . . .  | 1129        |
| 54.8      | Zuverlässigkeitsprüfung . . . . .                                   | 1130        |
|           | Literatur . . . . .   | 1131        |
| <b>55</b> | <b>Luftfahrzeuge . . . . .</b>                                      | <b>1135</b> |
|           | Rudolf Voit-Nitschmann und Thomas Keilig                            |             |
| 55.1      | Allgemeines . . . . .   | 1135        |
| 55.1.1    | Luftverkehr . . . . .   | 1135        |
| 55.1.2    | Anforderungen an den Luftverkehr und an<br>Luftfahrzeuge . . . . .  | 1136        |
| 55.1.3    | Einordnung und Konstruktionsgruppen<br>von Luftfahrzeugen . . . . . | 1137        |
| 55.1.4    | Einordnung von Luftfahrzeugen nach<br>Vorschriften . . . . .        | 1139        |
| 55.2      | Definitionen . . . . .  | 1142        |
| 55.2.1    | Die internationale Standardatmosphäre (ISA) . . . . .               | 1142        |
| 55.2.2    | Achsenkreuze . . . . .  | 1144        |
| 55.2.3    | Winkel . . . . .  | 1144        |
| 55.2.4    | Gewichte . . . . .  | 1145        |
| 55.2.5    | Fluggeschwindigkeiten . . . . .                                     | 1145        |
| 55.2.6    | Geometrische Beschreibung des Luftfahrzeuges . . . . .              | 1147        |
| 55.2.7    | Kräfte und Winkel im Flug . . . . .                                 | 1151        |
| 55.2.8    | Flugsteuerung . . . . .   | 1152        |
| 55.2.9    | Flugstabilitäten . . . . .  | 1153        |
| 55.3      | Grundlagen der Flugphysik . . . . .                                 | 1154        |
| 55.3.1    | Einführung . . . . .  | 1154        |
| 55.3.2    | Flugzeugpolare . . . . .  | 1157        |
| 55.3.3    | Flugleistungen . . . . .  | 1158        |
| 55.4      | Zelle, Struktur . . . . .   | 1170        |
| 55.4.1    | Konstruktionsphilosophien und -prinzipien . . . . .                 | 1170        |
| 55.4.2    | Lasten, Lastannahmen . . . . .                                      | 1171        |
| 55.4.3    | Leichtbau . . . . .   | 1173        |
| 55.4.4    | Werkstoffe und Bauweisen . . . . .                                  | 1175        |

---

|   |             |
|---|-------------|
| 55.4.5 Rumpf . . . . .                      | 1178        |
| 55.4.6 Tragflügel . . . . .                 | 1180        |
| 55.4.7 Wartung und Instandhaltung . . . . . | 1184        |
| Literatur . . . . .                         | 1185        |
| <b>Fachausdrücke . . . . .</b>              | <b>1189</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>       | <b>1265</b> |

---

# Verzeichnis der Herausgeber und Autoren

---

## Über die Herausgeber



**Professor Dr.-Ing. Beate Bender** 1987 2000 Studium des Maschinenbaus und Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Maschinenkonstruktion Konstruktionstechnik an der TU Berlin, bis zu dessen Tod 1998 unter der Leitung von Prof. Beitz. 2001 Promotion an der TU München, 2001 bis 2013 bei Bombardier Transportation Bahntechnologie im Angebotsmanagement, Engineering, Projektleitung und Produktmanagement. Seit 2013 Leiterin des Lehrstuhls für Produktentwicklung an der Ruhr-Universität Bochum. Herausgeberin des DUBBEL, Taschenbuch für den Maschinenbau (ab 25. Auflage), des Pahl/Beitz Konstruktionslehre (ab 9. Auflage), Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP).



**Professor Dr.-Ing. Dietmar Göhlich** 1979 1985 Studium an der TU Berlin, 1985 1989 Promotion am Georgia Institute of Technology in den U.S.A., 1989 bis 2010 in leitender Funktion in der Pkw-Entwicklung der Daimler AG u. a. in der Gesamtfahrzeugkonstruktion Smart und S-Klasse. Seit 2010 Leiter des Fachgebiets Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik und Geschäftsführender Direktor des Instituts für Maschinenkonstruktion und Systemtechnik an der Technischen Universität Berlin. Herausgeber des DUBBEL, Taschenbuch für den Maschinenbau (ab 25. Auflage). Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP), Sprecher des BMBF Forschungscampus Mobility2Grid, Mitglied in der acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

## Autorenverzeichnis



**Professor Reiner Anderl**, geb. 1955, wurde 1984 an der Universität (TH) Karlsruhe promoviert, war in der mittelständigen Industrie (Anlagenbau) tätig und habilitierte sich 1991. Seit 1993 ist er Professor für Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) an der Technischen Universität Darmstadt. Seit April 2004 war er auch Adjunct Professor an der Universität Virginia Tech (Blacksburg, USA) und seit 2006 Gastprofessor bei UNIMEP (Piracicaba, Brasilien). Von 2005 bis 2010 war er Vizepräsident der Technischen Universität Darmstadt. Seine fachlichen Schwerpunkte liegen in der Produktdatentechnologie und umfassen die Informationsmodellierung, die virtuelle und kooperative Produktentwicklung, die Integration von Design und Engineering sowie die Digitale Fabrik im Rahmen der Forschungsinitiative Industrie 4.0. Außerdem ist Prof. Anderl seit Juli 2017 Präsident der Akademie der Wissenschaften und der Literatur sowie ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie für Technikwissenschaften (acatech).



**Rüdiger Bähr**, geb. 1957, absolvierte eine Lehre als Maschinenbauer in einem Schwermaschinenbau-Großbetrieb in Magdeburg und studierte von 1977 bis 1982 Gießereitechnik an der Nationalen Ostukrainischen Universität (vormals WMI) in Lugansk, Ukraine. Er promovierte 1987 und habilitierte sich im Jahr 1993. Seit 2003 leitet er als apl. Professor den Bereich für Ur- und Umformtechnik an der Universität Magdeburg. Seine fachlichen Schwerpunkte liegen auf den Gebieten Kokillengießen hochbeanspruchter Bauteile für den Automobilbau und der Verfahrensentwicklung.



**Dirk Bartel** 1989 bis 1994 Studium des Maschinenbaus (Fachrichtung Antriebstechnik) an der Technischen Universität Magdeburg, 2000 Promotion, 2009 Habilitation, 2014 Ernennung zum außerplanmäßigen Professor, seit 2016 Geschäftsführender Leiter des Institutes für Kompetenz in AutoMobilität (IKAM) und des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Tribologie der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, seit 2018 Geschäftsführer der Tribo Technologies GmbH, Mitglied in der GfT und im VDI sowie in mehreren

Programmausschüssen nationaler und internationaler Tagungen.



**Stephan Bartelmei** Studium des allg. Maschinenbaus an der Universität Hannover, Diplom 1988; danach Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Konstruktionstechnik I der TU Hamburg-Harburg; Promotion 1992. Im Anschluss bis 1994 Oberingenieur am gleichen Arbeitsbereich; Industrietätigkeit bis 2000 als Konstruktionsleiter bei dem Baumaschinenhersteller Karl Schaeff GmbH. Ab 2000 Professor für Fahrzeugsystemtechnik, Konstruktionstechnik und Hydraulik an der Jadehochschule in Wilhelmshaven. Zwischenzeitlich Geschäftsführer der N-Transfer GmbH mit der Niedersächsischen Patentverwertungsgesellschaft.

**Gregor Beckmann** Technische Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland



**Michael Bongards** 1972 1982 Studium und Promotion in Chemietechnik an der Universität Dortmund; danach neun Jahre Tätigkeit in der Softwareentwicklung und Automatisierungstechnik als Geschäftsführender Gesellschafter und Technischer Leiter; von 1991 bis 2020 Professor an der TH Köln Campus Gummersbach; Nationale und europäische Forschungsprojekte im Bereich der Datenanalyse und Automatisierung für die Umwelttechnik und den Einsatz regenerativer Energien.



**Professor Christian Brecher**, geboren am 25.08.1969, war von 1995 bis 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur der Abt. Maschinentechnik am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen und promovierte dort an der Fakultät für Maschinenwesen. Nach ca. 3-jähriger Tätigkeit in der Werkzeugmaschinenindustrie wurde er im Januar 2004 zum Universitätsprofessor für das Fach Werkzeugmaschinen der RWTH Aachen und Mitglied des Direktoriums von WZL und IPT (Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie) ernannt. Zu seinen Schwerpunkten gehören Maschinen-, Getriebe- und Steuerungstechnik. Seit 2010 leitet Prof. Brecher darüber hinaus als Gründungsmitglied

gemeinsam mit Prof. Hopmann das Aachener Zentrum für Leichtbau AZL. Seit 2018 ist Prof. Brecher Institutsleiter des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnologie IPT in Aachen.

**Jens Brimmers** Aachen, Deutschland



**Stephanus Büttgenbach** Studium der Physik an der Universität Bonn, Promotion 1973, Habilitation 1980, Wissenschaftlicher Assistent und Professor an der Universität Bonn bis 1985, Tätigkeit als Abteilungs- und Institutsleiter bei der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung, Stuttgart und Villingen-Schwenningen (1985 1991), Professor für Mikrotechnik an der TU Braunschweig und Leiter des Instituts für Mikrotechnik (1991 2011). Inhaber einer Niedersachsen-Professur Forschung 65+ an der TU Braunschweig (2011 2015). Arbeitsgebiete: Konstruktion, Fertigung und Anwendung mikrotechnischer Komponenten und Systeme.



**Luigi Colani**†, geboren 1928 in Berlin, begann seine außergewöhnliche Karriere als Designer in Paris der frühen 50er Jahre zunächst im Bereich des Automobildesigns. Nach Studien der Aerodynamik an der Sorbonne und einem Aufenthalt in Amerika beim Flugzeughersteller McDonnell Douglas, wo er im Bereich neuer Werkstoffe tätig war, entwickelte er 1953 bei SIMCA die erste Vollkunststoffkarosserie. 1955 kehrt Colani mit großen Visionen und international gesammelten Erfahrungen in seine Heimatstadt Berlin zurück, wo er unter anderem für die Nobelkarosseriehersteller Erdmann & Rossi und Rometsch preisgekrönte Karosserieentwürfe realisierte. Colani wurde bald zu einem weltbekannten Popstar des Design. Luigi Colani ist Professor für Gestaltungslehre (Design) an der Hochschule der Künste, Bremen, der Baumann Universität, Moskau und den folgenden Universitäten in China: Qinghua, Beijing; Tongji, Shanghai; Qingdao, Qingdao; Kunstakademie, Nanjing.



**Burkhard Joachim Corves** Nach Abschluss seines Maschinenbaustudiums wurde Herr Corves 1989 an der RWTH Aachen zum Dr.-Ing. promoviert. Nach Industrietätigkeit im Sondermaschinenbau in Deutschland und der Schweiz wurde er 2000 zum Universitätsprofessor und Direktor des Instituts für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen berufen. Er ist u.a. Vorsitzender des VDI Fachbeirats Maschinenelemente und Getriebetechnik und Mitglied des wiss. Beirats der VDI-GPP sowie Vorsitzender der Member Organization IFToMM Germany. Bis heute fast 450 Veröffentlichungen auf den Gebieten Handhabungstechnik und Robotik, Sondermaschinentechnik, Getriebetechnik, Maschinendynamik und Mechatronik.



**Horst Czichos** ist Honorarprofessor an der Beuth Hochschule für Technik Berlin. Nach praktischer Ausbildung (Werkzeugmacher, Zähl- und Rechenwerke), Studium (Ing.-grad., Dipl.-Phys., Dr.-Ing.) und Industrietätigkeit (Optische Gerätetechnik) war er von 1992 bis 2002 Präsident der BAM sowie von EUROLAB (1999 2003). Für seine Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Tribologie erhielt Professor Czichos 1992 die Ehrendoktorwürde der Universität Leuven. Er ist Autor und Herausgeber mehrerer Bücher, darunter das Springer Handbook of Metrology and Testing (Springer 2011), das Lehrbuch Mechatronik Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme (Springer Vieweg 2019) und das Tribologie-Handbuch (Springer 2020).



**Werner Daum**, geb. 1956, studierte an der Technischen Universität Berlin Elektrotechnik mit Schwerpunkt Messtechnik. Unmittelbar nach dem Studium trat er 1984 in die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ein. Nach der Promotion zum Dr.-Ing. im Jahr 1994 durch die TU Berlin wurde er 1996 zum Direktor und Professor an der BAM ernannt und übernahm die Leitung der Fachgruppe Mess- und Prüftechnik; Sensorik. Seit dieser Zeit beschäftigt er sich vertiefend mit der Entwicklung von werkstoff- und bauteilintegrierter Sensorik, von faseroptischen Sensoren und von Verfahren zur Zustandsüberwachung von Konstruktionen (smart structures) und

Werkstoffen (smart materials). Von 2012 bis zum Eintritt in den Ruhestand Ende 2019 leitete er die Abteilung 8 Zerstörungsfreie Prüfung der BAM.



**Berend Denkena** promovierte 1992 zum Dr.-Ing. an der Universität Hannover mit einer Dissertation zum Verschleißverhalten von Schneidkeramik bei instationärer Belastung. Anschließend arbeitete er 10 Jahre in der Werkzeugmaschinenindustrie, u.a. bei der Hüller Hille GmbH und Gildemeister Drehmaschinen GmbH, zuletzt als Leiter Entwicklung und Konstruktion. Am 01.10. 2001 wurde er zum Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover berufen. Seine Forschungsgebiete sind spanende Fertigungsverfahren, Werkzeugmaschinen und deren Steuerungen sowie Fertigungsplanung und -organisation.



**Ludger Deters** 1970 1975 Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der TU Clausthal, 1976 1983 wissenschaftlicher Mitarbeiter und wissenschaftlicher Assistent an der TU Clausthal, 1983 Promotion, 1983 1994 leitende Positionen in Entwicklung und Konstruktion in der Industrie, 1994 2016 Universitätsprofessor für Maschinenelemente und Tribologie an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, seit 2016 im Ruhestand. Forschungsgebiete: Tribologie, Gleit- und Wälzlager, Rad/Schiene-Kontakt, Reibung und Verschleiß von Verbrennungsmotorkomponenten.



**Peter Dietz**† promovierte 1970 im Maschinenbau an der TU Darmstadt. Nach Industrietätigkeiten in der Pittler AG wurde er 1980 an das Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal berufen. Zu den von ihm vertretenen Forschungsthemen gehören Welle-Nabe-Verbindungen und weitere Verbindungstechniken, Kupplungen, Seiltrommeln und Seile, Druckkamm lager und verfahrenstechnische Maschinen unter besonderen mechanischen, thermischen und chemischen Beanspruchungen. Auf dem Gebiet der Produktentwicklung arbeitete er an Methoden des Requirement Engineering, der Schnittstellenentwicklung im Konstruktionsprozess und Methoden zur Konstruktion lärmarmen Maschinen. Professor Dietz

war von 1996 bis 2000 Rektor seiner Universität, ist Mitglied der Royal Society of Visiting Professors in Engineering und war Mitglied des Akkreditierungsrates. Arbeitsgebiete: Konstruktionselemente, Konstruktionslehre, Maschinenakustik.



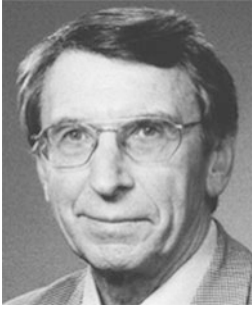
**Andreas Dietzel** Studium der Physik an der Universität Göttingen, Promotion 1989, Tätigkeit in verschiedenen Positionen bei IBM in Sindelfingen und Rueschlikon sowie in Mainz als Abteilungsleiter (1990 2003), Projektleiter bei der Robert Bosch GmbH in Reutlingen (2003 2004), Professor für Micro and Nano Scale Engineering an der TU Eindhoven (2004 2012) und Programmmanager am Holst Center, Eindhoven (2007 2012), seit 2012 Professor für Mikrotechnik an der TU Braunschweig und Leiter des Instituts für Mikrotechnik.

Arbeitsgebiet: Konstruktion, Fertigung und Anwendung mikrotechnischer Komponenten und Systeme.

Aktuelle Schwerpunkte: Laser-Mikrofabrikation, Lab-on-Chip-Systeme für pharmazeutische und medizinische Anwendungen, flexible Mikrosysteme, Design und Simulation von Mikrosystemen.



**Professor Klaus Dilger**, Jahrgang 1962 studierte von 1981 1987 Maschinenwesen/Schwerpunkt Fertigungstechnik an der TU München. 1991 Promotion zum Dr.-Ing., Fügetechnik, danach Oberingenieur am Lehrstuhl für Fügetechnik der TU München. 1991 2004 Geschäftsführer IFF GmbH, 1992 Gründungsgesellschafter CompuVision GmbH, seit 1998 Geschäftsführer der NRW TC-Kleben GmbH, 1997-2002 Universitätsprofessor für Klebtechnik an der RWTH Aachen, seit 2002 Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik an der TU Braunschweig in der Nachfolge von Professor Wohlfahrt.



**Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Lutz Dorn**, geb. 1937 in Mannheim, 1957 Abitur, 1958 63 Studium des Maschinenbaues an der Universität Stuttgart, 1963 67 Forschungstätigkeit an der SLV Mannheim über Elektronenstrahlschweißen, 1969 Promotion TU Hannover, 1967 74 Industrietätigkeiten bei Fa. Steigerwald Strahltechnik, München, Vereinigte Flugtechnische Werke, Bremen, und Messer Griesheim-PECO, München. Professor Dorn war in der Zeit von 1975 bis 2005 ordentlicher Professor für Füge- und Beschichtungstechnik an der TU Berlin. 2005 Emeritierung.



**Jörg Feldhusen** 1989: Promotion zum Dr.-Ing. an der TU-Berlin, 1989 bis 1994: Hauptabteilungsleiter bei der AEG-Westinghouse Transportation Systems, Berlin. 1994 bis 1999 Technischer Leiter der Siemens Transportation System, Light Rail, Erlangen und Düsseldorf; ab 1999: Professor für Konstruktionstechnik und ab 2000: Inhaber des Lehrstuhls und Direktor des Instituts für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus an der RWTH Aachen. 2003 bis 2016. Seit 2016 hauptamtlicher Dekan der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH University. Mitherausgeber des DUBBEL Taschenbuch für den Maschinenbau ; Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WIGEP); Träger des Ehrenrings des VDI.



**Dierk Götz Feldmann** Studium des Maschinenbaus an der TH Hannover, Diplom 1967; wissenschaftl. Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und hydraulische Strömungsmaschinen, Promotion 1971 mit dem Thema Dynamik von Hydrotrieben .

1972 bis 1981 Leiter Konstruktion und Entwicklung bei den Hydraulikherstellern Sauer & Sohn und Sauer Getriebe (heute Danfoss). Von 1982 bis 2005 Universitätsprofessor für Produktentwicklung und Konstruktion an der TU Hamburg.

Forschungsgebiete: Methoden und Werkzeuge der Produktentwicklung und Fluidische Antriebstechnik (Hydrostatik). Mitglied der Wiss. Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) und der

Fluid Power Centers of Europe (FPCE). Vorsitzender der Stiftung Joh. und Ella Hinsch.

**Marcel Fey** Aachen, Deutschland

**Uwe Füssel** Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

**Hans-Jürgen Gevatter**† Professor Gevatter absolvierte ein Studium des Maschinenbaus und Elektrotechnik an der TU Braunschweig. Nach der Promotion war er als Entwicklungsingenieur tätig, dann als Technischer Geschäftsführer in der Industrie. Nach einer Honorarprofessur für das Lehrgebiet Bauelemente der Regelungs- und Steuerungstechnik der TU Braunschweig folgte 1985 die Berufung an die TU Berlin, Lehre und Forschung auf den Gebieten der Geräteelektronik, der Sensortechnik und der Mikrosystemtechnik.



**Professor Dr.-Ing. Ulrich Grünhaupt** war nach dem Studium der Nachrichtentechnik an der TU Berlin wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Institut für Feinwerktechnik. Promotion über Laser-Messtechnik in hochdynamischen Servosystemen. Industrietätigkeit bei der Robert Bosch GmbH in der Entwicklung Breitbandkommunikation, als Projektleiter für optische Übertragungskomponenten und als Produktmanager für optische Übertragungssysteme. 1995 Berufung an die Hochschule Karlsruhe auf das Lehrgebiet Elektronik mit Schwerpunkt Optoelektronik und seit 2010 dort Dekan der Fakultät Elektro- und Informationstechnik.



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Gust** ist u. a. nach Tätigkeit als Bereichsleiter in der Automobilzulieferindustrie seit 2009 Lehrstuhlinhaber Konstruktion (Engineering Design) an der Bergischen Universität Wuppertal.



**Wilfried Hofmann** promovierte 1984 an der TU Dresden zum Dr.-Ing. Von 1982 bis 1989 arbeitete er als Entwicklungsingenieur und Projektleiter in der Industrie und war von 1989 1992 Oberassistent an der TU Dresden. Von 1993 2007 war er ordentlicher Professor für Elektrische Maschinen und Antriebe an der TU Chemnitz und leitete von 1998 2003 ein DFG-Graduiertenkolleg. Seit 2007 ist er Universitätsprofessor für Elektrische Maschinen und Antriebe an der TU Dresden. Von 2006 bis 2012 war er Mitglied des wiss. Beirats der ETG und Leiter des Fachbereichs Elektrische Maschinen und Antriebe, Mechatronik (FBA1) in der ETG im VDE. Er ist ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig und der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) sowie Senior Member im IEEE. Seine Hauptarbeitsgebiete sind Entwurf, Optimierung und Regelung von elektrischen Maschinen und Antrieben, Magnetlagern, Hybridantrieben, Windkraftgeneratoren und Frequenzumrichtern.



**Bernd-Robert Höhn** Oktober 1965 Oktober 1970: Studium des Maschinenbaus an der Technischen Hochschule Darmstadt; 01.11.1970 31.03.1973: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und Getriebe an der Technischen Hochschule Darmstadt (THD); 01.04.1973 31.03.1979: Dozent am gleichen Institut; 1978: Dr.-Ing. mit dem Dissertationsthema Räderkurbelgetriebe als Umlaufastgetriebe eine systematische Untersuchung zur Ermittlung von Synthesegleichungen ; 01.04.1979: Konstrukteur in der Getriebekonstruktion; ab 01.07.1982: Leiter der Getriebeentwicklung bei der Firma AUDI; ab 01.08.1986: zusätzlich Leiter der Versuchsabteilung für automatische Getriebe; 01.10.1989: Professor des Lehrstuhls für Maschinenelemente an der Technischen Universität München, Leiter der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG). Pensioniert: 01.10.2011, emeritus of excellence: 30.09.2013.



**Dr.-Ing. Albert Hövel** absolvierte von 1977 bis 1982 ein Studium der Chemietechnik und promovierte während der 10-jährigen Tätigkeit bei der Philips Kommunikations Industrie AG.

Seit 1993 ist er beim Deutschen Institut für Normung e. V. tätig und seit 2007 Leiter der Technischen Abteilung 1 in Berlin.

Seit Beginn seiner Tätigkeit im Institut war er jeweils über mehrere Jahre tätig als Geschäftsführer der folgenden Normenausschüsse: Armaturen, Chemischer Apparatebau, Erdöl- und Erdgasgewinnung, Kältetechnik, Luft- und Raumfahrt, Rohrleitungen und Dampfkesselanlagen, Sachmerkmale und Überwachungsbedürftige Anlagen.

In 2010 hat er die Geschäftsführung der Kommission Gesundheitswesen ([www.kgw.din.de](http://www.kgw.din.de)) übernommen. Er vertritt das DIN e. V. in der Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN)

Seit 2009 ist er Lehrbeauftragter an der TU Berlin in den Fachbereichen Innovationsökonomie und Verfahrenstechnik. 2010 betreute er an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) ingenieurtechnische Projekte im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften II.



**Jan Hummel** 2006 2012 Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der Technischen Universität Berlin, 2012 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter mit Lehraufgaben an der TU Berlin und Promotion zum Dr.-Ing, seit 2017 Oberingenieur am Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Arbeitsschwerpunkte: Produkt- und Prüfstandsentwicklung, Mechatronik, Entwicklung eines Prüfstands zur automatisierten Vermessung vollflexibler Tragflächen, additive Fertigung

**Manfred Kaßner** Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Deutschland



**Dr.-Ing. Hanfried Kerle** studierte Maschinenbau an der TH/TU Braunschweig und promovierte 1973 mit einer Arbeit auf dem Gebiet der Kurvengetriebe. Er erweiterte seine damaligen Forschungsschwerpunkte Getriebedynamik und Experimentelle Getriebelehre um die Fachgebiete Handhabungstechnik und Robotik nach einer Umwidmung seines Instituts im Jahre 1990. Neun Jahre später leitete er als Akad. Direktor bis zu seinem Eintritt in den Ruhestand 2004 die Abteilung Fertigungsautomatisierung und Werkzeugmaschinen des IWF; in dieser Zeit beschäftigte er sich vorrangig mit der Entwicklung von Maschinen mit Parallelkinematik für die Produktionstechnik. Seit 2004 stehen bei ihm Themen zur Geschichte der Mechanismen und Maschinen im Mittelpunkt seines wissenschaftlichen Interesses. Er hat bis heute 111 wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht und drei Fachbücher verfasst.



**Dieter Krause** 1992 Promotion zum Thema Rechnergestütztes Konzipieren mit Integration von Analysen, insbesondere Berechnungen am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; 1992 1994 Oberingenieur und Gruppenleiter am gleichnamigen Lehrstuhl; 1994 2005 Konstruktionsleiter, Technischer Leiter und Geschäftsführer in unterschiedlichen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus; ab 2005 Leiter des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) mit den Forschungsschwerpunkten Methodenforschung zur Entwicklung von modulare Produktfamilien (Modularisierung) und Strukturanalyse und Versuchstechnik insbesondere für Hochleistungswerkstoffe, wie CFK, Sandwich oder Keramik; Programmverantwortlicher für die Masterstudiengänge Produktentwicklung, Werkstoffe und Produktion und Mechanical Engineering and Management; 2009 2010 Studiendekan Maschinenbau; 2011 2012 Vizepräsident der TUHH; 2015 Hamburger Lehrpreis; seit 2016 DFG-Fachkollegiat im Fachkollegium Konstruktion, Maschinenelemente, Produktentwicklung; seit 2017 Mitglied im Advisory Board der Design Society; seit 2018 Mitglied im Vorstand der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP).



**Professor Dr.-Ing. Jörg Krüger**, Jahrgang 1962, studierte Elektrotechnik an der Universität GH Paderborn und der Technischen Universität Berlin, an der er 1991 sein Diplom erhielt. Im Anschluss war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fraunhofer Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) tätig. Er promovierte im Jahr 1998 zum Thema Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken. 1999 gründete er die Firma reCognitec Gesellschaft für digitale Bildverarbeitung mbH, die Lösungen zur Bilderkennung und bildgestützten Automatisierung entwickelt. 2003 wurde Prof. Krüger als Leiter des Fachgebiets Industrielle Automatisierungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin berufen. Seit dem 01.01.2004 ist er zudem Leiter des Geschäftsfelds Automatisierungstechnik am Fraunhofer-IPK.



**Heinz Lehr** Physikstudium an der Freien Universität Berlin, Promotion am Hahn-Meitner-Institut, Planung des Synchrotrons an der ESRF in Grenoble, Geschäftsführer BESSY I, Planung von BESSY II, Forschungsdirektor und Prokurist am Institut für Mikrotechnik Mainz, 1997–2016 Professor an der TU Berlin, Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik.

Forschungsschwerpunkte: Entwicklung und Fertigung intelligenter Produkte für die Medizin-, Mess-, Antriebs- und Tiefseetechnik, intelligente mechatronische Systeme, hochdynamische Aktoren, medizinische und technische Videodokope, Chip-on-the-Tip-Optiken mit Autofokus und Zoom, OP-Instrumente mit Aktoren und haptischem Feedback. LED-Beleuchtungstechnik sowie flexible Halte- und Führungssysteme für den OP-Bereich, Techniken zur DNS-Hautimpfung, autonome Tiefseefahrzeuge in druckneutraler Technik, druckneutrale Komponenten für die Tiefsee.



**Robert Liebich** Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der TU Berlin. Promotion 1997 zum Dr.-Ing. bei Prof. Gasch zum Thema Rotor-Stator-Kontakt mit thermischen Effekten. Mitgründer und alleiniger Geschäftsführer eines Ingenieurbüros. Ab 2001 in diversen Positionen bei Rolls-Royce-Deutschland (Luftfahrtantriebe) tätig. Seit 2007 Professor für Konstruktion und Produktzuverlässigkeit an der TU Berlin. Forschung und Lehre auf den Gebieten der beanspruchungsgerechten Konstruktion, Festigkeit und Lebensdauer sowie der Rotor- und Strukturdynamik insbesondere im Bereich der Luftlager.



**Mathias Liewald** Studium Maschinenbau an der Universität Dortmund, Promotion 1990 zum Dr.-Ing. in der Umformtechnik; Gruppenleiter Prozessoptimierung Werkzeuge/Presswerk/Prototypen/Betriebsmittel bei der Mercedes-Benz AG in Sindel ngen, ab 1995 Leiter Presswerke bei Gebr. Wackenhut GmbH, ab 1997 Werk- und Spartenleiter ThyssenKrupp Nothelfer GmbH Werk Wadern, Vice President Dies International bei ThyssenKrupp Nothelfer GmbH bis 2005; Parallel Studium an der Open University Business School in Milton Keynes/London, Abschluss Master of Business and Administration (MBA) im Zeitraum 1999 bis 2001.

Im April 2005 Berufung an das Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart. Forschungsschwerpunkte Blech- und Massivumformung. Lehrtätigkeiten im Bereich Grundlagen der Umformtechnik und im modernen Karosseriebau. Geschäftsführer der Forschungsgesellschaft Umformtechnik (FGU mbH) in Stuttgart seit 2009.



**Armin Lohrengel**, Jahrgang 1966, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal und RWTH Aachen. Bis 1999 war er wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente der RWTH Aachen. Die Promotion erfolgte über die Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Klemmrollenfreiläufen. Ab 1999 war er Leiter der Maschinenentwicklung der Paul Hartmann AG, Heidenheim. Seit 2007 ist er Universitätsprofessor (Lehrstuhl Maschinenelemente und Konstruktionslehre)

und Institutsdirektor des Instituts für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal.



**Apl. Prof. Arndt Lüder** studierte an der Universität Magdeburg und promovierte an der Universität Halle-Wittenberg. Seit 2011 vertritt er das Lehr- und Forschungsgebiet in der Fakultät Maschinenbau der Universität Magdeburg. Hier forscht er in den Bereichen objekt-orientierter, agenten-orientierter und mechatronischer Konzepte für Entwurf und Implementierung von verteilten Automatisierungssystemen sowie den dazu notwendigen Architekturen, Entwurfsvorgehen und Werkzeugen.



**Jens-Peter Majschak** 1984 1989 Studium in der Fachrichtung Verarbeitungsmaschinen an der Technischen Universität Dresden; Abschluss: Diplom. 1989 1995 Wissenschaftlicher Assistent/Mitarbeiter an der Technischen Universität Dresden. 1994 1996 Geschäftsführer GVL Gesellschaft für Verpackungstechnik und -logistik mbH, Dresden; 1995 2000 Fraunhofer Anwendungszentrum für Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (AVV). 2000 2001 IZK GmbH, 2002 2004 Fraunhofer Institut Verfahrenstechnik und Verpackung (Freising). Seit 2004 Professur Verarbeitungsmaschinen/ Verarbeitungstechnik an der Technischen Universität Dresden und Leiter des Dresdner Institutsteils Verarbeitungstechnik des Fraunhofer Instituts für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV. Seit 2013 Ordentliches Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig.



**Heinz Mertens** Lehre als Maschinenschlosser; Maschinenbaustudium am Ohm-Polytechnikum Nürnberg (TFH) und TH München; Industrietätigkeit bei Robert Bosch GmbH Nürnberg (Konstruktion) und Siemens AG, Dynamowerk Berlin (Konstruktion, Festigkeitsberechnung, Materialprüfung Oberingenieur). Von 1981 bis 2005 Professor für Konstruktionslehre an der TU Berlin, mit den Schwerpunkten Antriebstechnik und Beanspruchungsgerechtes Konstruieren, Lebensdauer- und Zeitfestigkeitsfragen.

**Heinz Motz** Bergische Universität Wuppertal,  
Wuppertal, Deutschland

**Stephan Neus** Aachen, Deutschland



**Professor Dr.-Ing. Kristin Paetzold** hat an der TU Chemnitz studiert und an der FAU Erlangen promoviert; seit 2009 leitet sie das Institut für Technische Produktentwicklung an der Universität der Bundeswehr München. Ihre Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich Systems Engineering und Integrierte Produktentwicklung; in diesem Kontext beschäftigt sie sich mit fertigungsge-rechter Produktentwicklung resp. toleranzgerechter Produktentwicklung.



**Gerhard Poll** Promotion zum Dr.-Ing. durch die Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen 1983; von 1984 bis 1996 Industrietätigkeit bei der SKF Gruppe in Deutschland, den Niederlanden und USA; seit 1996 Inhaber des Lehrstuhls für Maschinenkonstruktion und Tribologie der Leibniz Universität Hannover; Arbeitsschwerpunkte: Tribologie, Fahrzeugtechnik, Antriebssysteme und Komponenten wie stufenlose Getriebe, Wälzlager, Synchronisierungen und dynamische Dichtungen.



**Juri E. Postnikov** 1994: Abschluss der Moskauer Technischen Universität Bauman, 1994 1995 Zusatzstudium Maschinenbau und 1996-2004 Promotion zum Dr.-Ing. an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, während der Promotion Aufbau von schweißtechnischen Forschungs-laboren sowie Neukonstruktionen von Schweißbrennen. 2002: Designstudium bei Prof. Luigi Colani in Karlsruhe Gründung der Firma BALTEXIM, 2007: Mitgründung eines Demonstrations- und Forschungszentrums für CNC-Fräsmaschinen an der Moskauer Technischen Universität Bauman. Seit 2005 Autor und Berichtersteller für die Zeitschrift AUTOPILOT, Verlag Kommer-sant, Moskau.



**Günter Pritschow** Geboren am 3.1.1939 in Berlin. 1959–66: Studium der Fachrichtung Nachrichtentechnik an der TU Berlin mit dem Abschluss: Dipl.-Ing.; 1966–84: 12 Jahre Industrietätigkeiten in leitenden Positionen; 1969–72: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen an der TU Berlin, Promotion zum Dr.-Ing.; 1976–80: Professor an der TU Berlin für das Fachgebiet Automatisierungstechnik für Qualitätssicherung und Fertigung; 1984–2005: o. Professor an der Universität Stuttgart für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (in Nachfolge von Prof. Stute) und Geschäftsführender Direktor des Instituts; 1986–90: Prorektor für Lehre an der Universität Stuttgart; 1996–2000: Rektor der Universität Stuttgart.



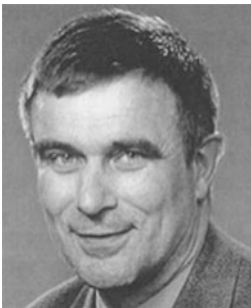
**Helmut Reinhardt** 1962: Automatisierungsingenieur im Deutschen Brennstoffinstitut Freiberg; 1966: wiss. Mitarbeiter an der TU Bergakademie Freiberg, Inst. f. Elektrotechnik; 1969: Promotion (selbsttätige Auswertung spezieller Messsignale) und Berufung als Dozent für Regelungstechnik an der TU Bergakademie Freiberg; 1980: Habilitation (Testmethodik für Prozessrechnersoftware); 1989: Abteilungsleiter Prozessführung im AdW-Institut für Aufbereitung Freiberg; 1990 Professor an der Fachhochschule Köln, seit 2004 Lehrbeauftragter.



**Rainer Scheuring** studierte von 1984–1989 Technische Kybernetik in Stuttgart und Cambridge (England), anschließend promovierte er an der Universität Stuttgart. Von 1994–2004 arbeitete er in verschiedenen Funktionen für die BASF in Ludwigshafen und Antwerpen. Seit 2004 ist er Professor für Automatisierungstechnik an der TH Köln. Zu seinen Schwerpunkten gehören dynamische Anlagensimulation, Regelungs- und Steuerungstechnik.



**Dr. Alexander Schloske** ist Senior Expert Quality am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart. Er ist Qualitätsmanager DGQ/EOQ und besitzt langjährige Projekterfahrung auf den Gebieten der Produktentwicklung und Prozessoptimierung in den unterschiedlichsten Branchen. Seine beruflichen Schwerpunkte liegen auf der methodischen Produktentwicklung mit der QFD und der FMEA sowie der Sicherstellung der Funktionalen Sicherheit von mechatronischen Systemen. Neben seiner beruflichen Tätigkeit hält er Vorlesungen zum Thema Qualitätsmanagement an der Universität Stuttgart sowie zum Thema Methoden der Produktentwicklung an der Technischen Universität Wien und ist als Dozent für verschiedene Bildungseinrichtung, wie z. B. der Deutschen Gesellschaft für Qualität e. V. (DGQ), tätig.



**Prof. Günther Seliger** geboren 1947, wurde 1983 an der TU Berlin promoviert, ist seit 1978 als Geschäftsführender Gesellschafter in einem mittelständischen Familienunternehmen engagiert. Nach einer Tätigkeit als Bereichsleiter am Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik Berlin folgte er 1988 dem Ruf der Technischen Universität Berlin auf eine Professur für Montagetechnik und Fabrikbetrieb. Von 1995 2006 war er Sprecher des DFG-geförderten Sonderforschungsbereiches Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen, von 2012 2015 Sprecher des DFG-geförderten Sonderforschungsbereiches Sustainable Manufacturing Shaping Global Value Creation. In zahlreichen nationalen und internationalen Projekten leistet er wesentliche Forschungsbeiträge zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung.



**Manfred Stiebler** erwarb das Diplom in Elektrotechnik 1957 an der Technischen Hochschule Darmstadt und promovierte dort zum Dr.-Ing. in 1967. Innerhalb seiner Industrietätigkeit bei der Fa. AEG leitete er das Grundlagenlabor in der Entwicklung der Großmaschinenfabrik Berlin; ab 1970 war er Entwicklungsleiter der Kleinmaschinenfabrik in Oldenburg. In 1977 nahm er den Ruf auf eine Professur im Fachbereich Elektrotechnik

der Technischen Universität Berlin an; er ist Emeritus seit 1999. Sein Arbeitsgebiet sind Elektrische Maschinen und Antriebe. Besondere Interessen sind das Betriebsverhalten elektrischer Maschinen sowie die Anwendung der Windenergie. Er war Herausgeber der Zeitschrift Electrical Engineering und Mitglied in verschiedenen nationalen und internationalen Normengremien (DKE, IEC); er ist Mitglied des VDE und Senior Member des IEEE.

**Karl Thomas** Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

**Nico Troß** Aachen, Deutschland



**Professor Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann**, Jahrgang 1958, studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Berlin und war von 1986 bis 1994 Mitarbeiter und Oberingenieur im Bereich Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin. Dort promovierte er 1993 bei Prof. em. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. Günter Spur zum Thema Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe. Anschließend war Professor Uhlmann in verantwortlichen Positionen im Bereich der Forschung, Entwicklung und Anwendungstechnik in der Firmengruppe Hermes Schleifmittel GmbH & Co., Hamburg, tätig und seit 1995 auch Prokurist bei diesem Unternehmen. Am 1. September 1997 übernahm Professor Uhlmann die Leitung des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) sowie die Leitung des Fachgebiets Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin im Produktionstechnischen Zentrum Berlin.



**Professor Alexander Verl** war nach seinem Studium der Elektrotechnik von 1986 bis 1991 an der Universität Erlangen-Nürnberg als Entwicklungsingenieur zunächst bei der Siemens AG in Erlangen tätig. 1994 wechselte er zum Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen und promovierte dort 1997 im Bereich Robotik und Mechatronik. Ebenfalls 1997 gründete er die AMATEC Robotics GmbH. Er ist seit 2005 Direktor des Instituts für Steuerungs-

technik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart. Im Rahmen seiner Forschungs- und Lehrtätigkeit befasst er sich unter anderem mit den Themenbereichen Steuerungssysteme und Sensorapplikationen für Werkzeugmaschinen und Industrieroboter, rekonfigurierbare Maschinen sowie Montage- und Servicerobotik.



**Professor Birgit Vogel-Heuser** studierte und promovierte an der RWTH Aachen. Nach mehrjähriger Tätigkeit in der Industrie sowie als Lehrstuhlleiter an verschiedenen Universitäten ist sie seit 2009 Ordinaria des Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme der TU München. Sie forscht in den Bereichen Modellbasiertes interdisziplinäres Engineering, agentenbasierte Systeme, Cyber Physical Production Systems, Softwareevolutiondatenbasierte Systemevolution und Informationsaggregation und leitet seit 2013 den GMA FA 5.15 Agentensysteme.



**Stefan Wagner** 1982 1988: Studium Maschinenwesen Universitäten Kaiserslautern und Stuttgart, 1989 2016: Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik (IFU), Forschungsgesellschaft Umformtechnik (FGU mbH), Februar 2002: Ernennung zum Honorary Professor an der TU Cluj-Napoca (Rumänien), 01.03.2016: Berufung an die Hochschule Esslingen, Lehrgebiete Umformtechnik, Werkstofftechnik und Leichtbauwerkstoffe.



**Manfred Weck** \*20. Nov. 1937. 1955 1958 Werkzeugmacherlehre. 1959 1961 Studium Maschinenbau, Staatliche Ingenieurschule für Maschinenwesen Iserlohn. 1963 1966 Maschinenbau-Studium an der RWTH Aachen. 1969 Promotion zum Dr.-Ing an der RWTH Aachen. 1969 1971 Oberingenieur am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen. 4.12.1971 Habilitation, RWTH Aachen. 1971 1973 Technischer Leiter bei Wolf-Geräte GmbH, Betzdorf. Von 1.6.1973 bis 31.12.2003 o. Professor an der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Mitglied des Direktoriums des WZLs. Von 1.9.1980 bis 31.12.2003 Mitglied des Direktoriums des Fraunhofer-Instituts für Produktions-



technologie (IPT). 1992 Ehrendoktor der Technischen Universität Hannover und 2005 Ehrendoktor der Technischen Universität Dresden sowie zahlreiche weitere Ehrungen und Auszeichnungen

**Prof. Westkämper** promovierte 1977 an der RWTH Aachen über die Automatisierung in der Einzel- und Serienfertigung und war 10 Jahre lang in der deutschen Luftfahrt- (MBB) und Elektro-Industrie (AEG) tätig, wo er als Referatsleiter und Leiter von Zentralabteilungen für die Produktionstechnik verantwortlich war. Er wurde 1988 als Lehrstuhlinhaber und Direktor des Institutes für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) an die Technische Universität Braunschweig berufen. Von 1995 bis 2011 war er Direktor des Institutes für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart und zugleich Leiter des Fraunhofer-Institutes für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart. Er ist Mitglied der High Level Group der Europäischen Technologieplattform Manufacture und betreut zahlreiche Doktoranden an der von ihm mitgegründeten Graduiertenschule GSAME (Graduate School for advanced Manufacturing Engineering) der Universität Stuttgart. Professor Westkämper ist Mitglied der Akademie der Technik (acatech) und war in zahlreichen Gremien der deutschen und europäischen Forschungsorganisationen tätig. Er erhielt Ehrungen an den Universitäten Mageburg, Cluj Napoca (Rumänien) und Charkov (Ukraine). Ferner erhielt er das Bundesverdienstkreuz 1. Klasse. Mehr als 800 Publikationen sind in nationalen und internationalen Journalen erschienen. Seit September 2011 ist er im Ruhestand und hat mehrere Bücher geschrieben, die im Springer Verlag veröffentlicht wurden.

**Thomas Widder** Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Deutschland



**Helmut Wohlfahrt**† promovierte 1970 an der Universität Karlsruhe auf dem Gebiet der Werkstoffkunde, erhielt 1979 einen Ruf auf den Lehrstuhl für Werkstofftechnik mit Schwerpunkt Schweißtechnik an der Universität-GH Kassel. 1991 bis 2001 Leiter des Instituts für Schweißtechnik an der Technischen Universität Braunschweig. Festigkeitseigenschaften von Schweißverbindungen, Schweißen von Leichtbauwerkstoffen einschließlich Aluminium-Druckguss mit Schutzgas- und Strahlschweißverfahren, Prozessanalysen bei Laserstrahlverfahren und festigkeitsorientierte FEM-Berechnungen sind Schwerpunkte seiner Forschungsarbeit.

# Universell einsetzbar: die Ultra-Kompakt-Industrie-PCs C60xx



C6015

C6017

C6025

C6030

C6032

## [www.beckhoff.de/c60xx](http://www.beckhoff.de/c60xx)

Leistungsstark, flexibel und universell einsetzbar: mit der Ultra-Kompakt-Industrie-PC-Serie C60xx bietet Beckhoff als Spezialist für PC-basierte Steuerungstechnik ein breites Spektrum leistungsstarker Geräte mit geringem Platzbedarf und besonders flexibler Montage. Das Spektrum reicht dabei von der kompakten IPC-Einstiegsklasse C6015 mit nur 82 x 82 x 40 mm Bauraum bis hin zum C6032 mit Intel®-Core™-i-Prozessoren und einer Vielzahl modularer Schnittstellen- und Funktionserweiterungen. Auch komplexe Applikationen mit höchsten Leistungsanforderungen lassen sich so mit Highend-Rechenleistung in ultrakompakter Bauform realisieren.

... bis zu 89,5 %  
Kosten sparen\*



89%

... bis zu 78,1 %  
Kosten sparen\*



78%

... bis zu 58,58 %  
Kosten sparen\*



58%

... bis zu 60 %  
Kosten sparen\*



60%

... 62,1 % Kosten  
sparen\*

bei CFBUS.PUR mit Cat5e  
anstatt Cat 6A



62%



... 88 %  
kürzere Montagezeit\*

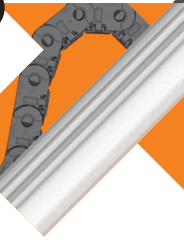
mit autoglide 5 im  
Vergleich zu einer  
Standardlösung  
mit Führungsrinnen

... bis zu 74,1 %  
Kosten sparen\*



74%

Kosten senken.  
Technik verbessern.



88%

... 48 % Gewicht  
und deutlich  
Montagezeit  
sparen\*

mit e-kette® YE.42 im  
Vergleich zu einer  
marktüblichen  
Stahl-Schleppkette



48%

Jetzt ist die Zeit.  
www.igus.de/tuca

... 20 % mehr  
Stabilität\*

mit e-kette® E4Q  
im Vergleich zur  
e-kette® E4.56



20%

Mit 55 Jahren Erfahrung in „Kunststoffen für Bewegung“ bietet  
Ihnen igus® viele Möglichkeiten und gleichzeitig Kosten zu sparen. Dabei ist unser  
Motto: „Technik rauf, Kosten runter“ und mindestens eines davon  
wollen wir immer erfüllen. Das ist schon immer unsere Aufgabe  
und unser Angebot an Sie.



igus® GmbH  
Spicher-Str. 1a 51147 Köln  
info@igus.de www.igus.de

\* Garantiebedingungen und weitere Informationen finden Sie online [www.igus.de/tuca](http://www.igus.de/tuca)