
Dubbel Taschenbuch
für den Maschinenbau 1:
Grundlagen und Tabellen

DIE KUNST DES HEBENS



Industrieroboter 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

www.abus-kransysteme.de

ABUS
MEHR BEWEGEN.

Beate Bender · Dietmar Göhlich
(Hrsg.)

Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 1: Grundlagen und Tabellen

26., überarbeitete Auflage

 Springer Vieweg

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 978-3-662-59710-1

ISBN 978-3-662-59711-8 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59711-8>

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, technikorienteerte 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 ⁻³ m ³	Temperaturdifferenz	1 °C = 1 K
Druck	1 bar = 10 ⁵ 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.

FLENDER

Inhaltsverzeichnis

Teil I Mathematik

1	Mengen, Funktionen und Boolesche Algebra	3
	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
2	Zahlen	13
	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 Lehrsatz	16
2.1.8	Unendliche reelle Zahlenfolgen und Zahlenreihen	18
2.2	Komplexe Zahlen	20
2.2.1	Komplexe Zahlen und ihre geometrische Darstellung	20
2.2.2	Addition und Multiplikation	20
2.2.3	Darstellung in Polarkoordinaten. Absoluter 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
3	Lineare Algebra	27
	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
4	Geometrie	45
	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 Rotationskörpern	60
4.4.6	Guldinsche Regeln	60
	Allgemeine Literatur	63

5	Analytische Geometrie	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
6	Differential- und Integralrechnung	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 differenzierbaren Funktionen	90
6.1.9	Grenzwertbestimmung durch Differenzieren. Regel von de l'Hospital	92
6.1.10	Das bestimmte Integral	92
6.1.11	Integralfunktion, Stammfunktion und Hauptsatz 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 transzendenten Funktionen	98
6.1.16	Uneigentliche Integrale	98
6.1.17	Geometrische Anwendungen der Differential- 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 Doppelintegrale	113
6.2.5	Flächen- und Raumintegrale	113
	Allgemeine Literatur	118
7	Kurven und Flächen, Vektoranalysis	119
	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-)Operator	138
7.4.3	Integralsätze	139
	Allgemeine Literatur	140
8	Differentialgleichungen	141
	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 Koeffizienten	147
8.1.6	Systeme von linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten	150
8.1.7	Randwertaufgabe	153
8.1.8	Eigenwertaufgabe	154

8.2	Partielle Differentialgleichungen	155
8.2.1	Lineare partielle Differentialgleichungen	
	2. Ordnung	155
8.2.2	Trennung der Veränderlichen	156
8.2.3	Anfangs- und Randbedingungen	157
	Allgemeine Literatur	159
9	Stochastik und Statistik	161
	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 Quadrate	163
9.2.1	Grundlagen	163
9.2.2	Ausgleich direkter Messungen gleicher Genauigkeit	163
9.2.3	Fehlerfortpflanzung bei zufälligen Fehlergrößen	165
9.2.4	Ausgleich direkter Messungen ungleicher Genauigkeit	165
9.3	Wahrscheinlichkeitsrechnung	166
9.3.1	Definitionen und Rechengesetze der 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 Standardabweichung	176
9.4.3	Regression und Korrelation	178
	Literatur	180
10	Numerische Verfahren	181
	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 (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 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 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
11	Optimierung	213
	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
	Literatur Teil I Mathematik	225
	Teil II Mechanik	
12	Statik starrer Körper	231
	Joachim Villwock und Andreas Hanau	
12.1	Allgemeines	231
12.2	Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften mit gemeinsamem Angriffspunkt	232
12.2.1	Ebene Kräftegruppe	232
12.2.2	Räumliche Kräftegruppe	233
12.3	Zusammensetzen und Zerlegen von Kräften 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	Kräfte­system im Raum	236
12.4.2	Kräfte­system 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
13	Kinematik	257
	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
14	Kinetik	273
	Joachim Villwock und Andreas Hanau	
14.1	Energetische Grundbegriffe – Arbeit, Leistung, Wirkungsgrad	273
14.1.1	Spezielle Arbeiten	274
14.2	Kinetik des Massenpunkts und des translatorisch bewegten Körpers	275
14.2.1	Dynamisches Grundgesetz von Newton (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
15	Schwingungslehre	295
	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 (rheolineare Schwingungen)	308
	Literatur	308
16	Hydrostatik (Statik der Flüssigkeiten)	311
	Joachim Villwock und Andreas Hanau	
17	Hydro- und Aerodynamik (Strömungslehre, Dynamik der Fluide)	315
	Joachim Villwock und Andreas Hanau	
	17.1 Eindimensionale Strömungen idealer Flüssigkeiten	316
	17.1.1 Anwendungen der Bernoulli'schen Gleichung für den stationären Fall	317
	17.1.2 Anwendung der Bernoulli'schen Gleichung für den instationären Fall	318
	17.2 Eindimensionale Strömungen zäher Newton'scher Flüssigkeiten (Rohrhydraulik)	318
	17.2.1 Stationäre laminare Strömung in Rohren mit Kreisquerschnitt	319
	17.2.2 Stationäre turbulente Strömung in Rohren mit Kreisquerschnitt	319
	17.2.3 Strömung in Leitungen mit nicht vollkreisförmigen Querschnitten	322
	17.2.4 Strömungsverluste durch spezielle 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 zäher Newton'scher Flüssigkeiten	326
	17.2.8 Freier Strahl	326
	17.3 Eindimensionale Strömung Nicht-Newton'scher 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 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

18	Ähnlichkeitsmechanik	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) und Π -Theorem	347
	Literatur	348
	Literatur zu Teil II Mechanik	349

Teil III Festigkeitslehre

19	Allgemeine Grundlagen	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	Festigkeits-hypothesen 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
20	Beanspruchung stabförmiger Bauteile	365
	Joachim Villwock und Andreas Hanau	
20.1	Zug- und Druckbeanspruchung	365
20.1.1	Stäbe mit konstantem Querschnitt 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, 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 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 Energimethoden zur Berechnung von Einzeldurchbiegungen	391
	20.5	Torsionsbeanspruchung	395
	20.5.1	Stäbe mit Kreisquerschnitt und konstantem Durchmesser	395
	20.5.2	Stäbe mit Kreisquerschnitt und veränderlichem Durchmesser	398
	20.5.3	Dünnwandige Hohlquerschnitte (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
21		Elastizitätstheorie	415
		Joachim Villwock und Andreas Hanau	
	21.1	Allgemeines	415
	21.2	Rotationssymmetrischer Spannungszustand	416
	21.3	Ebener Spannungszustand	418
		Literatur	419
22		Beanspruchung bei Berührung zweier Körper (Hertz'sche Formeln)	421
		Joachim Villwock und Andreas Hanau	
	22.1	Kugel	421
	22.2	Zylinder	422
	22.3	Beliebig gewölbte Fläche	422
		Literatur	423
23		Flächentragwerke	425
		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 Membrantheorie für Innendruck	430
23.3.2	Biegesteife Schalen	431
	Literatur	432
24	Dynamische Beanspruchung umlaufender Bauteile durch Fliehkräfte	433
	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
25	Stabilitätsprobleme	437
	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. 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 unelastischen (plastischen) Bereich	446
	Literatur	446

26	Finite Berechnungsverfahren	447
	Joachim Villwock und Andreas Hanau	
	26.1 Finite Elemente Methode	447
	26.2 Randelemente	452
	26.3 Finite Differenzen Methode	455
	Literatur	456
27	Plastizitätstheorie	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
28	Festigkeitsnachweis	463
	Heinz Mertens und Robert Liebich	
	28.1 Berechnungs- und Bewertungskonzepte	463
	28.2 Nennspannungskonzepte	464
	28.3 Kerbgrundkonzepte	466
	Literatur	468
	Literatur zu Teil III Festigkeitslehre	471

Teil IV Werkstofftechnik

29	Werkstoff- und Bauteileigenschaften	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 statischer Beanspruchung	487
	29.3.4 Bruchmechanische Werkstoffkennwerte bei zyklischer Beanspruchung	489

29.4	Einflüsse auf die Werkstoffeigenschaften	490
29.4.1	Werkstoffphysikalische Grundlagen der 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	Gestalteinfluss auf statische Festigkeitseigenschaften	494
29.4.7	Gestalteinfluss auf Schwing- festigkeitseigenschaften	496
29.5	Festigkeitsnachweis von Bauteilen	497
29.5.1	Festigkeitsnachweis bei statischer Beanspruchung	497
29.5.2	Festigkeitsnachweis bei Schwingbeanspruchung mit konstanter Amplitude	497
29.5.3	Festigkeitsnachweis bei Schwingbeanspruchung mit variabler Amplitude (Betriebsfestigkeitsnachweis)	498
29.5.4	Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis unter statischer Beanspruchung	501
29.5.5	Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis unter zyklischer Beanspruchung	502
29.5.6	Festigkeitsnachweis unter Zeitstand und Kriechermüdungsbeanspruchung	503
	Anhang	505
	Literatur	517
30	Werkstoffprüfung	521
	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

31	Eigenschaften und Verwendung der Werkstoffe	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 Werkstoffe	590
31.4	Werkstoffauswahl	593
	Anhang	594
	Literatur	625
32	Kunststoffe	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- 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 Fügetechniken	664
	32.13.7 Fertigungsverfahren	666
	Anhang	667
	Literatur	670
33	Tribologie	673
	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 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
34	Korrosion und Korrosionsschutz	691
	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 Beanspruchung	718
	34.3.2 Hochtemperaturkorrosion mit mechanischer Beanspruchung	723
	34.4 Korrosionsprüfung	724
	Literatur	725

Teil V Thermodynamik

35	Thermodynamik. Grundbegriffe	729
	Peter Stephan und Karl Stephan	
35.1	Systeme, Systemgrenzen, Umgebung	729
35.2	Beschreibung des Zustands eines Systems. Thermodynamische Prozesse	730
36	Temperaturen. Gleichgewichte	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
37	Erster Hauptsatz	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
38	Zweiter Hauptsatz	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
39	Exergie und Anergie	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
40	Stoffthermodynamik	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
41	Zustandsänderungen von Gasen und Dämpfen	777
	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
42	Thermodynamische Prozesse	783
	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
43	Gemische	793
	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

44	Verbrennung	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
45	Wärmeübertragung	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 halbumendliche Körper	811
	45.3.2 Zwei halbumendliche Körper in thermischem 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 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
	Literatur zu Teil V Thermodynamik	825
	Teil VI Maschinendynamik	
46	Schwingungen	829
	Holger Hanselka, Sven Herold, Rainer Nordmann und Tamara Nestorović	
	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 Dämpfungen, Eigenvektoren	831
	46.2.4 Modale Analyse	833
	46.2.5 Frequenzgangfunktionen mechanischer Systeme, 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 einer Maschine	839
46.4	Darstellung von Schwingungen im Zeit- und Frequenzbereich	839
46.4.1	Darstellung von Schwingungen im Zeitbereich .	839
46.4.2	Darstellung von Schwingungen im Frequenzbereich	840
46.5	Entstehung von Maschinenschwingungen, Erregerkräfte $F(t)$	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
47	Kurbeltrieb, Massenkräfte und -momente, Schwungradberechnung	863
	Rainer Nordmann und Tamara Nestorović	
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
48	Maschinenakustik	879
	Holger Hanselka, Joachim Bös und Tamara Nestorović	
48.1	Grundbegriffe	879
48.1.1	Schall, Frequenz, Hörbereich, Schalldruck, 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, 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 Geräuschkinderung	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 Schwingungsminderung	891
48.5	Numerische Verfahren zur Simulation von Luft- und Körperschall	895
48.6	Strukturintensität und Körperschallfluss	895
	Literatur	898

Teil VII Allgemeine Tabellen

49	Allgemeine Tabellen	903
	Karl-Heinrich Grote	
	Fachausdrücke	923
	Stichwortverzeichnis	999

Inhaltsverzeichnis Band 2

Teil I Grundlagen der Produktentwicklung

1	Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens	3
	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
2	Anwendung für Maschinensysteme der Stoffverarbeitung . .	65
	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
3	Bio-Industrie-Design: Herausforderungen und Visionen . . .	79
	Luigi Colani und Juri Postnikov	
	Literatur	82
	Literatur zu Teil I Grundlagen der Konstruktionstechnik	83
Teil II Elektronische Datenverarbeitung		
4	Einführung	87
	Reiner Anderl	
5	Informationstechnologie	89
	Reiner Anderl	
5.1	Grundlagen und Begriffe	89
5.1.1	Zahlendarstellungen und arithmetische 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	Kryptografie	109
	Anhang	112
	Literatur	115
6	Virtuelle Produktentstehung	117
	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 Produktdatenmanagementsystems	135
6.4.3	Architektur des Produktdatenmanagementsystems	136
6.5	Kooperative Produktentwicklung	138
6.6	Schnittstellen	138
	Literatur	140
7	Elektronische Datenverarbeitung Agentenbasiertes Steuern 143	
	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
	Literatur zu Teil II Elektronische Datenverarbeitung	151

Teil III Mechanische Konstruktionselemente

8	Bauteilverbindungen	155
	Helmut Wohlfahrt, Thomas Widder, Manfred Kaßner, Karl 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	Hochtemperaturlöten	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 Mutternwerkstoffe	217
8.6.6	Kräfte und Verformungen beim Anziehen von Schraubenverbindungen	218
8.6.7	Überlagerung von Vorspannkraft und Betriebslast	221
8.6.8	Auslegung und Dauerfestigkeitsberechnung von Schraubenverbindungen	225
8.6.9	Sicherung von Schraubenverbindungen	229
	Anhang	232
	Literatur	239
9	Federnde Verbindungen (Federn)	245
	Heinz Mertens, Robert Liebich und Peter Gust	
9.1	Aufgaben, Eigenschaften, Kenngößen	245
9.1.1	Aufgaben	245
9.1.2	Federkennlinie, Federsteifigkeit, Federnachgiebigkeit	246
9.1.3	Arbeitsaufnahmefähigkeit, Nutzungsgrad, 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 oder schwachgekrümmte, biegebeanspruchte Federn)	248
9.2.3	Spiralfedern (ebene gewundene, biegebeanspruchte Federn) und Schenkelfedern (biegebeanspruchte Schraubenfedern)	250
9.2.4	Tellerfedern (scheibenförmige, biegebeanspruchte Federn)	251
9.2.5	Drehstabfedern (gerade, drehbeanspruchte Federn)	253
9.2.6	Zylindrische Schraubendruckfedern und 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

10	Kupplungen und Bremsen	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, 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 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
11	Wälzlager	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	Wälzlagerkäfige	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 und angestellte Lagerung	306
	11.6.3 Lagersitze, axiale und radiale Festlegung der Lageringe	307
	11.6.4 Lagerluft	308
11.7	Wälzlagerschmierung	308
	11.7.1 Allgemeines	308
	11.7.2 Fettschmierung	310

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
12	Gleitlagerungen	331
	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
13	Zugmittelgetriebe	359
	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
14	Reibradgetriebe	377
	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
15	Zahnradgetriebe	389
	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

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
16 Getriebetechnik	453
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
Literatur zu Teil III Mechanische Konstruktionselemente	471

Teil IV Fluidische Antriebe

17 Hydrostatik und Pneumatik in der Antriebstechnik	475
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 Hydrostatischen Getriebes	479
17.1.3 Energieübertragung durch Gase	481
Anhang	482
18 Bauelemente hydrostatischer Getriebe	485
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) 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

	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
19		Aufbau und Funktion der Hydrostatischen Getriebe	503
		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 an Verstellmaschinen	506
20		Auslegung und Ausführung von Hydrostatischen Getrieben	509
		Dierk Feldmann und Stephan Bartelmei	
	20.1	Schaltungen	509
	20.2	Projektierung, Dimensionierung und konstruktive Gestaltung	511
	20.2.1	Projektierung	511
	20.2.2	Dimensionierung	511
	20.2.3	Konstruktive Gestaltung	512
	20.2.4	Werkzeuge	512
21		Pneumatische Antriebe	515
		Dierk Feldmann und Stephan Bartelmei	
	21.1	Bauelemente	515
	21.2	Schaltung	516
		Literatur zu Teil IV Fluidische Antriebe	517
Teil V Elektrotechnik			
22		Grundlagen	521
		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
23	Transformatoren und Wandler	547
	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
24	Elektrische Maschinen	557
	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	Asynchronlinearmotoren	580
24.6.3	Synchronlinearmotoren	581
24.7	Torquemotoren	581
24.8	High-Speed-Motoren	582
	Anhang	583
	Literatur	584
25	Leistungselektronik	585
	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
26	Elektrische Antriebstechnik	599
	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 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 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
27	Energieverteilung	635
	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
28	Elektrowärme	657
	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
29	Elektronische Komponenten	663
	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
	Literatur zu Teil V Elektrotechnik	679

Teil VI Messtechnik und Sensorik

30	Grundlagen	683
	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
31	Messgrößen und Messverfahren	693
	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 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
32	Messsignalverarbeitung	733
	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
33	Messwertausgabe	745
	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
	Literatur zu Teil VI Messtechnik und Sensorik	751
Teil VII Regelungstechnik und Mechatronik		
34	Grundlagen	755
	Michael Bongards, Dietmar Göhlich und Rainer Scheuring	
34.1	Begriffe	756
34.2	Differentialgleichung und Übertragungsfunktion	760
	Literatur	761
35	Modellierung	763
	Rainer Scheuring, Dietmar Göhlich, Michael Bongards und 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 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 ($P-T_n-T_t$)	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
36	Regelung	779
	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 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
37	Mechatronische und regelungstechnische Systeme	795
	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
Literatur zu Teil VII Regelungstechnik		805

Teil VIII Fertigungsverfahren

38	Übersicht über die Fertigungsverfahren	809
	Berend Denkena	
38.1	Definition und Kriterien	809
38.2	Systematik	810
	Literatur	810
39	Urformen	813
	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
40	Umformen	851
	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
41		Trennen	879
		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, 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- Trennschleifen	906
	41.4	Abtragen	907
		41.4.1 Gliederung	907
		41.4.2 Thermisches Abtragen mit Funken (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
42	Sonderverfahren	929
	Andreas Dietzel, Nico Troß, Jens Brimmers, Eckart Uhlmann, Christian Brecher, Stephanus Büttgenbach, Berend Denkena und Manfred Weck	
42.1	Gewindefertigung	929
42.1.1	Einleitung	929
42.1.2	Gewindefertigung mit geometrisch bestimmter Schneide	930
42.1.3	Gewindefertigung mit geometrisch unbestimmter Schneide	934
42.1.4	Gewindefertigung mit abtragenden und 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
43	Montage und Demontage	987
	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
44	Fertigungs- und Fabrikbetrieb	997
	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

45 Elemente der Werkzeugmaschinen	1049
Christian Brecher, Manfred Weck, Marcel Fey und Stephan 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
46 Steuerungen	1099
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 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
47	Maschinen zum Scheren und Schneiden	1125
	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
48	Werkzeugmaschinen zum Umformen	1131
	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
49	Spanende Werkzeugmaschinen	1147
	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 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- 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	Profilschleifmaschinen	1181
49.8.4	Rundschleifmaschinen	1182
49.8.5	Unrund- und Exzentrerschleifmaschinen	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
50	Schweiß- und Lötmaschinen	1199
	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
51	Industrieroboter	1205
	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
52	Werkzeugmaschinen für die Mikroproduktion	1219
	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
	Fachausdrücke	1229
	Stichwortverzeichnis	1305

Inhaltsverzeichnis Band 3

Teil I Kolbenmaschinen

1	Allgemeine Grundlagen der Kolbenmaschinen	3
	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
2	Verdrängerpumpen	21
	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, 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 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
3	Kompressoren, Verdichter	39
	Helmut Tschöke 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	Flüssigkeitsringverdichter	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

4	Verbrennungsmotoren	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 Dieselmotor	94
4.4.4	Hybride Verfahren für Gemischbildung und Verbrennung	97
4.5	Verfahren zur Gemischbildung und Zündung bei 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 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

5	Motoren für den maritimen Betrieb	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

6	Grundlagen der Strömungsmaschinen	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 (Arbeitsmaschinen)	173
	6.1.6 Schaufelanordnung für Turbinen (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 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 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 vielstufigen 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 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 Strömungskräfte	206
6.8.5	Schaufelschwingungen	207
6.8.6	Gehäuse	210
6.8.7	Thermische Beanspruchung	211
	Literatur	213
7	Wasserturbinen	215
	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	Dériazturbinen	220
7.4	Werkstoffe	220
7.5	Kennliniendarstellungen	220
7.6	Extreme Betriebsverhältnisse	221
7.7	Laufwasser- und Speicherkraftwerke	222
	Literatur	223
8	Kreiselpumpen	225
	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 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
9	Schiffspropeller	241
	Paul Thamsen	
9.1	Allgemeines	241
9.2	Schiffspropeller	241
	Literatur	243
10	Föttinger-Getriebe	245
	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

11	Dampfturbinen	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
12	Turboverdichter	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, spezifische polytrope Arbeit	287
12.5.6	Wirkungsgrad, Stufenzahl	287
12.5.7	Leistung	287
	Literatur	288
13	Gasturbinen	289
	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
	Literatur zu Teil II Strömungsmaschinen	311

Teil III Fördertechnik

14	Grundlagen	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
15	Hebezeuge und Krane	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

16	Flurförderzeuge	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
17	Weitere Unstetigförderer	407
	Ludger Overmeyer	
17.1	Elektrohängebahn	407
	Literatur	407
18	Aufzüge und Schachtförderanlagen	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	Spezifische Sicherheitseinrichtungen	414
18.3	Schachtförderanlagen	415
	Literatur	415

19	Stetigförderer	417
	Andre Katterfeld, Friedrich Krause, Ludger Overmeyer, Karl-Heinz Wehking, Willibald Günthner und Michael ten 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
20	Lager- und Systemtechnik	459
	Willibald Günthner, Michael ten Hompel, Andre Katterfeld und Friedrich Krause	
20.1	Stückgut-Systemtechnik	459
20.1.1	Transporteinheiten (TE) und Transporthilfsmittel (THM)	459
20.1.2	Funktion und Subsysteme	460
20.1.3	Theoretische Behandlung 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
21	Automatisierung in der Materialflusstechnik	485
	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 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
22	Baumaschinen	497
	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	Verteilermasten	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
 Teil IV Grundlagen der Verfahrenstechnik		
23	Einführung	513
	Matthias Bohnet	
	Literatur	514

24	Mechanische Verfahrenstechnik	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 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
25	Thermische Verfahrenstechnik	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
26	Chemische Verfahrenstechnik	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
27	Mehrphasenströmungen	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
28	Bioverfahrenstechnik	565
	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 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- Gleichung	586
28.5.4	Einfluss von Temperatur, pH-Wert, Inhibitoren 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

29	Industrieöfen	603
	Eckehard Specht und Friedherz Becker	
	29.1 Grundlagen	603
	29.2 Charakterisierung	603
	29.3 Spezifischer Energieverbrauch	606
	29.4 Wärmerückgewinnung durch Luftvorwärmung	608
	Literatur	610
30	Drehrohröfen	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
31	Schacht-, Kupol- und Hochöfen	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

32	Öfen für geformtes Gut	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
33	Feuerfestmaterialien	659
	Eckehard Specht und Friedherz Becker	
	Literatur	662
34	Wärmeübertrager	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
35	Konstruktionselemente von Apparaten und Rohrleitungen .	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 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
36	Intensivkühlung heißer Metalle mit Flüssigkeiten	709
	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
	Literatur zu Teil V Thermischer Apparatebau und Industrieöfen .	719

Teil VI Kälte-, Klima- und Heizungstechnik

37	Kältetechnik	723
	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

38	Klimatechnik	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	Luftfilter	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 Energieeinsparverordnung	821
38.8.1	Referenzgebäudeverfahren 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 Klimaanlagen	822
38.8.5	Berücksichtigung von Klimaanlageanlagen in der DIN V 18599	823
38.8.6	Endenergie für Ventilatoren	824
	Literatur	824

39	Systeme und Bauteile der Heizungstechnik	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

40	Einführung	845
	Stephan Klein und Marc Kraft	
	Literatur	846
41	Einteilung von Medizinprodukten	849
	Stephan Klein und Marc Kraft	
	Literatur	850
42	Ausgewählte Beispiele wichtiger medizintechnischer Geräte	851
	Stephan Klein, Marc Kraft, Henrik Botterweck, Jürgen Manigel, Martin Ryschka, Harald Hanke, Peter Schouwink und Jochim 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 ₂ -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
43	Entwicklung und Marktzugang von Medizinprodukten . . .	887
	Stephan Klein, Marc Kraft und Folker Spitzenberger	
	Literatur	891
44	Aufbereitung	893
	Marc Kraft	
	Literatur	893
45	Telemedizin	895
	Marc Kraft	
	Literatur	896
46	Physiologische Regelkreise	897
	Philipp Rostalski	
	Literatur	899
	Literatur zu Teil VII Biomedizinische Technik	901
Teil VIII Energietechnik und -wirtschaft		
47	Grundsätze der Energieversorgung	905
	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
48	Primärenergien	917
	Hermann-Josef Wagner, Christian Bratfisch, Hendrik Hasenclever 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
49	Wandlung von Primärenergie in Nutzenergie	943
	Hermann-Josef Wagner, Christian Bratfisch, Hendrik Hasenclever 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
50	Verteilen und Speicherung von Nutzenergie	981
	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
51	Feuerungen	993
	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	Gebälse	1016
51.6.2	Schornstein	1016
	Literatur	1017
52	Dampferzeuger	1019
	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		
53	Kraftfahrzeugtechnik	1037
	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

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- Interface	1076
53.8.2	Fahrdynamik	1077
53.8.3	Aerodynamik	1081
53.8.4	Verbrauch und CO ₂ -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
54	Schienefahrzeuge	1089
	Markus Hecht, Oldrich Polach und Ulrich Kleemann	
54.1	Grundsätzliche Randbedingungen	1089
54.1.1	Fahrzeugbegrenzungsprofil	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, 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
55	Luftfahrzeuge	1135
	Rudolf Voit-Nitschmann und Thomas Keilig	
55.1	Allgemeines	1135
55.1.1	Luftverkehr	1135
55.1.2	Anforderungen an den Luftverkehr und an Luftfahrzeuge	1136
55.1.3	Einordnung und Konstruktionsgruppen von Luftfahrzeugen	1137
55.1.4	Einordnung von Luftfahrzeugen nach 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
Fachausdrücke	1189
Stichwortverzeichnis	1265

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



Christina Berger studierte Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung mit dem Grundstudium Allgemeiner Maschinenbau an der TH Magdeburg und promovierte an der RWTH Aachen. Von 1975 bis 1995 bearbeitete sie im Turbinen- und Generatorenwerk der Siemens AG in Mülheim a. d. Ruhr werkstofftechnische Prüf- und Entwicklungsaufgaben. Seit 1981 leitete sie die Abteilung „Mechanische Eigenschaften – Festigkeit – Großbauteile“. 1995 wurde sie zur Universitätsprofessorin für Werkstoffkunde an der TU in Darmstadt ernannt und leitete bis 2011 das Institut für Werkstoffkunde sowie die Staatliche Materialprüfungsanstalt in Darmstadt.



Thomas Böllinghaus geb. 1960, Dipl.-Ing. Maschinenbau (1980–1984), Dr.-Ing. (1995) und Habilitation (1999) an der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, Grundstudium Informatik (1984–1989) an der Fernuniversität Hagen, Internationaler Schweißfachingenieur (1991).

Geschäftsführer des Instituts für Schadensforschung und Schadensverhütung an der HSU/UniBwH (1996–1999), Leiter der Fachgruppe Sicherheit gefügter Bauteile (1999–2006), Vizepräsident (seit 2003), Leiter der Abteilung Komponentensicherheit (seit 2011) und Koordinator des Themenfeldes Material (seit 2014) an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Honorarprofessor für das Gebiet Schadensanalyse und -prävention sowie kooptiertes Mitglied der Fakultät für Maschinenbau an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (seit 2008).

Präsident World Materials Research Institute Forum (2011–2015), Mitglied Board of Directors im IIW (seit 2014), Editor der Journale Materials Testing (seit 2000) und Welding in the World (seit 2009).

Forschungsschwerpunkte: Kaltriss- und Heißrissbildung beim Schweißen, Risskorrosion, Wasserstoffunterstützte Rissbildung, Schadensanalyse und Lebenszyklus von Komponenten und Systemen des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaus.

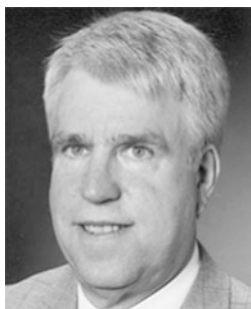
Joachim Bös Darmstadt, Deutschland

Thora Falkenreck Berlin, Deutschland



Karl-Heinrich Grote 1973 bis 1984: Studium und Promotion an der Technischen Universität Berlin; 1984 bis 1986: Industrie und Forschungsarbeiten in den USA, anschließend Leitung der Konstruktionsabteilung der Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV), Berlin; 1995 bis 2020: Univ.-Professor für Konstruktionstechnik, Institut für Maschinenkonstruktion, Otto-von-Guericke Universität, Magdeburg (OvGU); 2002 bis 2004: Visiting Full-Professor am Engineering Design Research Laboratory, California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, USA; Herausgebertätigkeiten (alle Springer-Verlag): 19. Auflage (1995) bis 25. Auflage (2018): DUBBEL – Taschenbuch für den Maschinenbau; 1. Auflage (2008) und 2. Auflage (2021): Handbook of Mechanical Engineering; 5. Auflage (2003) bis 8. Auflage (2013): Pahl/Beitz: Konstruktionslehre; Mitglied diverser wissenschaftlichen Beiräte und Gesellschaften; 2005 bis 2016: Dekan der Fakultät für Maschinenbau der OvGU

Ab 2012: Professor II, Bergen University College, Norwegen; Institute for Mechanical and Marine Engineering. 1993: VDI-Ehrenring und 2015: Ehrendoktorwürde (Dr. h.c.) des Kiev Institute of Technology (KPI).



Karl-Heinz Habig 1939 Geburt in Hagen/Westfalen, Studium und Promotion in Metallkunde an der TU Berlin, 1977: Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. 1983 Habilitation auf dem Gebiet der Tribologie, 1989 apl. Professor an der TU Berlin. Forschungsschwerpunkte: Reibung und Verschleiß metallischer und keramischer Werkstoffe sowie von Oberflächenschutzschichten, Simulation tribologischer Prozesse. 2003: Verleihung des Georg-Vogelpohl-Ehrenzeichens der Gesellschaft für Tribologie für herausragende Leistungen bei der Entwicklung, Anwendung und Verbreitung tribologischer Erkenntnisse.



Andreas Hanau Studium des Maschinenbaus an der Technischen Universität Berlin und Promotion. 1995–1999 Projektleiter für ein integrales Heizungs- und Lüftungssystem bei Stiebel Eltron GmbH. Ab 1999 BSH Hausgeräte GmbH mit den Tätigkeiten: Projektleiter für eine neue Waschmaschinenplattform, Entwicklungsleitung für Wäschepfleegeräte in den USA, Leiter Vorentwicklung für Waschgeräte, Coach für Product Engineering.



Holger Hanselka Nach einem Maschinenbaustudium promovierte Holger Hanselka 1992 an der TU Clausthal parallel zu seiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.v. (DLR) in Braunschweig. 1997 erhielt er eine Professur am Lehrstuhl für Adapttronik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, bevor er 2001 nach Darmstadt wechselte. Dort war er an der TU Darmstadt Leiter des Fachgebiets „Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik“ und gleichzeitig Leiter des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF. Ab 2006 war er zudem Mitglied des Präsidiums der Fraunhofer-Gesellschaft und wurde im Jahr 2011 zum Vizepräsident für Wissens- und Technologietransfer der TU Darmstadt ernannt. Prof. Hanselka ist seit Oktober 2013 Präsident des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und ist zeitgleich Vizepräsident für den Forschungsbereich Energie bei der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren.

Sven Herold Groß-Umstadt, Deutschland

Uller Jarecki Berlin, Deutschland



Karl Heinz Kloos, Jahrgang 1930 studierte an der TH Darmstadt Maschinenbau. 1960 promovierte er mit dem Thema „Einfluss der Oberflächengrenzschicht auf das Reibungsverhalten austenitischer Werkstoffe bei der Kaltumformung im Tiefziehverfahren“. 1973 trat er die Nachfolge von Professor Dr. Heinrich Wiegand als Leiter des Fachgebietes und Instituts für Werkstoffkunde der Technischen Hochschule Darmstadt an, das er bis zu seiner Emeritierung 1995 führte. Seine Forschertätigkeit, insbesondere auf den Gebieten Ermüdungseigenschaften, Hochtemperatur-, Werkstoffverhalten und Tribologie, dokumentiert sich in rund 350 Veröffentlichungen.



Dr.-Ing. Michael Kübler studierte an der Hochschule Heilbronn im Studiengang Mechatronik und Mikrosystemtechnik. Nach seinem Studium war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Heilbronn tätig und promovierte 2010 an der TU Berlin an der Fakultät III Prozesswissenschaften im Institut für Werkstoffwissenschaften und -technologie auf dem Fachgebiet der Polymertechnik. Seit 2012 ist er für die LANXESS Deutschland GmbH im Geschäftsbereich High Performance Materials für die Material- und Bauteilprüftechnik zuständig.



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.



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.



Dr.-Ing. Andreas K. Müller studierte an der Hochschule Heilbronn im Studiengang Mechatronik- und Mikrosystemtechnik. Nach seinem Studium war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Heilbronn tätig und promovierte 2006 an der TU Ilmenau an der Fakultät für Maschinenbau auf dem Fachgebiet der Polymer-technik. Seit 2008 ist er für die DuPont de Nemours (Deutschland) GmbH im Geschäftsbereich Performance Polymers für die Verarbeitungs- und Anwendungstechnik zuständig.



Tamara Nestorovic 1989–1994 Studium des Maschinenbaus an der Universität in Niš, Serbien. 2001–2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Fakultät für Maschinenbau, Universität Niš. 2000 Masterabschluss, Regelungstechnik. 2001–2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Promotion an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 2005–2006 Projektleiterin, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF Magdeburg. 2006–2008 Projektleiterin, DFG Eigene Stelle, Otto-von-Guericke- Universität Magdeburg. Seit 2008 Universitätsprofessorin für Mechanik adaptiver Systeme, Ruhr-Universität Bochum. Seit 2015 Leiterin des Instituts für Computational Engineering, Ruhr-Universität Bochum. Forschungsschwerpunkte: Smart Structures and Systems, Regelungsmethoden für den Entwurf intelligenter Strukturen, Aktive Schwingungsreduktion, Optimierung und Identifikation, Structural Health Monitoring.



Rainer Nordmann wurde 1974 an der TU-Darmstadt zum Dr.-Ing. promoviert. Thema: Ein Verfahren zur Berechnung der Eigenwerte und Eigenformen großer Turbomaschinen. Von 1980–1995 war er Professor für Maschinendynamik an der Universität Kaiserslautern. Von 1995 bis 2008 leitete er an der TU Darmstadt das Fachgebiet für Mechatronik im Maschinenbau. Seine Forschungsarbeiten lagen im Bereich der Mechatronik für rotierende Maschinen.



Matthias Oechsner, geb. 1967, studierte von 1990–1995 Maschinenbau an der Universität Karlsruhe. Im Jahr 2000 promovierte er auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsbewertung von keramischen Wärmedämmschichtsystemen. Von 1997 bis 2010 war er in der Industrie in der Entwicklung und der Fertigung von stationären Gasturbinen in Deutschland, USA und China tätig. Seit 2010 ist er Leiter des Instituts für Werkstoffkunde und der Staatlichen Materialprüfungsanstalt an der Technischen Universität Darmstadt.

Michael Rhode Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Deutschland

Hans-Joachim Schulz Berlin, Deutschland



Helmut Schürmann, Jahrgang 1950, studierte Maschinenbau/Flugzeugbau an TU Braunschweig und promovierte an der Universität Kassel über das Thema „Gezielt eingebrachte Eigenspannungen in Faser-Kunststoff-Verbunde“. Er war Leiter einer Forschungs- und Entwicklungsabteilung eines deutschen Chemieunternehmens. 1994 erhielt er eine Professur an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau. Lehr- und Forschungsschwerpunkt seines Fachgebiets, das er bis 2016 leitete, war der Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Es wurden insbesondere Konstruktionsmethoden und Krafteinleitungsprobleme bearbeitet.



Karl Stephan 1959 Dr.-Ing. Universität (TH) Karlsruhe, 1963 Habilitation, 1963–1967 Leiter der Abteilung Wärme- und Strömungstechnik Mannesmann AG Duisburg. 1967–1970 ordentlicher Prof. an der Technischen Universität Berlin, 1970–1975 an der Ruhr-Universität Bochum. 1975–1996 o. Professor und Direktor des Instituts für Thermodynamik u. Thermische Verfahrenstechnik Universität Stuttgart, 1996 emeritiert. Zahlreiche Veröffentlichungen über Themen der Wärme- und Stoffübertragung und der Thermischen Verfahrenstechnik. Autor und Mitautor mehrerer Fachbücher. Zahlreiche wissenschaftliche Preise, Ehrendoktor der TU Berlin und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.



Peter Stephan studierte Maschinenwesen an der Technischen Universität München. Nach einem Forschungsaufenthalt als Marie-Curie-Stipendiat am Joint Research Centre Ispra wurde er 1992 promoviert. Von 1992 bis 1997 war er bei Daimler-Benz tätig. Seit 1997 ist er ordentlicher Professor für Technische Thermodynamik an der Technischen Universität Darmstadt. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf den Gebieten Verdampfung, Mikrowärmeübertragung, Grenzflächenphänomene, Wärmerohrtechnologie und Thermalanalyse. Er erhielt zahlreiche Preise für seine Arbeiten, u. a. 2012 den Nukiyama Memorial Award der Heat Transfer Society of Japan. Er ist Vorsitzender des Redaktionsausschusses des VDI-Wärmeatlas.



Joachim Villwock Studium der Luft- und Raumfahrttechnik an der TU Berlin. Promotion an der TU Berlin am 2. Institut für Mechanik. Ab 1997 in diversen Tätigkeiten bei Rolls-Royce Deutschland für die Entwicklung von Luftfahrtantrieben tätig. Seit 2004 Professor an der Beuth Hochschule (ehemals TFH) im Fachbereich Maschinenbau, Veranstaltungstechnik, Verfahrenstechnik. Vorlesungen über Mechanik, Maschinenelemente und Finite-Elemente Methoden.



Mathias Woydt, geb. 1963, studierte Werkstoffwissenschaften und Metallurgie an der Technische Universität Berlin, promovierte 1989 zum Dr.-Ing. an der Technischen Universität Berlin und war langjähriger Leiter des Fachgebietes „Tribologie und Verschleißschutz“ an der BAM. Das Innovationsmanagement für disruptive Technologie umfasste die Arbeitsschwerpunkte alternativer Schmierstoffe und Bioschmierstoffe, alternative Werkstoffe, Beschichtungen, Keramiken und Hartmetalle zum jeweiligen Stand der Technik sowie die Normung und Weiterentwicklung der Tribometrie, welche in über 51 Prioritätspatentanmeldung und in über 350 Publikationen niedergelegt sind. Verleihung des Award of Excellence der ASTM. Mitglied in Vorstand der Gesellschaft für Tribologie.

... 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 Monta-
gezeit*

mit autoglide 5 im
Vergleich zu einer
Standardlösung
mit Führungsrinnen

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



74%

Kosten senken.
Technik verbessern.



36



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