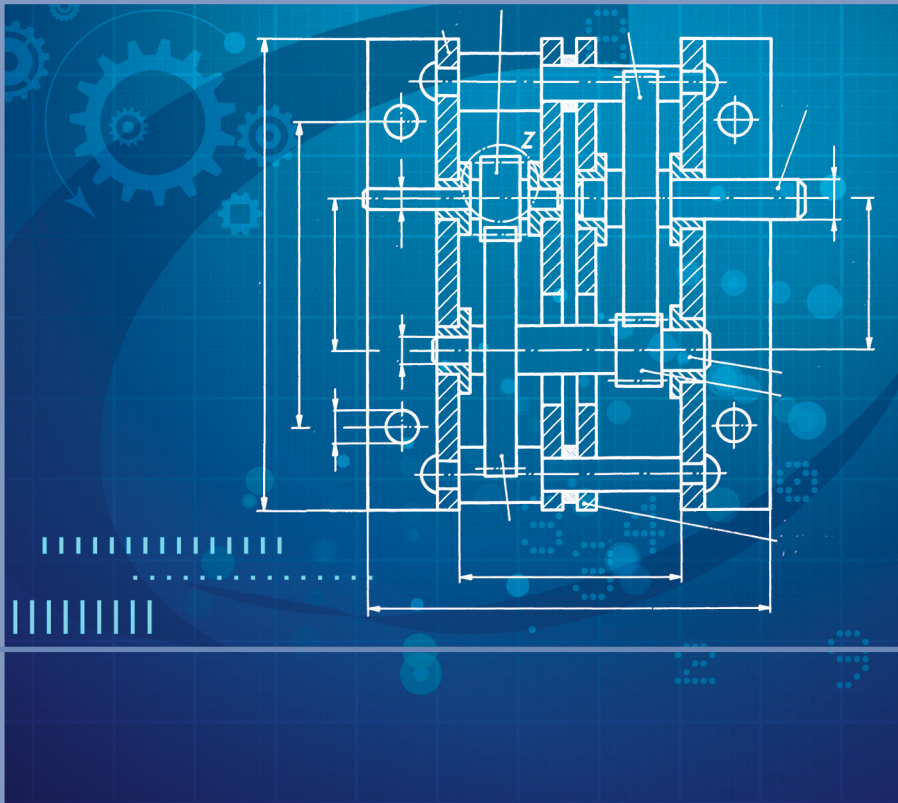


Werner Krause

# Konstruktions- elemente der Feinmechanik



4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Konstruktionselemente  
der Feinmechanik



Hrsg.

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Werner Krause

# Konstruktionselemente der Feinmechanik

4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

**Federführung:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Werner Krause

**Gesamtkonzeption:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Werner Krause

Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Schilling

Dr.-Ing. Gunhild Chilian, TU Ilmenau (Mitarbeit Abschnitt 2)

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach, TU Dresden (Abschnitt 14)

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Günter Höhne, TU Ilmenau (Abschnitt 1, 2, 4.1, 4.5)

Prof. Dr.-Ing. Dr. paed. Alfons Holfeld (†), TU Dresden (Abschnitt 3.3, 8.1, 8.2, 8.4)

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Werner Krause, TU Dresden (Abschnitt 1, 3.1 bis 3.4, 3.6, 4.2 bis 4.4, 7, 10, 13.1 bis 13.12, Mitarbeit 8.2, 11)

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Manfred Meissner, TU Ilmenau (Abschnitt 6)

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Thomas Nagel, TU Dresden (Abschnitt 13.9.4, Mitarbeit 13.9.2, 13.9.3)

Prof. Dr.-Ing. Günter Röhrs, TU Dresden (Abschnitt 5)

Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Schilling, TU Ilmenau (Abschnitt 1, 8.3, 9, 12, Mitarbeit 10.1)

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Universität Stuttgart (Abschnitt 3.5, 11)

Prof. Dr.-Ing. habil. Elke Simmchen, TU Dresden (Abschnitt 3.6)

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Horst Sperlich, TU Ilmenau (Abschnitt 2.1.3)

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

ISBN 978-3-446-44796-7

E-Book-ISBN 978-3-446-44992-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werks darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2018 Carl Hanser Verlag München

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg, Julia Stepp

Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, München

Umschlagkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

# Vorwort

Zur Feinwerktechnik gehören vorwiegend informationsverarbeitende Geräte und Anlagen der Mess- und Automatisierungstechnik, Datenverarbeitung und Rechentechnik, der Nachrichtentechnik, der Elektromechanik, Feinmechanik und Optik sowie Geräte der Produktionstechnik. Das Spektrum reicht von Produkten der Konsumgüterindustrie bis hin zu hochkomplizierten Anlagen in oft nur einmaliger Spezialausführung. Der Aufbau dieser Erzeugnisse erfolgt mit mechanischen, elektrischen, optischen, mikroelektronischen und optoelektronischen Bauelementen und Funktionsgruppen. Ständig wachsen die Anforderungen bezüglich Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Geräuschminderung bei steigenden Arbeitsgeschwindigkeiten und zunehmender Präzision.

In der Informationsverarbeitung werden mechanische Bauelemente mehr und mehr durch mikroelektronische verdrängt. Die Gerätefunktion wird damit programmierbar, und es steigen Flexibilität, Universalität, Funktionsumfang und Automatisierungsgrad. An der Geräteperipherie benötigt man zunehmend Baugruppen mit miniaturisierten und leistungsfähigen mechanischen Bauelementen; generell erzwingen die digitalen Verarbeitungsprinzipie der Mikroelektronik neue funktionelle Lösungen im mechanischen Bereich. Gemäß diesen Trends wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Konstruktionselementen weiterentwickelt und deren Betriebsverhalten optimiert. Es entstanden Gestaltungsrichtlinien, die auch den Erfordernissen einer automatisierten Montage entsprechen, und die rechnerunterstützte Dimensionierung rückt in den Vordergrund. Insgesamt verlangt die veränderte Bedeutung der feinmechanischen Konstruktionselemente auch ein neues, umfassendes Buch über dieses Gebiet. Das vorliegende Werk erfasst das gesamte Spektrum von der meist an große Stückzahlen gebundenen Miniaturmechanik bis hin zu Einzel-elementen der Präzisions-Großmechanik. Durch die stark verdichtete, z. T. tabellarische Aufbereitung soll ein schneller und zuverlässiger Zugriff zu Informationen und Fakten gesichert und der Einsatz von Rechnern für Auswahl, Berechnung und Entwurf der Elemente unterstützt werden. Berechnungsbeispiele am Ende der Hauptabschnitte ermöglichen ein rasches Einarbeiten in komplizierte Sachverhalte und tragen zugleich zum besseren Verständnis des Stoffes bei.

Das vorliegende Buch hat eine Reihe von Vorgängern, die kurz genannt und gewürdigt werden sollen.

Erste Schritte in Richtung einer Gesamtdarstellung unternahm im Jahre 1922 ein Ausschuss unter Leitung von *Otto Richter*; Ergebnis war der Atlas „Konstruktionselemente der Feinmechanik“, der 1928 als Loseblattsammlung gedruckt wurde. Er war eine Zusammenfassung erprobter Beispiele und bildete zugleich die Grundlage für das erstmalig 1929 von *Otto Richter* und *Richard von Voß* herausgegebene Buch „Bauelemente der Feinmechanik“. Es erschien über einen Zeitraum von nahezu 40 Jahren in vielen Ausgaben in deutscher und anderen Sprachen und ist in seiner Bedeutung für die Feinmechanik kaum zu überschätzen.

Die Feinmechanik entwickelte sich weiter; vor nunmehr 50 Jahren ließ sich eine Neubearbeitung des gesamten Gebietes nicht mehr aufschieben. Ziel war, neue Erkenntnisse zu berücksichtigen und vor allem eine stärkere mathematische Durchdringung der Bauelemente-Dimensionierung zu erreichen. Ein Autorenkollektiv unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. *Siegfried Hildebrand* übernahm diese anspruchsvolle Aufgabe, so dass im Jahre 1967 das Lehr- und Fachbuch „Feinmechanische Bauelemente“ im Verlag Technik Berlin erscheinen konnte. Es wurde später durch die Aufgabensammlung „Einführung in die feinmechanischen Konstruktionen“ ergänzt.

Drei Nachauflagen der „Feinmechanischen Bauelemente“ und vier Teilaufgaben beim Carl Hanser Verlag sind Zeichen der weitreichenden Anerkennung, die dieses Buch fand.

Vorliegender Titel wurde für Studierende an Universitäten, Hoch- und Fachhochschulen mit konstruktiven Studienrichtungen in feinwerktechnisch orientierten und angrenzenden Fachgebieten konzipiert; außerdem ist er als Fachbuch für Entwicklungs- und Konstruktionsingenieure, Technologen und Fertigungsmittelkonstrukteure gedacht, aber auch als Nachschlagewerk für Facharbeiter, Teilkonstrukteure und technische Zeichner geeignet.

Bei der Systematisierung und Aufbereitung der umfangreichen Stoffgebiete konnten die Erfahrungen namhafter Hochschullehrer und Wissenschaftler der TU Dresden, der TU Ilmenau, der TU Chemnitz und der Universität Stuttgart berücksichtigt werden. Den Herren Prof. Dr.-Ing. habil. *G. Höhne* und Prof. Dr.-Ing. habil. *M. Schilling* bin ich zu besonderem Dank verpflichtet. Für die Unterstützung bei der Ergänzung einer Reihe von Teilgebieten gebührt darüber hinaus den Herren Dr.-Ing. *U. Buhrand* (Abschnitt 13.10), Ing. *E. Frankenstein* (Abschnitt 13.3.3), Dr.-Ing. *P. Merbach* (Abschnitt 12), Dr.-Ing. *D. Metzner* und Dr.-Ing. *T. Nagel* (Abschnitt 13.9.4) sowie Dr.-Ing. *R. Nönnig* (Abschnitt 8.3.4) Dank und Anerkennung. Die zeichnerische Ausführung der Bilder lag in den bewährten Händen von Frau *R. Schmidt* und Frau *H. Weise*, deren engagierte Mitarbeit eine besondere Würdigung verdient.

Seit seinem Erscheinen im Jahre 1989 hatte die im Verlag Technik Berlin und im Carl Hanser Verlag München/Wien herausgegebene 1. Auflage des Buches ein weithin positives Echo gefunden. Viele Einschätzungen von Fachkollegen der Industrie sowie von Universitäten und Hochschulen bestätigten, dass mit der Neufassung des Gesamtgebiets der Konstruktionselemente der Feinmechanik eine gute Synthese von Lehr- und Fachbuch gelungen ist.

Die 1. Auflage war bald vergriffen, so dass eine 2. stark bearbeitete Auflage erforderlich wurde. Sie trug vor allem den Bedingungen Rechnung, die sich aus der 1990 vollzogenen Vereinigung Deutschlands ergaben und die nunmehr einheitliche Orientierung aller Stoffgebiete auf DIN- und DIN-ISO-Normen sowie auf VDI/VDE-Richtlinien erforderte. Diese Auflage war nun ebenfalls vergriffen, so dass sich Verlag und Herausgeber im Jahr 2004 zu einer 3. Auflage entschlossen hatten. Wegen der raschen Entwicklung wurden darin die Kapitel zum Rechnereinsatz sowie zur Mikromechanik neu bearbeitet, weitere inhaltliche Ergänzungen vorgenommen und in den Literaturverzeichnissen aktuelle Bücher und Zeitschriftenaufsätze hinzugefügt. Darüber hinaus fanden neue DIN- und DIN ISO-Normen Berücksichtigung.

Die anhaltende Nachfrage nach diesem Buch, vor allem aber die Ablösung vieler bisher geltender DIN-Normen durch europäische EN-Normen erforderte eine 4. Auflage. In dieser wurden über das Kapitel 3.6 Konstruktionswerkstoffe hinaus alle Gebiete bezüglich der Werkstoffangaben und -bezeichnungen auf den neuesten Stand gebracht. Dies ergab unter anderem bei Weichloten, Hartloten und Klebstoffen ebenso wie bei Federn, Gleitlagern und Zahnrädern wesentliche inhaltliche Veränderungen. Aber auch eine ganze Reihe von Verbindungselementen sowie Riemen- und Zahnriemengetriebe waren an neue Normen anzupassen. Insgesamt führte dies zugleich dazu,

die zugehörigen und in tabellarischen Übersichten aufgeführten Normen und VDI/VDE-Richtlinien generell neu zu fassen. Außerdem wurden die Ausführungen zum Entwerfen und Gestalten von Konstruktionselementen, speziell zum Rechnereinsatz und zur Mikromechanik, nochmals aktualisiert, gleichermaßen auch die jedem Kapitel beigefügten Literaturverzeichnisse. Wesentliche, ältere Veröffentlichungen blieben aber bewusst erhalten, um zugleich den Erkenntnisfortschritt auf den einzelnen Gebieten zu dokumentieren. Dank vielfältiger Erfahrungen beim Einsatz dieses Buches in Lehre und Praxis gelang es nicht zuletzt, eine Reihe von inhaltlichen Ergänzungen zur Berechnung und Gestaltung von Verbindungs- und Funktionselementen sowie methodisch verbesserte Darstellungen einzuarbeiten.

Vor allem aber wurde es durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger OCR-Software möglich, das ursprünglich im Lichtsatz hergestellte Buch zu digitalisieren und in einem neuen größeren Handbuchformat zu setzen. Dadurch ist es zugleich gelungen, den doch sehr umfangreichen und komplexen Inhalt noch übersichtlicher zu gestalten. Aber auch bei weiteren Auflagen eröffnet sich jetzt die Möglichkeit, Änderungen und Erweiterungen viel einfacher einzuordnen. Insgesamt liegt damit nun eine vollständig neu bearbeitete 4. Auflage vor.

Allen Mitautoren danke ich für die bewährte kollegiale Zusammenarbeit bei der Vorbereitung dieser 4. Auflage. In erster Linie aber gilt mein Dank dem Leiter des Hanser-Fachbuchverlages, Herrn Dr. *Hermann Riedel* und dem Lektor für den Bereich Technik, Herrn *Volker Herzberg*. Auf Grund ihres unermüdlichen Einsatzes sowie auch dem bemerkenswerten Engagement der Herstellungsabteilung ist es gelungen, dass das Buch in dieser neuen Form erscheinen konnte.

Dresden

*Werner Krause*





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Charakterisierung und Systematik der Konstruktionselemente</b> .....	<b>1</b>
Literatur zum Abschnitt 1 und Grundlagenliteratur zu den Abschnitten 2 bis 14 .....	6
<b>2 Entwerfen und Gestalten von Konstruktionselementen</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Arbeitsschritte und Methoden</b> .....	<b>12</b>
2.1.1 Ermitteln und Präzisieren von Konstruktionsaufgaben .....	12
2.1.2 Prinzipbestimmung für Konstruktionselemente .....	13
2.1.3 Gestalten von Konstruktionselementen .....	18
2.1.3.1 Grundsätze .....	19
2.1.3.2 Auswahl der Form .....	20
2.1.3.3 Auswahl der Werkstoffe .....	21
2.1.3.4 Festlegen der Zustandseigenschaften .....	22
2.1.3.5 Einflussfaktoren auf die Gestalt .....	22
2.1.3.6 Vorgehensweise beim Gestalten .....	28
2.1.4 Bewerten und Auswählen von Konstruktionselementen .....	30
<b>2.2 Rechnerunterstütztes Konstruieren</b> .....	<b>33</b>
2.2.1 Rechneinsatz in der Produktentwicklung .....	33
2.2.2 Rechnerunterstützter Entwurf .....	38
2.2.3 Rechnerunterstützte Dimensionierung .....	44
Literatur zum Abschnitt 2 .....	49
<b>3 Grundlagen zur Dimensionierung von Konstruktionselementen</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1 Normzahlen und Normmaße</b> .....	<b>54</b>
3.1.1 Normzahlen .....	54
3.1.2 Normmaße .....	57
3.1.3 Berechnungsbeispiele .....	58
Literatur zum Abschnitt 3.1 .....	60
<b>3.2 Toleranzen und Passungen</b> .....	<b>60</b>
3.2.1 Toleranzen .....	60
3.2.1.1 Grundbegriffe .....	61
3.2.1.2 ISO-Toleranzen .....	63
3.2.1.3 Maße ohne Toleranzangabe, frei tolerierte Maße .....	68
3.2.1.4 Form- und Lagetoleranzen .....	71
3.2.1.5 Oberflächenrauheit und deren Kennzeichnung .....	74
3.2.2 Passungen .....	79
3.2.2.1 Grundbegriffe .....	81
3.2.2.2 Passungsauswahl .....	90

3.2.3	Einfluss der Temperatur auf Toleranz und Passung .....	91
3.2.4	Maß- und Toleranzketten .....	93
3.2.5	Toleranz- und passungsgerechtes Gestalten .....	95
3.2.6	Berechnungsbeispiele .....	98
	Literatur zum Abschnitt 3.2 .....	100
<b>3.3</b>	<b>Statik .....</b>	<b>101</b>
3.3.1	Kräfte an starren Körpern .....	102
3.3.2	Reibung .....	108
3.3.2.1	Ruhreibung (Haftreibung) .....	108
3.3.2.2	Reibungszustände .....	109
3.3.2.3	Gleitreibung .....	111
3.3.2.4	Rollreibung .....	116
3.3.2.5	Bohrreibung .....	117
3.3.2.6	Umschlingungsreibung (Seilreibung) .....	118
3.3.3	Berechnungsbeispiele .....	119
<b>3.4</b>	<b>Dynamik .....</b>	<b>122</b>
3.4.1	Kinematik .....	123
3.4.2	Kinetik .....	123
3.4.3	Mechanische Schwingungen .....	124
3.4.3.1	Torsionsschwingungen .....	125
3.4.3.2	Biegeschwingungen .....	126
3.4.3.3	Gedämpfte und getilgte Schwingungen .....	129
3.4.3.4	Erzwungene Schwingungen .....	129
<b>3.5</b>	<b>Festigkeitslehre .....</b>	<b>129</b>
3.5.1	Grundbegriffe .....	132
3.5.2	Ermittlung der Nennspannungen .....	134
3.5.2.1	Beanspruchung durch Kräfte .....	135
3.5.2.2	Beanspruchung durch Momente .....	142
3.5.2.3	Zusammengesetzte Beanspruchung .....	151
3.5.3	Ermittlung der zulässigen Spannungen .....	154
3.5.3.1	Werkstoffkenngrößen .....	154
3.5.3.2	Einflussfaktoren auf die Werkstofffestigkeit .....	157
3.5.3.3	Festigkeitsnachweis .....	160
3.5.4	Berechnungsbeispiele .....	163
	Literatur zu den Abschnitten 3.3 bis 3.5 .....	167
<b>3.6</b>	<b>Konstruktionswerkstoffe .....</b>	<b>168</b>
3.6.1	Kriterien für die Werkstoffauswahl .....	169
3.6.2	Metallische Werkstoffe .....	170
3.6.2.1	Eisenwerkstoffe .....	171
3.6.2.2	Nichteisenmetall-Werkstoffe .....	173
3.6.2.3	Metallische Sinterwerkstoffe .....	182
3.6.3	Nichtmetallische Werkstoffe .....	182
3.6.3.1	Kunststoffe .....	182
3.6.3.2	Silicatische Werkstoffe .....	187
3.6.3.3	Naturstoffe .....	187
3.6.4	Halbzeuge und Normteile, technologische Innovationen .....	188
	Literatur zum Abschnitt 3.6 .....	194

<b>4</b>	<b>Mechanische Verbindungen</b>	<b>199</b>
4.1	<b>Eigenschaften, Einteilung und Auswahl</b>	<b>199</b>
	Literatur zu den Abschnitten 4.1 und 4.5	204
4.2	<b>Stoffschlüssige Verbindungen</b>	<b>205</b>
4.2.1	Schweißverbindungen	206
4.2.1.1	Schweißverfahren, Eigenschaften und Anwendung	207
4.2.1.2	Werkstoffe	215
4.2.1.3	Berechnung	219
4.2.1.4	Konstruktive Gestaltung	221
4.2.1.5	Berechnungsbeispiele	231
	Literatur zum Abschnitt 4.2.1	234
4.2.2	Lötverbindungen	237
4.2.2.1	Lötverfahren, Eigenschaften und Anwendung	237
4.2.2.2	Werkstoffe	239
4.2.2.3	Berechnung	243
4.2.2.4	Konstruktive Gestaltung	245
4.2.2.5	Berechnungsbeispiele	250
	Literatur zum Abschnitt 4.2.2	251
4.2.3	Einschmelzverbindungen	252
4.2.3.1	Verfahren, Eigenschaften und Anwendung	252
4.2.3.2	Werkstoffe	253
4.2.3.3	Berechnung	254
4.2.3.4	Konstruktive Gestaltung	255
	Literatur zum Abschnitt 4.2.3	256
4.2.4	Klebsverbindungen	256
4.2.4.1	Klebsverfahren, Eigenschaften und Anwendung	256
4.2.4.2	Werkstoffe	257
4.2.4.3	Berechnung	259
4.2.4.4	Konstruktive Gestaltung	260
4.2.4.5	Berechnungsbeispiel	263
	Literatur zum Abschnitt 4.2.4	265
4.2.5	Kittverbindungen	266
4.2.5.1	Verfahren, Eigenschaften und Anwendung	266
4.2.5.2	Werkstoffe	266
4.2.5.3	Berechnung	267
4.2.5.4	Konstruktive Gestaltung	267
	Literatur zum Abschnitt 4.2.5	269
4.3	<b>Formschlüssige Verbindungen</b>	<b>269</b>
4.3.1	Nietverbindungen	271
4.3.1.1	Verfahren, Eigenschaften und Anwendung	271
4.3.1.2	Nietformen	273
4.3.1.3	Berechnung	275
4.3.1.4	Konstruktive Gestaltung	277
4.3.1.5	Berechnungsbeispiel	282
4.3.2	Stift- und Bolzenverbindungen	283
4.3.2.1	Eigenschaften und Anwendung	283
4.3.2.2	Stiftformen	284
4.3.2.3	Berechnung	287
4.3.2.4	Konstruktive Gestaltung	288
4.3.2.5	Berechnungsbeispiel	290

4.3.3	Feder- und Profilwellenverbindungen .....	291
4.3.3.1	Einteilung, Eigenschaften und Anwendung .....	292
4.3.3.2	Berechnung .....	294
4.3.3.3	Konstruktive Gestaltung .....	295
4.3.3.4	Berechnungsbeispiel .....	296
4.3.4	Bördelverbindungen .....	297
4.3.5	Sickenverbindungen .....	299
4.3.6	Lapp- und Schränkverbindungen .....	301
4.3.7	Falz- und Einrollverbindungen .....	304
4.3.8	Blechsteppverbindungen .....	306
4.3.9	Einspreizverbindungen .....	307
4.3.10	Einbettverbindungen .....	311
	Literatur zum Abschnitt 4.3 .....	314
<b>4.4</b>	<b>Kraftschlüssige Verbindungen .....</b>	<b>316</b>
4.4.1	Einpressverbindungen .....	319
4.4.1.1	Einteilung, Eigenschaften und Anwendung .....	319
4.4.1.2	Berechnung .....	321
4.4.1.3	Konstruktive Gestaltung .....	324
4.4.1.4	Berechnungsbeispiel .....	327
4.4.2	Verpress- und Quetschverbindungen .....	328
4.4.3	Keilverbindungen .....	330
4.4.3.1	Einteilung, Eigenschaften und Anwendung .....	330
4.4.3.2	Berechnung .....	331
4.4.3.3	Konstruktive Gestaltung .....	332
4.4.3.4	Berechnungsbeispiel .....	333
4.4.4	Schraubenverbindungen .....	334
4.4.4.1	Gewindearten .....	335
4.4.4.2	Berechnung .....	337
4.4.4.3	Schrauben, Muttern, Zubehör .....	342
4.4.4.4	Konstruktive Gestaltung, Schraubensicherungen .....	346
4.4.4.5	Berechnungsbeispiele .....	356
4.4.5	Klemmverbindungen .....	358
4.4.6	Renkverbindungen .....	361
	Literatur zum Abschnitt 4.4 .....	363
<b>4.5</b>	<b>Schachtelverbindungen .....</b>	<b>366</b>
<b>5</b>	<b>Elektrische Leitungsverbindungen .....</b>	<b>371</b>
5.1	Funktion und Aufbau .....	371
5.2	Stoffschlüssige Verbindungen .....	372
5.3	Kraftschlüssige Verbindungen .....	375
5.3.1	Quetsch- oder Crimp-Verbindungen .....	375
5.3.2	Klemmverbindungen .....	376
5.3.2.1	Schraubenklemmverbindungen .....	376
5.3.2.2	Federklemmverbindungen .....	377
5.3.3	Wickelverbindungen .....	381
	Literatur zum Abschnitt 5 .....	383
<b>6</b>	<b>Federn .....</b>	<b>385</b>
6.1	Grundlagen des Federentwurfs .....	388
6.1.1	Vorgehen beim Entwurf .....	388

6.1.2	Federkennlinie, Federarbeit .....	389
6.1.3	Berechnungshilfen und Optimierung .....	391
<b>6.2</b>	<b>Berechnung .....</b>	<b>392</b>
6.2.1	Biegefedern .....	392
6.2.2	Torsionsfedern .....	399
6.2.3	Bimetallfedern (Thermobimetalle) .....	401
6.2.4	Nichtmetallische Federn .....	402
6.2.4.1	Gummifedern .....	402
6.2.4.2	Kunststoff-, Glas-, Gas- und Flüssigkeitsfedern .....	404
6.2.5	Federsysteme .....	404
<b>6.3</b>	<b>Werkstoffe .....</b>	<b>405</b>
6.3.1	Anforderungen .....	405
6.3.2	Beanspruchungsgrenzen .....	407
6.3.3	Verarbeitung .....	407
<b>6.4</b>	<b>Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen .....</b>	<b>408</b>
6.4.1	Gestaltungsgrundsätze .....	408
6.4.2	Ausführungsformen .....	408
<b>6.5</b>	<b>Betriebsverhalten von Feder-Masse-Systemen .....</b>	<b>415</b>
6.5.1	Belastungs-Zeit-Verhalten .....	415
6.5.2	Schwingend belastete Feder, Eigenkreisfrequenz .....	415
6.5.3	Feder unter Stoßbelastung .....	415
6.5.4	Einflussgrößen .....	416
6.5.5	Federantriebe .....	416
<b>6.6</b>	<b>Berechnungsbeispiele .....</b>	<b>418</b>
	Literatur zum Abschnitt 6 .....	421
<b>7</b>	<b>Achsen und Wellen, Wellendichtungen .....</b>	<b>425</b>
7.1	Beanspruchungen .....	426
7.2	Entwurfsberechnung .....	427
7.2.1	Überschlägliche Bestimmung des Achsendurchmessers .....	427
7.2.2	Überschlägliche Bestimmung des Wellendurchmessers .....	428
7.3	Nachrechnung .....	429
7.3.1	Nachrechnung der vorhandenen Spannungen .....	429
7.3.2	Nachrechnung der Verformung .....	431
7.3.3	Schwingungsberechnung .....	433
<b>7.4</b>	<b>Konstruktive Gestaltung, Werkstoffe .....</b>	<b>434</b>
7.4.1	Konstruktive Gestaltung .....	434
7.4.1.1	Grundform von Achsen und Wellen .....	434
7.4.1.2	Sonderformen .....	435
7.4.2	Werkstoffe .....	436
<b>7.5</b>	<b>Welle-Nabe-Verbindungen .....</b>	<b>437</b>
7.5.1	Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen .....	437
7.5.2	Kraftschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen .....	438
<b>7.6</b>	<b>Wellendichtungen .....</b>	<b>438</b>
7.6.1	Dichtungen für Drehbewegungen .....	439
7.6.2	Dichtungen für Längsbewegungen .....	441
7.6.3	Dichtungen für Dreh- und Längsbewegungen bei unterschiedlichen Drücken (Vakuumdichtungen) .....	442

7.6.4	Dichtungen für Längs-, Winkel- und Drehbewegungen ohne Stopfbuchse (für Vakuum) .....	443
	Literatur zum Abschnitt 7 .....	444
<b>8</b>	<b>Lager und Führungen .....</b>	<b>447</b>
<b>8.1</b>	<b>Grundlagen zu Reibung und Verschleiß .....</b>	<b>447</b>
<b>8.2</b>	<b>Lager .....</b>	<b>451</b>
8.2.1	Hydrodynamische Gleitlager .....	453
8.2.1.1	Berechnung .....	455
8.2.1.2	Konstruktive Gestaltung .....	458
8.2.1.3	Werkstoffe .....	459
8.2.2	Sintermetall-Lager .....	460
8.2.3	Verschleißlager mit zylindrischen Zapfen .....	462
8.2.3.1	Berechnung .....	463
8.2.3.2	Konstruktive Gestaltung .....	465
8.2.3.3	Werkstoffe .....	468
8.2.3.4	Kunststoffgleitlager .....	470
8.2.3.5	Kunstkohlegleitlager .....	472
8.2.4	Lager mit kegelförmigen Zapfen .....	473
8.2.4.1	Berechnung .....	474
8.2.4.2	Konstruktive Gestaltung .....	474
8.2.5	Axialgleitlager .....	476
8.2.5.1	Planspurlager (Ringspurlager) .....	476
8.2.5.2	Kugelspurlager .....	477
8.2.6	Spitzenlager .....	478
8.2.6.1	Berechnung .....	478
8.2.6.2	Konstruktive Gestaltung .....	482
8.2.6.3	Werkstoffe .....	484
8.2.7	Stoßsicherungen .....	484
8.2.8	Wälzlager .....	486
8.2.8.1	Aufbau und Eigenschaften .....	486
8.2.8.2	Ausführungsformen, Anwendung .....	486
8.2.8.3	Berechnung .....	492
8.2.8.4	Einbaurichtlinien .....	496
8.2.9	Schneidenlager .....	499
8.2.9.1	Berechnung .....	500
8.2.9.2	Konstruktive Gestaltung .....	501
8.2.9.3	Werkstoffe .....	503
8.2.10	Federlager .....	503
8.2.10.1	Biegefedergelenke .....	503
8.2.10.2	Torsionsfedergelenke .....	505
8.2.11	Strömungslager (Luftlager) .....	507
8.2.11.1	Berechnung .....	510
8.2.11.2	Konstruktive Gestaltung .....	513
8.2.11.3	Werkstoffe .....	514
8.2.12	Magnetlager .....	514
8.2.12.1	Wirkprinzip .....	514
8.2.12.2	Luftspaltlager .....	514
8.2.12.3	Magnetisch entlastete Lager .....	517
8.2.12.4	Magnetflüssigkeitslager .....	518
8.2.13	Berechnungsbeispiele .....	520
	Literatur zu den Abschnitten 8.1 und 8.2 .....	522

<b>8.3</b>	<b>Führungen</b>	<b>524</b>
8.3.1	Bauarten, Eigenschaften, Konstruktionsgrundsätze	525
8.3.2	Gleitführungen	528
8.3.2.1	Verkanten von Führungen	528
8.3.2.2	Zwangfreie Führungen	530
8.3.2.3	Bauarten von Gleitführungen	532
8.3.3	Wälzführungen	535
8.3.3.1	Grundlagen	535
8.3.3.2	Bauarten von Wälzführungen	536
8.3.4	Federführungen	540
8.3.4.1	Bauarten und Eigenschaften	541
8.3.4.2	Bewegungsverhalten	542
8.3.4.3	Konstruktive Gestaltung	545
8.3.5	Strömungsführungen (Luftführungen)	548
8.3.5.1	Bauarten von Luftführungen	548
8.3.5.2	Auslegung und Eigenschaften von Luftführungen	550
8.3.5.3	Konstruktionshinweise	551
8.3.6	Entlastete Führungen	552
8.3.7	Geradführungen mit Hilfe von Getrieben	554
8.3.8	Berechnung und Werkstoffwahl	556
	Literatur zum Abschnitt 8.3	559
<b>8.4</b>	<b>Schmierung</b>	<b>560</b>
8.4.1	Schmierstoffe	561
8.4.1.1	Schmieröle	561
8.4.1.2	Schmierfette	564
8.4.1.3	Festkörperschmierstoffe	565
8.4.2	Reibungs- und verschleißmindernde Schichten	565
8.4.3	Schmierverfahren	568
	Literatur zum Abschnitt 8.4	572
<b>9</b>	<b>Gehemme und Gesperre</b>	<b>575</b>
<b>9.1</b>	<b>Gehemme</b>	<b>577</b>
9.1.1	Formgehemme (Rastungen)	577
9.1.1.1	Berechnung	577
9.1.1.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	581
9.1.2	Reibgehemme (Klemmungen)	583
9.1.2.1	Berechnung	584
9.1.2.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	585
<b>9.2</b>	<b>Gesperre</b>	<b>589</b>
9.2.1	Formgesperre	589
9.2.1.1	Berechnung	589
9.2.1.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	590
9.2.2	Reibgesperre	594
9.2.2.1	Berechnung	594
9.2.2.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	595
	Literatur zum Abschnitt 9	597
<b>10</b>	<b>Anschläge, Bremsen und Dämpfer</b>	<b>599</b>
<b>10.1</b>	<b>Anschläge</b>	<b>600</b>
10.1.1	Bauarten und Eigenschaften	601
10.1.2	Berechnung	602



10.1.3	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	603
10.1.4	Betriebsverhalten	608
10.1.5	Berechnungsbeispiele	609
<b>10.2</b>	<b>Bremsen</b>	<b>610</b>
10.2.1	Bauarten und Eigenschaften	610
10.2.2	Berechnung	611
10.2.3	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	613
10.2.4	Betriebsverhalten	618
10.2.5	Berechnungsbeispiele	619
<b>10.3</b>	<b>Dämpfer</b>	<b>621</b>
10.3.1	Bauarten und Eigenschaften	621
10.3.2	Berechnung	623
10.3.3	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	625
10.3.4	Betriebsverhalten spezieller Dämpfer, Berechnungsbeispiel	630
	Literatur zum Abschnitt 10	631
<b>11</b>	<b>Kupplungen</b>	<b>633</b>
<b>11.1</b>	<b>Bauarten, Eigenschaften und Anwendung</b>	<b>635</b>
<b>11.2</b>	<b>Feste Kupplungen</b>	<b>636</b>
11.2.1	Berechnung	636
11.2.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	637
11.2.3	Betriebsverhalten	640
<b>11.3</b>	<b>Ausgleichskupplungen</b>	<b>640</b>
11.3.1	Berechnung	640
11.3.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	641
11.3.3	Betriebsverhalten	649
<b>11.4</b>	<b>Schaltbare Kupplungen</b>	<b>652</b>
11.4.1	Berechnung	652
11.4.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	654
11.4.3	Betriebsverhalten	660
<b>11.5</b>	<b>Selbstschaltende Kupplungen</b>	<b>663</b>
11.5.1	Berechnung	663
11.5.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	664
11.5.3	Betriebsverhalten	668
<b>11.6</b>	<b>Werkstoffe</b>	<b>669</b>
<b>11.7</b>	<b>Berechnungsbeispiele</b>	<b>671</b>
	Literatur zum Abschnitt 11	675
<b>12</b>	<b>Spann-, Schritt- und Sprungwerke</b>	<b>679</b>
<b>12.1</b>	<b>Spannwerke</b>	<b>679</b>
12.1.1	Sperrspannwerke	679
12.1.2	Kippspannwerke	681
<b>12.2</b>	<b>Schrittwerke</b>	<b>683</b>
<b>12.3</b>	<b>Sprungwerke</b>	<b>686</b>
12.3.1	Sperrsprungwerke	686
12.3.2	Kippsprungwerke	690

<b>12.4 Hinweise zur Dimensionierung, Beispiele</b> .....	<b>693</b>
Literatur zum Abschnitt 12 .....	694
<b>13 Getriebe</b> .....	<b>695</b>
<b>13.1 Einteilung der Getriebe</b> .....	<b>695</b>
Literatur zum Abschnitt 13.1 .....	700
<b>13.2 Zahnradgetriebe-Übersicht</b> .....	<b>701</b>
13.2.1 Übersetzung, Zähnezahlerhältnis, Momentenverhältnis .....	702
13.2.2 Allgemeine Verzahnungsgeometrie .....	704
13.2.2.1 Grundgesetze der Verzahnung .....	704
13.2.2.2 Konstruktion von Gegenprofil und Eingriffslinie .....	706
13.2.2.3 Zahnfußflanke, relative Kopfbahn und unbrauchbare Flankenabschnitte .....	707
13.2.2.4 Bezeichnungen und Bestimmungsgrößen an Zahnrädern .....	708
13.2.3 Bauformen von Zahnradgetrieben .....	709
<b>13.3 Stirnradgetriebe mit nichtevolventischer Verzahnung</b> .....	<b>713</b>
13.3.1 Zykloidenverzahnung .....	714
13.3.1.1 Zahnform .....	714
13.3.1.2 Eingriffsverhältnisse und Überdeckung .....	716
13.3.1.3 Tragfähigkeit, Eigenschaften und Anwendung .....	716
13.3.2 Triebstockverzahnung .....	717
13.3.2.1 Zahnform .....	717
13.3.2.2 Eingriffsverhältnisse und Überdeckung .....	718
13.3.2.3 Tragfähigkeit, Eigenschaften und Anwendung .....	718
13.3.3 Kreisbogenverzahnung (Pseudozykloidenverzahnung, Uhrwerkverzahnung) .....	719
13.3.3.1 Zahnformen .....	719
13.3.3.2 Eingriffsverhältnisse und Überdeckung .....	721
13.3.3.3 Tragfähigkeit, Eigenschaften und Anwendung .....	723
Literatur zum Abschnitt 13.3 .....	724
<b>13.4 Stirnradgetriebe mit Evolventenverzahnung</b> .....	<b>725</b>
13.4.1 Zahnform .....	730
13.4.2 Bezugsprofil und Verzahnungsgrößen .....	733
13.4.3 Eingriffsverhältnisse und Überdeckung .....	735
13.4.4 Unterschnitt und Grenzzähnezahl .....	738
13.4.5 Profilverschobene Verzahnung .....	740
13.4.6 Schrägverzahnung .....	745
13.4.7 Innenverzahnung .....	750
13.4.8 Grenzen der Verzahnungsgeometrie, extrem kleine Zähnezahlen .....	751
13.4.9 Hochübersetzende Stirnradgetriebe, Umlaufrädergetriebe .....	753
13.4.9.1 Stirnradstandgetriebe .....	754
13.4.9.2 Umlaufrädergetriebe .....	756
13.4.10 Verzahnungstoleranzen und Getriebepassungen, Zeichnungsangaben .....	762
13.4.10.1 Verzahnungstoleranzen .....	763
13.4.10.2 Getriebepassungen .....	765
13.4.10.3 Zeichnungsangaben .....	768
13.4.11 Tragfähigkeitsberechnung .....	769
13.4.11.1 Begriffe der Tragfähigkeit .....	770
13.4.11.2 Zahnkräfte .....	771
13.4.11.3 Entwurfsberechnung .....	773
13.4.11.4 Nachrechnung der Zahnfußtragfähigkeit .....	774

13.4.11.5	Nachrechnung der Zahnflankentragfähigkeit .....	778
13.4.11.6	Berechnung von Kunststoffzahnradern (nach VDI-Richtlinie 2736, Bl. 2) .....	779
13.4.12	Zahnradwerkstoffe, Schmierung .....	784
13.4.13	Konstruktive Gestaltung, spielfreie Verzahnung .....	786
13.4.14	Betriebsverhalten .....	795
13.4.14.1	Drehwinkelübertragungsabweichung .....	795
13.4.14.2	Verlustleistung und Wirkungsgrad .....	799
13.4.14.3	Geräuschverhalten .....	803
13.4.15	Herstellung der Zahnräder .....	805
13.4.16	Berechnungsbeispiele .....	810
	Literatur zu den Abschnitten 13.2 und 13.4 .....	818
<b>13.5</b>	<b>Schraubenstirnradgetriebe .....</b>	<b>821</b>
13.5.1	Geometrische Beziehungen .....	823
13.5.2	Eingriffsverhältnisse und Überdeckung .....	826
13.5.3	Profilverschiebung .....	827
13.5.4	Tragfähigkeitsberechnung .....	828
13.5.5	Werkstoffe, Schmierung, Gestaltung, Toleranzen .....	830
13.5.6	Verlustleistung und Wirkungsgrad .....	830
13.5.7	Berechnungsbeispiel .....	831
	Literatur zum Abschnitt 13.5 .....	834
<b>13.6</b>	<b>Schneckengetriebe .....</b>	<b>835</b>
13.6.1	Paarungsarten und Flankenformen .....	836
13.6.2	Geometrische Beziehungen .....	841
13.6.3	Eingriffsverhältnisse und Überdeckung .....	844
13.6.4	Tragfähigkeitsberechnung .....	845
13.6.5	Werkstoffe, Schmierung, Gestaltung, Toleranzen .....	846
13.6.6	Verlustleistung und Wirkungsgrad .....	848
13.6.7	Berechnungsbeispiel .....	850
	Literatur zum Abschnitt 13.6 .....	852
<b>13.7</b>	<b>Kegelrad- und Kronenradgetriebe .....</b>	<b>853</b>
13.7.1	Kegelradgetriebe mit Geradverzahnung .....	856
13.7.1.1	Geometrische Beziehungen .....	857
13.7.1.2	Profilverschiebung .....	859
13.7.1.3	Eingriffsverhältnisse und Überdeckung .....	860
13.7.1.4	Tragfähigkeitsberechnung .....	861
13.7.1.5	Werkstoffe, Schmierung, Gestaltung, Toleranzen .....	861
13.7.1.6	Verlustleistung und Wirkungsgrad .....	862
13.7.2	Kronenradgetriebe .....	862
	Literatur zum Abschnitt 13.7 .....	863
<b>13.8</b>	<b>Reibkörpergetriebe .....</b>	<b>864</b>
13.8.1	Bauarten, Eigenschaften und Anwendung .....	866
13.8.2	Berechnung .....	867
13.8.2.1	Geometrische Beziehungen und Geschwindigkeiten .....	867
13.8.2.2	Kräfte und Tragfähigkeit .....	870
13.8.3	Werkstoffe, Schmierung .....	872
13.8.4	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen .....	874
13.8.5	Betriebsverhalten .....	881
13.8.6	Berechnungsbeispiel .....	882
	Literatur zum Abschnitt 13.8 .....	883

<b>13.9 Zugmittelgetriebe</b> .....	<b>884</b>
13.9.1 Bauarten .....	887
13.9.2 Seil-, Band- und Flachriemengetriebe .....	888
13.9.2.1 Eigenschaften und Anwendung .....	889
13.9.2.2 Berechnung .....	889
13.9.2.3 Zugmittelarten, Werkstoffe .....	896
13.9.2.4 Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen .....	898
13.9.2.5 Verlustleistung und Wirkungsgrad .....	903
13.9.3 Keilriemen- und Rundriemengetriebe .....	904
13.9.3.1 Eigenschaften und Anwendung .....	904
13.9.3.2 Berechnung .....	905
13.9.3.3 Zugmittelarten, Werkstoffe .....	908
13.9.3.4 Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen .....	909
13.9.3.5 Verlustleistung und Wirkungsgrad .....	911
13.9.4 Zahnriemengetriebe .....	911
13.9.4.1 Eigenschaften und Anwendung .....	911
13.9.4.2 Werkstoffe, Geometrie und Aufbau .....	914
13.9.4.3 Profilgeometrien .....	919
13.9.4.4 Allgemeingültige Hinweise zur Dimensionierung .....	921
13.9.4.5 Dimensionierung entsprechend der Belastung .....	923
13.9.4.6 Vorspannung .....	928
13.9.4.7 Betriebsverhalten .....	930
13.9.5 Kettengetriebe .....	938
13.9.5.1 Eigenschaften und Anwendung .....	938
13.9.5.2 Berechnung .....	939
13.9.5.3 Kettenarten, Werkstoffe, Schmierung .....	942
13.9.5.4 Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen .....	944
13.9.5.5 Verlustleistung und Wirkungsgrad .....	947
13.9.6 Berechnungsbeispiel .....	948
Literatur zum Abschnitt 13.9 .....	949
<b>13.10 Schraubengetriebe</b> .....	<b>952</b>
13.10.1 Bauarten, Eigenschaften und Anwendung .....	953
13.10.2 Berechnung .....	953
13.10.2.1 Kinematik und geometrische Beziehungen .....	953
13.10.2.2 Kräfte und Tragfähigkeit .....	956
13.10.3 Werkstoffe, Schmierung .....	957
13.10.4 Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen .....	957
13.10.4.1 Gleitschraubengetriebe .....	957
13.10.4.2 Wälzschraubengetriebe .....	966
13.10.4.3 Wälzmutter .....	968
13.10.5 Wirkungsgrad .....	968
13.10.6 Berechnungsbeispiel .....	969
Literatur zum Abschnitt 13.10 .....	970
<b>13.11 Koppelgetriebe</b> .....	<b>972</b>
13.11.1 Bauarten, Eigenschaften und Anwendung .....	972
13.11.1.1 Koppelgetriebe mit vier Gliedern .....	972
13.11.1.2 Mehrgliedrige Koppelgetriebe .....	974
13.11.2 Berechnung .....	975
13.11.3 Konstruktive Gestaltung, Werkstoffe .....	976
13.11.4 Betriebsverhalten .....	976
13.11.5 Berechnungsbeispiele .....	977

<b>13.12 Kurvengetriebe</b> .....	<b>980</b>
13.12.1 Bauarten, Eigenschaften und Anwendung .....	980
13.12.2 Berechnung, konstruktive Gestaltung, Betriebsverhalten .....	982
Literatur zu den Abschnitten 13.11 und 13.12 .....	987
<b>14 Mikromechanik</b> .....	<b>989</b>
<b>14.1 Charakteristik der Mikromechanik</b> .....	<b>991</b>
<b>14.2 Werkstoffe der Mikromechanik</b> .....	<b>994</b>
<b>14.3 Mikromechanische Fertigungsverfahren</b> .....	<b>995</b>
14.3.1 Spezielle Verfahrensschritte und Standardtechnologien .....	996
14.3.1.1 Zweiseitenzuordnung .....	997
14.3.1.2 Tiefenätzverfahren .....	998
14.3.1.3 Herstellung isolierender Schichten .....	1003
14.3.1.4 Verbindungsverfahren (Wafer-Bonden) .....	1005
14.3.2 Mikromechanische Formgebungsverfahren .....	1007
14.3.2.1 Ätzverfahren (Volumenmikromechanik) .....	1007
14.3.2.2 Oberflächenmikromechanik (Surface Micromachining, Opferschichtverfahren) .....	1008
14.3.2.3 Oberflächennahe Volumenmikromechanik .....	1009
14.3.2.4 LIGA-Verfahren .....	1009
14.3.2.5 Mikromechanische Grundformen .....	1010
<b>14.4 Entwicklung mikromechanischer Funktionsgruppen</b> .....	<b>1011</b>
<b>14.5 Mikromechanische Konstruktionselemente</b> .....	<b>1012</b>
Literatur zum Abschnitt 14 .....	1014
<b>Sachwörterverzeichnis</b> .....	<b>1019</b>

# Charakterisierung und Systematik der Konstruktionselemente

Feinmechanische Konstruktionselemente sind Bestandteile eines jeden Geräts; sie bestimmen in entscheidendem Maße dessen Funktion, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Kosten [1.2].

In vielen Fällen sind die kleinen Abmessungen durch die i. Allg. kleinen äußeren Kräfte bedingt, werden aber oft auch gefordert, um durch kleine Massen hohe Arbeitsgeschwindigkeiten und große Genauigkeiten, z. B. bei Bewegungsabläufen zu erreichen.

Ein weiteres Merkmal ist die Vielfalt der Lösungswege und Ausführungsformen wegen des breiten Spektrums der Forderungen. Oft ist ein besonderes Anpassen an die Gegebenheiten der Gerätefunktion und damit eine Neukonstruktion der Elemente notwendig. Dabei sind die spezifischen Eigenheiten der feinmechanischen Fertigung zu berücksichtigen; bei sehr großen Stückzahlen wird die Wirtschaftlichkeit nur durch Massenfertigung und somit durch Anwendung spezieller Fertigungsverfahren erreicht [1.3].

Zusätzlich spielt die Werkstoffwahl eine entscheidende Rolle; hier sind in erster Linie Formgebung und Bearbeitungsverfahren maßgebend. Es werden vorrangig solche Werkstoffe eingesetzt, die sich leicht und ohne viele Arbeitsgänge bearbeiten lassen. Zunehmend finden genormte Halbzeuge und vor allem auch Kunststoffe Verwendung; die Palette der funktionsbedingten Werkstoffe ist jedoch in keinem Technikbereich so groß wie in der Feinwerktechnik. Je nach Funktion der Elemente haben auch thermische, klimatische und weitere Anforderungen ausschlaggebende Bedeutung, und es müssen deshalb zugleich die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Werkstoffe Berücksichtigung finden.

Die Feinwerktechnik mit ihrer Vielfalt von Erzeugnissen (**Bild 1.1**) wird in Zukunft den Leistungszuwachs in allen Bereichen der Volkswirtschaft entscheidend bestimmen [1.2] [1.26] [1.27].

Durch den Einsatz von mikroelektronischen Bausteinen wird der Wertanteil mechanischer Bauteile in einer Vielzahl von Geräten zwar reduziert (1950: 60 %, 1975: 50 %, 2010: < 40 % [1.2]), aber an der Geräteperipherie und vor allem auch in automatisierten Produktionseinrichtungen und im Elektronikmaschinenbau werden die Anforderungen an Leistungsfähigkeit, Arbeitsgeschwindigkeit, Präzision, Zuverlässigkeit und Lebensdauer mechanischer Bauteile erhöht. So ist u. a. Mikroelektronik ohne mechanische Präzision nicht denkbar (**Bild 1.2**).

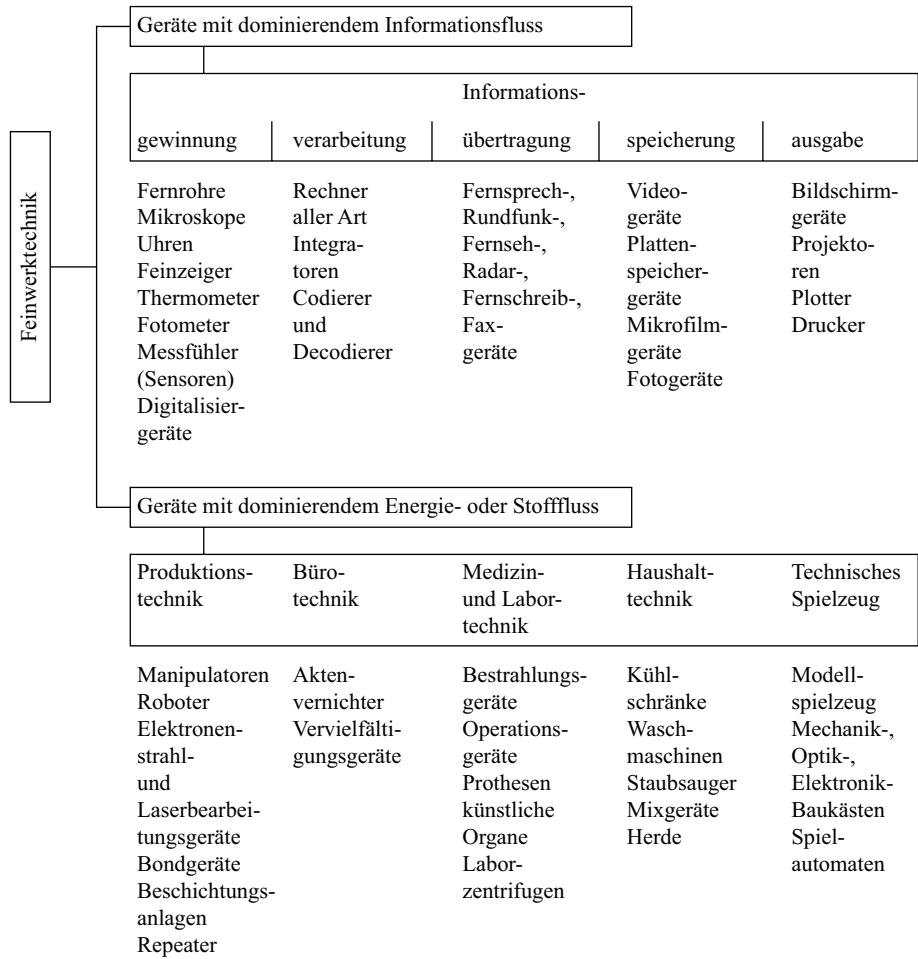


Bild 1.1 Einteilung der Geräte

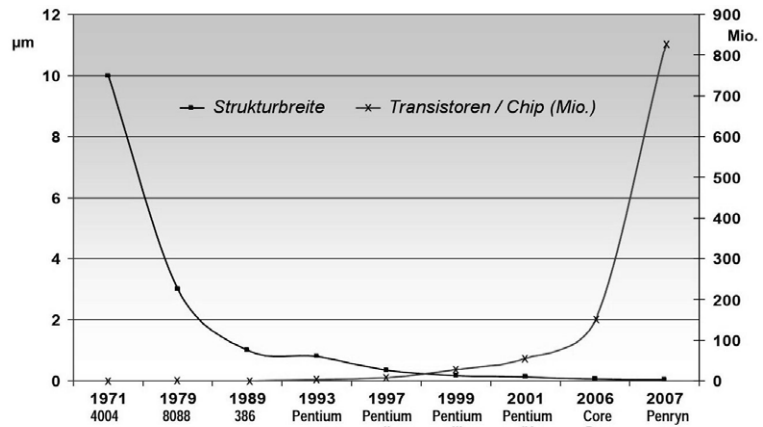


Bild 1.2 Steigerung der Präzision in der Feinmechanik am Beispiel der Leiterstrukturbreite und der Anzahl der Transistoren je Chip (nach Shopbell) [1.50]

Eine qualitativ neue Situation entsteht durch den Übergang zur Serien- und Massenproduktion von Präzisionsmechanik. Bereits heute weisen international etwa 25% aller gefertigten Maße bei mechanischen Bauteilen die Qualität IT 6 auf, und etwa 5% verlangen die Qualität IT 4. Im Zeitraum der nächsten zehn Jahre werden etwa 25% der Teile die Qualität IT 5 und etwa 5% die Qualität IT 3 aufweisen. Bei ausgewählten Erzeugnissen der Feinwerktechnik liegen diese Forderungen sogar noch höher (**Tabelle 1.1**).

**Tabelle 1.1** Toleranzanforderungen bei präzisionsmechanischen, optischen und elektronischen Geräten

Baugruppen und Geräte Bauelemente (Auswahl und Beispiele)	Durchschnittliche Anforderungen					zulässige Schwingungs- amplitude
	Länge	Winkel	Geradheit	Ebenheit	Rundheit	
Durchschnittliche Präzision: Konsumgütergeräte, Schreib- und Bürotechnik, Unterhaltungselektronik, Zahnräder, Gewindespindeln, Teile für Schreibmaschinen und mechanische Uhren, Kameraverschlüsse, elektronische Baugruppen, Transistoren, Dioden	> 50 µm	> 10'...1°	> 500 µm/m	> 500 µm/m <sup>2</sup>	> 50 µm	> 10 µm
Mittlere Präzision: Werkstatmmessgeräte, Bearbeitungsmaschinen, Automatisierungseinrichtungen, Präzisionszahnräder, Wälzschraubengetriebe, Plattenspeicher, Plotter, Lichtleiter-Kopplungselemente, Mikromotoren, Relais, Linsen, Prismen, Kondensoroptik, Masken für Farbbildröhren	5 µm	10"...10'	50 µm/m	50 µm/m <sup>2</sup>	5 µm	1 µm
Hohe Präzision: Messgeräte, Feinbearbeitungsmaschinen, Mikromechanik, feinmechanisch-optische Messgeräte, technologische Spezialausrüstungen, Feinverstellungen, Wälzlager, Präzisionsmaßstäbe, CCD-Elemente, Magnetköpfe, Quarzschwinger, Servoventile, Linsen, Prismen	0,5 µm	0,1"...10"	5 µm/m	5 µm/m <sup>2</sup>	0,5 µm	0,1 µm
Höchste Präzision: Metrologie, Mikroelektroniktechnologie, Endmaße, Koordinatenmessmaschinen, spezielle x-y-Positioniertische, aero- und hydrostatische Lager und Führungen, Videoplatten, LSI und VLSI, Planglasplatten, Beugungsgitter	< 0,05 µm (< 0,01 µm bis 0,2 m Länge)	< 0,1"	< 0,5 µm/m	< 0,05 µm/m <sup>2</sup>	< 0,05 µm	< 0,01 µm

Parallel vollzieht sich zunächst bei ausgewählten miniaturisierten mechanischen Bauelementen, Sensoren und Aktoren ein Qualitätsumschwung in Richtung *Mikromechanik*. In die Tiefe des Siliziumkristalls werden frei gestaltete mechanische Funktionselemente, wie Membranen, Zungen, Gitter usw., hineinmodelliert (s. Abschnitt 14). Diese neuartigen winzigen Elemente lassen sich direkt an elektronische Komponenten koppeln. Anwendungsmöglichkeiten liegen bei der Sensorik (Messung von Drücken, Schwingungen, Beschleunigungen usw.), bei peripheren Geräten der Datenverarbeitung (z. B. Tintenspritz- oder Thermodrucker) und im Wissenschaftlichen Gerätebau (u. a. Gaschromatographie und Isotopentrennung). Durch größere Präzision und Schärfentiefe bei der lithografischen Strukturübertragung mit Hilfe röntgenlithografischer Verfahren



sind zukünftig erhebliche innovative Impulse durch Erforschung des Verhaltens kleinster mechanischer Strukturen (sog. *Submikrontechnik*) zu erwarten.

Diese Innovation hat insgesamt großen Einfluss auf Prinzipwahl, Gestaltung und Berechnung von Konstruktionselementen. Zweck und Funktion der mechanischen Elemente sind von dieser Entwicklung jedoch unabhängig. Trotz wachsender Vielfalt ihrer Ausführungsformen werden die feinmechanischen Elemente in einem modernen Gerät keine grundsätzlich anderen Aufgaben übernehmen, als sie es bereits früher hatten:

**Konstruktionselemente für den funktionellen Geräteaufbau** ermöglichen Informations-, Energie- oder Stoffflüsse in Geräten (Verarbeitungsfunktion [1.2]); dabei sind stets mechanische Bewegungen auszuführen.

**Konstruktionselemente für den geometrisch-stofflichen Geräteaufbau** sichern unter den gegebenen Umwelteinflüssen die für die Funktion erforderliche Anordnung aller Elemente und halten äußere und innere Störungen in den zulässigen Grenzen (Sicherungsfunktion [1.2]). Sie sind in jedem Gerät vorhanden.

**Tabelle 1.2** ordnet die Konstruktionselemente der Feinmechanik nach ihrer Funktion.

Den einzelnen Funktionen, charakterisiert durch Begriff, Parameter und eine kurze Definition (Funktionsmerkmale), sind Funktionselemente zugeordnet. Sie fassen jeweils eine Gruppe von Konstruktionselementen zusammen. Diese Zuordnung ist jedoch nicht eindeutig. Ein bestimmtes mechanisches Bauelement kann in verschiedenen Anwendungsumgebungen unterschiedliche Funktionen u.U. auch gleichzeitig erfüllen. Solche mehrdeutigen Beziehungen sind der Grund dafür, dass z. B. Getriebe in mehreren Zeilen der Tabelle 1.2 genannt sind. Der Begriff „Funktionselement“ steht als Oberbegriff sowohl für Einzelteile (z. B. Massestück, Feder, Welle) als auch für Baugruppen (z. B. Getriebe, Kupplungen, Festhaltungen), da man beim Entwerfen von Geräten diese Elemente zunächst als unteilbare Synthesebausteine benutzt.

Innerhalb der zweiten Gruppe der Konstruktionselemente ordnet Tabelle 1.2 die feinmechanischen Elemente nach den Funktionen des Energieflusses. Da sowohl informations- als auch stoffverarbeitende Vorgänge in mechanischen Systemen Bewegungen erfordern und mit wenigen Ausnahmen die gleichen Elemente als Funktionsträger benutzen, ist die Einteilung ebenso für diese Bereiche zutreffend.

Die in der Systematik enthaltenen Elemente haben für die Konstruktion von Geräten unterschiedliche Bedeutung. Viele von ihnen werden ständig benötigt, und es gibt bewährte Lösungen für Gestaltung und Berechnung. Eine von Bedarf in Ausbildung und Praxis diktierte Auswahl der wichtigen Elemente stellen die Abschnitte 4 bis 14 zugriffsbereit zur Verfügung. Funktion und prinzipielle konstruktive Ausführung dieser Funktionselemente werden zu Beginn eines jeden Abschnitts durch ein Grundprinzip (einheitlich formuliert nach Tabelle 2.6a, Abschnitt 2.1.2) definiert, aus dem Einteilung und Gestaltungsvarianten folgen.

Die Konstruktionselemente der Feinmechanik haben viele Gemeinsamkeiten mit denen des Maschinenbaus. Neben den aus der gleichen physikalischen Wirkungsweise folgenden Berechnungsgrundlagen benutzen Maschinen- und Gerätebau für zahlreiche Elemente dieselben Standards und Normen (z. B. für Halbzeuge, Gewinde, Verzahnungen, Normteile, Zeichnungen u. a.). Ebenso sind das methodische Vorgehen sowie das Anwenden von CAD/CAM-Lösungen bei zahlreichen Aufgaben übertragbar, so dass die bekannte Literatur über Maschinenelemente und Konstruktionslehre wertvolle Ergänzungen bietet [1.8] bis [1.17] [2.7] [2.8]. Im Maschinenbau bewährte konstruktive Lösungen sind jedoch nicht ohne weiteres auf die Feinwerktechnik übertragbar; Ziele bzw. Anforderungen an die mechanischen Elemente unterscheiden sich z. T. deutlich.

Tabelle 1.2 Systematik feinmechanischer Konstruktionselemente

Zweck	Funktion	Parameter	Funktionsmerkmale	Funktionselemente	Konstruktionselemente		
Anordnen von Elementen	Stützen	Raum	Übertragen von Kräften und Momenten bei fester Relativlage	Stützelement	Stab, Balken, Gestell, Stativ		
				Verbindung	fest	stoffschlüssig formschlüssig kraftschlüssig	
	Abgrenzen		veränderlicher Relativlage		beweglich	Lagerung Führung Gelenke ( $f \geq 2$ )	
Bereitstellen mechanischer Energie	Speichern	Zeit	Aufnehmen von mechanischer Energie und Abgeben nach bestimmter Zeit	Speicher	Massestück Schwungmasse Pendel, Feder Luftfeder		
	Wandeln			Qualität	Wandeln nicht-mechanischer Energie in mechanische	Startwerk	Spannwerk Sprungwerk Schrittwerk
		Wandler	Motor Elektromagnet Bimetall Piezoelement				
Anpassen mechanischer Energie	Umsetzen	Quantität	Verändern der Charakteristik des Betrages einer motorischen Funktionsgröße	Getriebe	Zahnrad-, Reibrad-, Zugmittel-, Schrauben-, Koppel-, Kurven-, Hebel- und Feder-Getriebe		
	Verstärken					Aufhalter	Dämpfung Bremsen Anschlag
	Reduzieren			Festhalter	Gesperre		
	Sperren						
	Schalten			Verhindern einer Bewegung am Ende bei ihrer Entstehung	Gehemme		
Übertragen mechanischer Energie	Koppeln	Ort	Übertragen von Funktionsgrößen zwischen benachbarten Orten	Leiter (mechanisch)	Ausgleichskupplung starre Kupplung		
	Leiten		Übertragen von Funktionsgrößen zwischen beliebigen Orten		Achse, Welle, Rohr, Getriebe ( $i = 1$ )		
	Vereinigen Verzweigen	Anzahl	Zusammenführen oder Aufteilen von Funktionsflüssen	Verteiler	Differential- und Summier-Getriebe		

Schließlich sei darauf verwiesen, dass vielfältige Anforderungen an die Konstruktionselemente aus ihrer Kopplung und Integration mit optischen, elektronischen, elektromechanischen u. a. Geräteelementen resultieren, die sie zur Sicherung des Gesamtaufbaus in jedem Gerät in geeigneter Weise erfüllen müssen.

Die besondere Aufgabe des Gerätekonstruktors besteht darin, neben der sicheren Beherrschung der feinmechanischen Konstruktionselemente integrierend zwischen den genannten Teildisziplinen zu wirken.

## Literatur zum Abschnitt 1 und Grundlagenliteratur zu den Abschnitten 2 bis 14

### Bücher

- [1.1] *Krause, W.*: Grundlagen der Konstruktion – Elektronik, Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Mechatronik; mit einem Anhang Technisches Zeichnen. 10. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2018.
- [1.2] *Krause, W.*: Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik. 3. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2000.
- [1.3] *Krause, W.*: Fertigung in der Feinwerk- und Mikrotechnik – Verfahren, Werkstoffe, Gestaltung. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1996.
- [1.4] *Haberhauer, H.; Bodenstein, F.*: Maschinenelemente. 18. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2017.
- [1.5] *Theumert, H.; Fleischer, B.*: Entwickeln, Konstruieren, Berechnen. 5. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag 2016.
- [1.6] *Krause, W.*: Lärminderung in der Feinwerktechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995.
- [1.7] *Lindemann, U.*: Methodische Entwicklung technischer Produkte. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009.
- [1.8] *Kurz, U.*: Konstruieren, Entwerfen, Gestalten. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2009.
- [1.9] *Roth, K.*: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Bde. 1 bis 3. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1994 bis 2001.
- [1.10] *Ponn, J.; Lindemann, U.*: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Berlin: Springer-Verlag 2011.
- [1.11] *Roloff, H.; Matek, W.*: Maschinenelemente – Normung, Berechnung und Gestaltung, mit Tabellenbuch. 23. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017.
- [1.12] *Schlecht, B.*: Maschinenelemente. Bd. 1: Festigkeit, Wellen, Verbindungen, Federn, Kupplungen; Bd. 2: Getriebe, Verzahnungen, Lagerungen. München [u. a.]: Pearson Studium 2015; 2011.
- [1.13] *Ehrlenspiel, K.*: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2017.
- [1.14] *Pahl, G.; Beitz, W.*: Konstruktionslehre. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2013.
- [1.15] *Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.*: Maschinenelemente. Bde. I, II, III: 4. Aufl., 2. Aufl., 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2005, 2002, 2004.
- [1.16] *Dubbel*: Taschenbuch für den Maschinenbau. 24. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2014.
- [1.17] *Decker, K.-H.*: Maschinenelemente – Funktion, Gestaltung und Berechnung. 19. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2014.
- Decker, K.-H.; Kabus, K.*: Maschinenelemente – Aufgaben. 15. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2014.
- [1.18] *Klein, M.*: Einführung in die DIN-Normen. 14. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2008.

### Aufsätze, Normen und Richtlinien

- [1.20] *Höhne, G.; Schilling, M.*: CAD-Einsatz in der Gerätekonstruktion. Feingerätetechnik 36 (1987) 2, S. 51.
- [1.21] *Krause, W.*: Automatisierte Präzisionsgerätetechnik – aktuelle Schwerpunkte in Lehre und Forschung. Feingerätetechnik 37 (1988) 11, S. 482.
- [1.22] *Krause, W.; Schilling, M.*: Konstruktionselemente der Feinmechanik/Präzisionsgerätetechnik – Charakterisierung und Aufgaben. Feingerätetechnik 38 (1989) 1, S. 17.
- [1.23] *Krause, W.*: Noch immer Feinmechanik im Zeitalter der Mikroelektronik? Feinwerktechnik und Meßtechnik 98 (1990) 9, S. 345.
- [1.24] *Krause, W.*: Traditionen und Trends in der Feinmechanik. Technische Rundschau Bern 82 (1990) 45, S. 76.
- [1.25] *Krause, W.*: Ökologie aus feinwerktechnischer Sicht. Technische Rundschau Bern 84 (1992) 47, S. 64.
- [1.26] *Todt, H.*: Die Bedeutung der Mikro- und Feinwerktechnik in der heutigen Zeit. Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Meßtechnik 100 (1992) 7, S. 270.
- [1.27] *Skoludek, H.*: Feinmechanik – Optik, eine Schlüsselindustrie im Markt. Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Meßtechnik 100 (1992) 7, S. 272.
- [1.28] *Krause, W.; Weißmantel, H.*: Mikro- und Feinwerktechnik – Modell einer zukunftsorientierten Studienrichtung. Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Meßtechnik 101 (1993) 9, S. 329.
- [1.29] *Krause, W.*: Umweltgerechte Produktentwicklung. Wiss. Zeitschrift der TU Dresden 44 (1995) 4, S. 1.

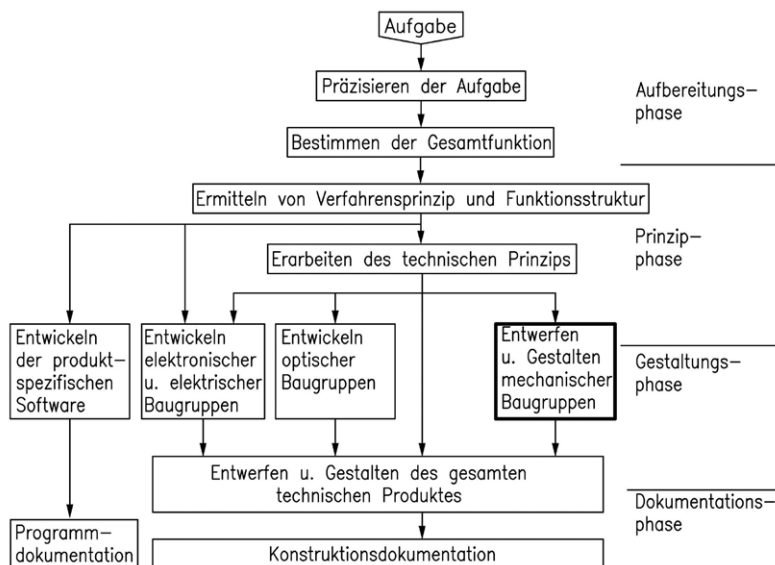
- [1.30] *Röhrs, G.; Krause, W.*: Recyclinggerechtes Konstruieren elektronischer und feinwerktechnischer Produkte. *Wiss. Zeitschrift der TU Dresden* 44 (1995) 4, S. 6.
- [1.31] *Prottung, V.*: Parallelentwicklung beim Gerätedesign. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Meßtechnik* 103 (1995) 10, S. 596 und 104 (1996) 1–2, S. 12.
- [1.32] *Roth, K.*: Finden und Ordnen technischer Lösungen – Wahl des Gliederungsprinzips und der Zugriffsmerkmale für Konstruktionskataloge. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 104 (1996) 1–2, S. 76.
- [1.33] *Merz, G.*: CAD als Schlüssel zur durchgängigen Prozeßkette. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 104 (1996) 3, S. 158.
- [1.34] *Becker, W.*: CAD/CAM-Modellierer der nächsten Generation. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 104 (1996) 6, S. 438.
- [1.35] *Schmidt, G.*: Integrierte Entwicklungen von Optik und Mechanik. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 104 (1996) 6, S. 448.
- [1.36] *Roessger, W.O.*: Der Weg zu höherer Produktivität. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 104 (1996) 9, S. 596.
- [1.37] *Ehlers, K.*: Konzentration auf die Kernkompetenz. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 104 (1996) 10, S. 694.
- [1.38] *Klipstein, D.L.*: Optoelektronik und Mikromechanik setzen neue Maßstäbe. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 105 (1997) 1–2, S. 15.
- [1.39] *Mertz, G.*: Entwicklungswerkzeuge als Wettbewerbsfaktor. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 105 (1997) 5, S. 319.
- [1.40] *Merz, G.*: Rettung aus dem Konstruktionsengpaß. *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 105 (1997) 6, S. 428.
- [1.41] *Krause, W.*: Mechatronik studieren – aber wie? *Feinwerktechnik · Mikrotechnik · Mikroelektronik* 106 (1998) 1–2, S. 18.
- [1.42] *Krause, W.*: Feinwerktechnik im Zeitalter der Mikroelektronik. *GMM-Report* 1998, S. 33. Frankfurt/M.: VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik.
- [1.43] *Weißmantel, H.; Kisse, R.*: Klar und deutlich – Produkte benutzerfreundlich konzipieren. *Mechatronik/Elektronik – Entwicklung und Gerätebau (F&M)* 110 (2002) 3, S. 57.
- [1.44] DIN 40150: Begriffe zur Ordnung von Funktions- und Baueinheiten
- [1.45] VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische System
- [1.46] VDI 2242: Ergonomiegerechte Gestaltung technischer Erzeugnisse
- [1.47] VDI 2243: Recyclingorientierte Produktentwicklung
- [1.48] *Krause, W.*: Feinwerktechnik im Spannungsfeld zwischen Feinmechanik und Mikroelektronik. Sitzungsbericht der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig. Band 2, Heft 4. Leipzig 2007.
- [1.49] *Krause, W.*: Umweltgerechte Produkte der Feinwerktechnik. *Jahrbuch Optik und Feinmechanik* 2008, S. 121.
- [1.50] *Shopbell, M.L.*: ITRS Roadmap, main focus: automation. 5th Innovationsforum for automation. Dresden 2008.
- [1.51] *Krause, W.*: Die Geschichte der Feinwerktechnik – von den Anfängen bis zur Gegenwart. *Jahrbuch Optik und Feinmechanik* 2010, S. 169.
- [1.52] *Krause, W.*: Entwicklung lärmarmen feinwerktechnischer Produkte. *Jahrbuch Optik und Feinmechanik* 2011, S. 203.
- [1.53] *Krause, W.; Nagel, T.*: Feinmechanische Konstruktionselemente. *Jahrbuch Optik und Feinmechanik* 2014, S. 199.



# 2

## Entwerfen und Gestalten von Konstruktionselementen

Das Entwerfen und Gestalten von Konstruktionselementen ist eine wichtige Aufgabe bei der Entwicklung technischer Produkte. Der Produktentwicklungsprozess umfasst alle Tätigkeiten von der Ermittlung der Konstruktionsaufgabe bis zur Fertigstellung der Konstruktionsdokumentation. Da in diesem Prozess alle entscheidenden Eigenschaften des zukünftigen Produktes festgelegt werden (Produktdefinition), liefert er die notwendigen Daten für alle nachfolgenden Phasen des Produktlebenszyklus (Arbeitsvorbereitung, Produktion, Vertrieb, Transport, Inbetriebnahme, Nutzung und Wartung bis zum Recycling bzw. der Entsorgung) [1.1] [1.7] [1.13] [1.14] [2.1] [2.2]. Je nach Komplexität des zu entwickelnden Geräts unterteilt er sich in relativ selbständige Teilprozesse (**Bild 2.1**). Sie ergeben sich aus der Struktur des Objektes (mechanische, optische, elektrische Baugruppen) und dem Arbeitsfortschritt (Entwicklungsphasen). Der Gerätekonstrukteur hat dabei neben federführender Mitwirkung in der Aufbereitungs- und Prinzipphase für das Gesamtgerät einschließlich der elektrischen und optischen Baugruppen den mechanischen Aufbau sicherzustellen, alle für die Gesamtfunktion erforderlichen mechanischen Elemente zu entwerfen und für eine optimale Gesamtgestalt des Geräts in Kooperation mit Technologen, Formgestaltern u. a. zu sorgen. Der größte Aufwand liegt mit über 50% in der Gestaltungsphase, in der die Vielfalt aller Einflussfaktoren und Forderungen bei der endgültigen Festlegung aller Details zu berücksichtigen ist [2.48].



**Bild 2.1** Einordnung des Entwerfens und Gestaltens mechanischer Baugruppen in den konstruktiven Entwicklungsprozess von Geräten (nach VDI-Richtlinie 2221)