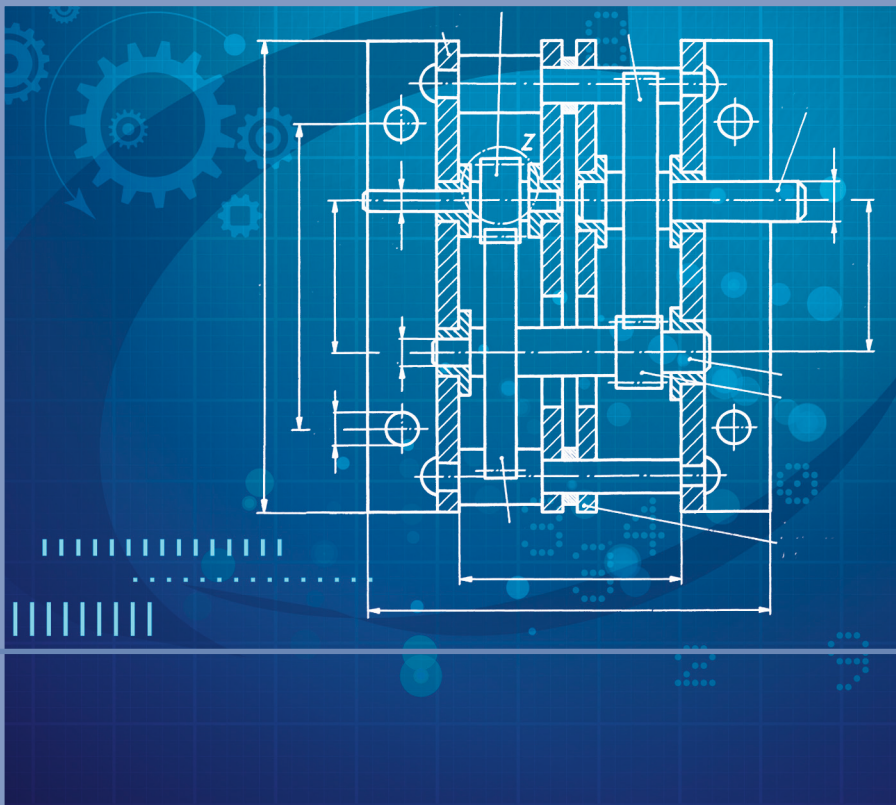


Werner Krause

Konstruktions- elemente der Feinmechanik



4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

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, München

Umschlagrealisation: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

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

Vorwort	V
1 Charakterisierung und Systematik der Konstruktionselemente	1
Literatur zum Abschnitt 1 und Grundlagenliteratur zu den Abschnitten 2 bis 14	6
2 Entwerfen und Gestalten von Konstruktionselementen	9
2.1 Arbeitsschritte und Methoden	12
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
2.2 Rechnerunterstütztes Konstruieren	33
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
3 Grundlagen zur Dimensionierung von Konstruktionselementen	53
3.1 Normzahlen und Normmaße	54
3.1.1 Normzahlen	54
3.1.2 Normmaße	57
3.1.3 Berechnungsbeispiele	58
Literatur zum Abschnitt 3.1	60
3.2 Toleranzen und Passungen	60
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
3.3	Statik	101
3.3.1	Kräfte an starren Körpern	102
3.3.2	Reibung	108
3.3.2.1	Ruhereibung (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
3.4	Dynamik	122
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
3.5	Festigkeitslehre	129
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
3.6	Konstruktionswerkstoffe	168
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

4	Mechanische Verbindungen	199
4.1	Eigenschaften, Einteilung und Auswahl	199
	Literatur zu den Abschnitten 4.1 und 4.5	204
4.2	Stoffschlüssige Verbindungen	205
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	Klebverbindungen	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	Formschlüssige Verbindungen	269
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
4.4	Kraftschlüssige Verbindungen	316
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
4.5	Schachtelverbindungen	366
5	Elektrische Leitungsverbindungen	371
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
6	Federn	385
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
6.2	Berechnung	392
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
6.3	Werkstoffe	405
6.3.1	Anforderungen	405
6.3.2	Beanspruchungsgrenzen	407
6.3.3	Verarbeitung	407
6.4	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	408
6.4.1	Gestaltungsgrundsätze	408
6.4.2	Ausführungsformen	408
6.5	Betriebsverhalten von Feder-Masse-Systemen	415
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
6.6	Berechnungsbeispiele	418
	Literatur zum Abschnitt 6	421
7	Achsen und Wellen, Wellendichtungen	425
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
7.4	Konstruktive Gestaltung, Werkstoffe	434
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
7.5	Welle-Nabe-Verbindungen	437
7.5.1	Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	437
7.5.2	Kraftschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	438
7.6	Wellendichtungen	438
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
8	Lager und Führungen	447
8.1	Grundlagen zu Reibung und Verschleiß	447
8.2	Lager	451
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

8.3	Führungen	524
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
8.4	Schmierung	560
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
9	Gehemme und Gesperre	575
9.1	Gehemme	577
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
9.2	Gesperre	589
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
10	Anschläge, Bremsen und Dämpfer	599
10.1	Anschläge	600
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
10.2	Bremsen	610
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
10.3	Dämpfer	621
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
11	Kupplungen	633
11.1	Bauarten, Eigenschaften und Anwendung	635
11.2	Feste Kupplungen	636
11.2.1	Berechnung	636
11.2.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	637
11.2.3	Betriebsverhalten	640
11.3	Ausgleichskupplungen	640
11.3.1	Berechnung	640
11.3.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	641
11.3.3	Betriebsverhalten	649
11.4	Schaltbare Kupplungen	652
11.4.1	Berechnung	652
11.4.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	654
11.4.3	Betriebsverhalten	660
11.5	Selbstschaltende Kupplungen	663
11.5.1	Berechnung	663
11.5.2	Konstruktive Gestaltung, Ausführungsformen	664
11.5.3	Betriebsverhalten	668
11.6	Werkstoffe	669
11.7	Berechnungsbeispiele	671
	Literatur zum Abschnitt 11	675
12	Spann-, Schritt- und Sprungwerke	679
12.1	Spannwerke	679
12.1.1	Sperrspannwerke	679
12.1.2	Kippspannwerke	681
12.2	Schrittwerke	683
12.3	Sprungwerke	686
12.3.1	Sperrsprungwerke	686
12.3.2	Kippsprungwerke	690

12.4	Hinweise zur Dimensionierung, Beispiele	693
	Literatur zum Abschnitt 12	694
13	Getriebe	695
13.1	Einteilung der Getriebe	695
	Literatur zum Abschnitt 13.1	700
13.2	Zahnradgetriebe-Übersicht	701
13.2.1	Übersetzung, Zähnezahlverhältnis, 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
13.3	Stirnradgetriebe mit nichtevolventischer Verzahnung	713
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
13.4	Stirnradgetriebe mit Evolventenverzahnung	725
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
13.5	Schraubenstirnradgetriebe	821
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
13.6	Schneckengetriebe	835
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
13.7	Kegelrad- und Kronenradgetriebe	853
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
13.8	Reibkörpergetriebe	864
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

13.9 Zugmittelgetriebe	884
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
13.10 Schraubengetriebe	952
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
13.11 Koppelgetriebe	972
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

13.12 Kurvengetriebe	980
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
14 Mikromechanik	989
14.1 Charakteristik der Mikromechanik	991
14.2 Werkstoffe der Mikromechanik	994
14.3 Mikromechanische Fertigungsverfahren	995
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
14.4 Entwicklung mikromechanischer Funktionsgruppen	1011
14.5 Mikromechanische Konstruktionselemente	1012
Literatur zum Abschnitt 14	1014
Sachwörterverzeichnis	1019

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**).

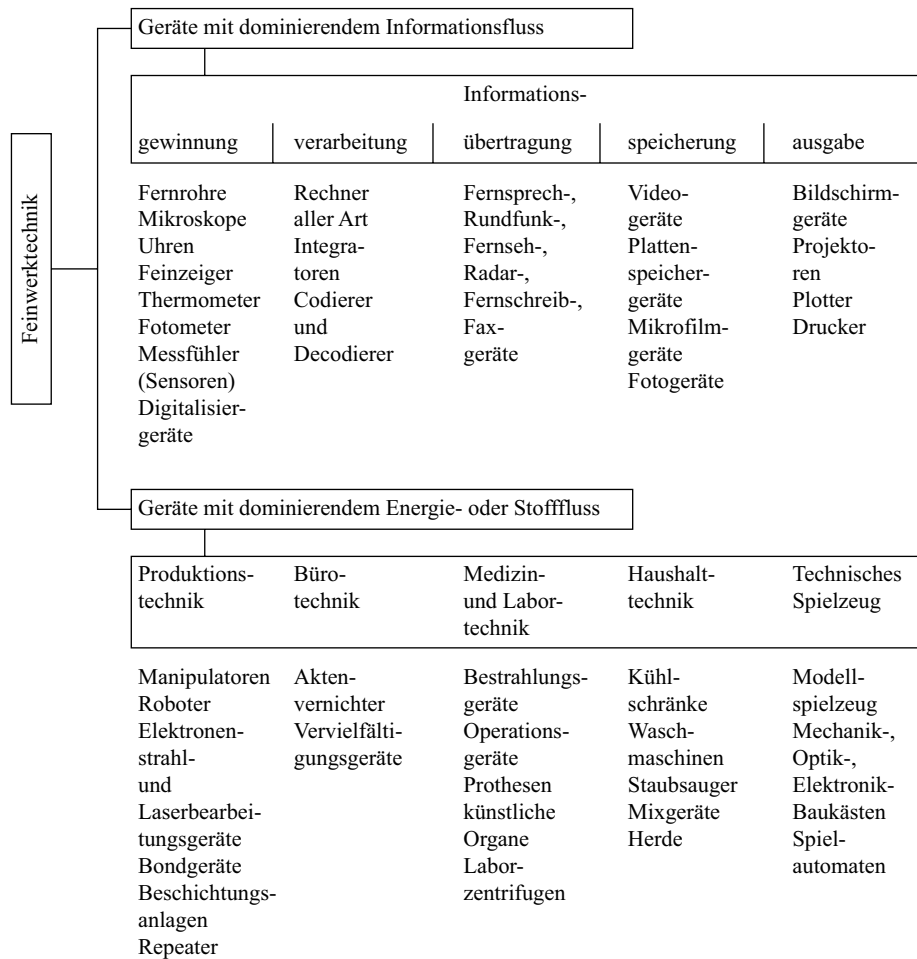


Bild 1.1 Einteilung der Geräte

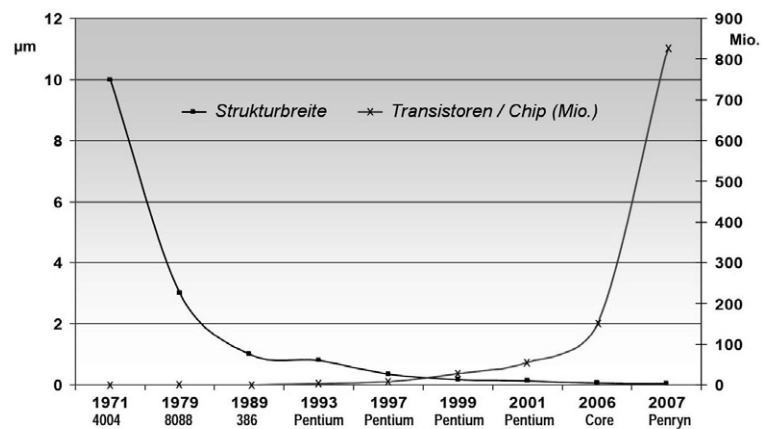


Bild 1.2 Steigerung der Präzision in der Feinmechanik am Beispiel der Leiterstrukturbreite und der Anzahl der Transistoren je Chip (nach Shopbell) [1.50]

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 Baelemente (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 ²	> 50 µm	> 10 µm
Mittlere Präzision: Werkstattemessgeräte, 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 ²	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 ²	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 ²	< 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	stoffschlüssig formschlüssig kraftschlüssig
	Abgrenzen		Umhüllen und Schützen eines Raumes	Schutzelement	Lagerung Führung Gelenke ($f \geq 2$) Gehäuse Gefäß Deckel Dichtung
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
Anpassen mechanischer Energie	Umsetzen	Quantität	Verändern der Charakteristik des Betrages	Getriebe	Zahnrad-, Reibrad-, Zugmittel-, Schrauben-, Koppel-, Kurven-, Hebel- und Feder-Getriebe
	Verstärken		einer motorischen Funktionsgröße	Aufhalter	Dämpfung Bremsen Anschlag
	Reduzieren		Verhindern einer Bewegung am Ende bei ihrer Entstehung	Festhalter	Gesperre
	Sperren		Unterbrechen und Wiederherstellen der Bewegungsübertragung	Kupplung	Gehemme Schaltkupplung
	Schalten				Ausgleichskupplung starre Kupplung
	Koppeln	Ort	Übertragen von Funktionsgrößen zwischen benachbarten Orten	Leiter (mechanisch)	Achse, Welle, Rohr, Getriebe ($i = 1$)
Übertragen mechanischer Energie	Leiten		Übertragen von Funktionsgrößen zwischen beliebigen Orten	Verteiler	Differential- und Summier-Getriebe
	Vereinigen Verzweigen	Anzahl	Zusammenführen oder Aufteilen von Funktionsflüssen		

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.; Bodenstern, 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 lärmarmer feinwerktechnischer Produkte. Jahrbuch Optik und Feinmechanik 2011, S. 203.
- [1.53] *Krause, W.; Nagel, T.*: Feinmechanische Konstruktionselemente. Jahrbuch Optik und Feinmechanik 2014, S. 199.

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].

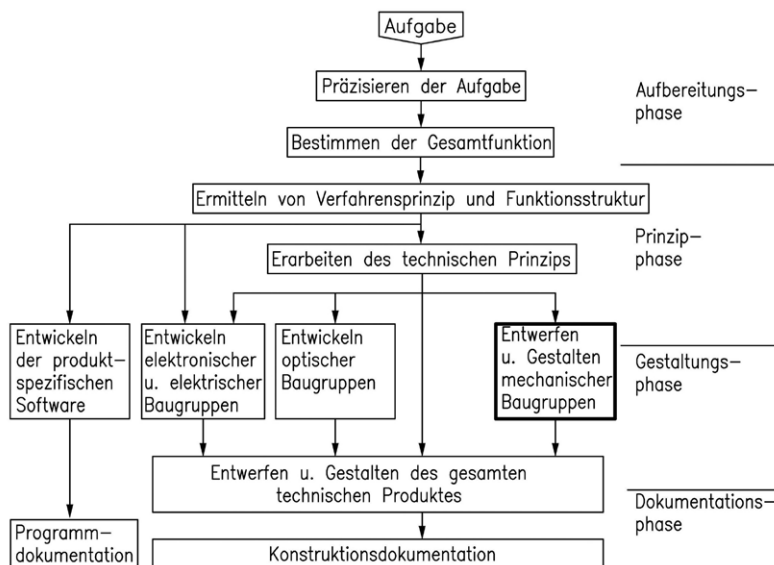


Bild 2.1 Einordnung des Entwerfens und Gestaltens mechanischer Baugruppen in den konstruktiven Entwicklungsprozess von Geräten (nach VDI-Richtlinie 2221)

Das Konstruieren feinmechanischer Elemente und Baugruppen erfolgt prinzipiell nach dem gleichen Ablauf wie der Gesamtprozess [1.2] [1.14] [1.44], jedoch modifiziert für die niedere Ebene der Elemente.

Nach **Bild 2.2** sind für die Elementeentwicklung drei Lösungswege typisch. Im einfachsten Fall (*Weg 1*) reduziert sie sich auf eine Auswahl vorhandener Konstruktionselemente. Nach *Weg 2* sind vorhandene Erzeugnisse zu verbessern, weiterzuentwickeln oder neuen Forderungen anzupassen, wie es das Beispiel im **Bild 2.3** zeigt. Neuentwicklungen (*Weg 3*) sind selten bei einfachen Konstruktionselementen, aber häufig für Baugruppen erforderlich. Die Gegebenheiten der Aufgabe entscheiden über den Lösungsweg, für den **Tabelle 2.1** Hinweise gibt.

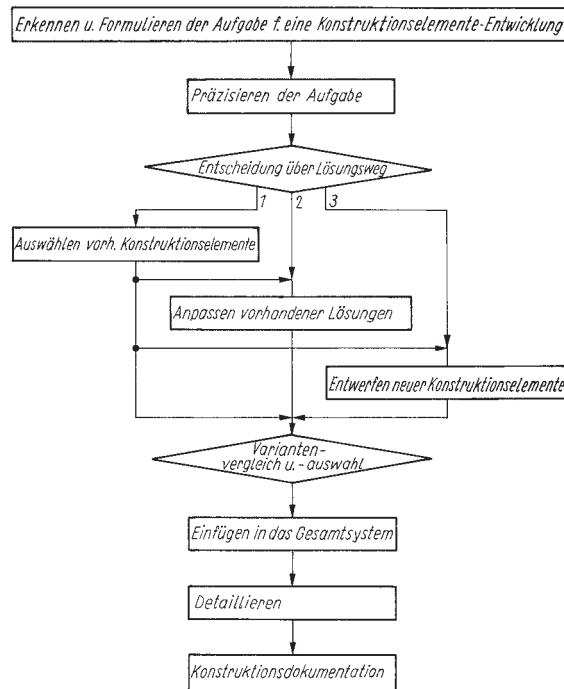


Bild 2.2
Ablauf der Konstruktionselemente-Entwicklung

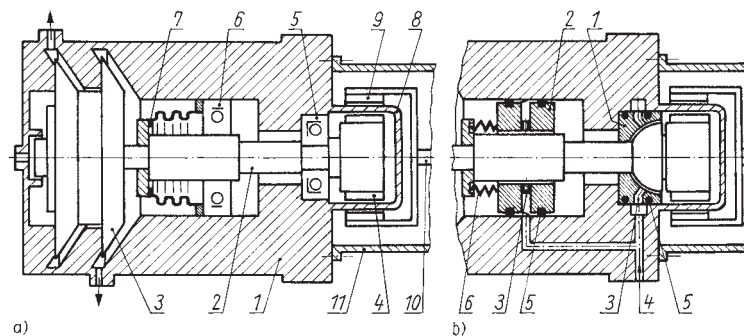


Bild 2.3 Substitution eines Wälzlagers durch ein Luftlager in einer Trennzentrifuge [2.51]

a) wälzgelagerter Rotor (Nachteile: Schmierstoff und Abrieb der Dichtung gelangen in Trennraum, aggressive Phasenteile korrodieren Lager);

1 Gehäuse; 2 Rotor; 3 Trennkopf; 4 Magnetkupplung innen; 5 Schulterkugellager; 6 Rillenkugellager; 7 Gleitringdichtung; 8 Trennwand; 9 Magnetkupplung außen; 10 Antriebsmotor; 11 Abdeckung

b) luftgelagerter Rotor (kein Verschleiß, geringerer Energieverbrauch, keine Verunreinigung der Suspension);

1 sphärisches Luftlager; 2 zylindrisches Luftlager; 3 Luftdüse; 4 Luftzuleitung; 5 Rundringdichtung; 6 Ringspaltdichtung

Tabelle 2.1 Lösungswege beim Konstruieren mechanischer Konstruktionselemente

Lösungsweg	Arbeitsschritte	Hilfsmittel
1. Auswählen vorhandener Konstruktionselemente	vor der Auswahl: – Bestimmen der Funktion – Bestimmen struktureller Auswahlparameter (Abmessungen, Werkstoff) – falls erforderlich, überschlägliche Dimensionierung nach der Auswahl: – Funktions-, Festigkeits-, Lebensdauer- und andere Nachweise – ggf. Anpassen der gefundenen Lösung	Literatur Normen (DIN, DIN EN, DIN ISO) Patente Prospekte Lieferkataloge Wiederholteilkataloge EDV-Datenbanken
2. Anpassen vorhandener Lösungen	– Analyse und Kritik der gegebenen Konstruktion – Bestimmen der erforderlichen Veränderungen hinsichtlich Prinzip, Form, Werkstoff, Abmessungen – Durchführen der Anpassung in der angegebenen Rangfolge	Methode der Konstruktionskritik [2.27] Methoden der Variation [2.28] Konstruktionsprinzipien [1.2] [2.26] Konstruktionsrichtlinien (s. Abschnitt 2.1.3) Simulation [2.8] [2.19] [2.52] Optimierung [2.35] [2.61] Variantenkonstruktion [2.7] (CAD)
3. Entwerfen neuer Konstruktionselemente	– Bestimmen der Funktion – Festlegen des technischen Prinzips – Dimensionieren der funktionswichtigen Gestaltparameter – Gestalten (ggf. unter Verwendung vorhandener Elemente) – Feindimensionierung	Methoden der Kombination und Variation Methoden der Ideenfindung Katalogprojektierung (manuell oder mit CAD) Menütechnik (CAD) Nach- und Auslegungsrechnungen, Simulation, Optimierung

Dabei wiederholen sich in variabler Folge die konstruktiven Grundaufgaben, für deren Bearbeitung Hilfsmittel zur Verfügung stehen:

■ **Konstruktionsprinzipien**

(Funktionentrennung, Funktionenintegration, Strukturtrennung, Strukturintegration, Kraftleitung, Selbstunterstützung, fehlerarme Anordnungen, Vermeiden von Überbestimmtheiten, Funktionswerkstoff an Funktionsstelle) [1.2] [1.14] [2.26]

■ **Konstruktionsrichtlinien**

(Vorschriften und Empfehlungen, z. B. für das fertigungsgerechte, normgerechte, kostengerechte, verschleißgerechte, korrosionsgerechte, bediengerechte Konstruieren) [1.3] [2.6] [2.27] [2.38] [2.39]

■ **Methoden**

(s. Abschnitt 2.1) [1.2] [1.13] [1.14] [2.4] [2.5]

■ **Informationsspeicher**

(Literatur, Normen, Patente, Prospekte, Kataloge, EDV-Datenbanken) [2.5] [2.22]

■ **Rechentechnik**

(CAD-Systeme, s. Abschnitt 2.2) [2.7] [2.8] [2.19] [2.25] [2.29] [2.31] u. a.

2.1 Arbeitsschritte und Methoden

Aufgaben für das Entwerfen und Gestalten von Konstruktionselementen sind entsprechend Bild 2.1 stets Teilaufgaben einer Erzeugnisentwicklung, die der Konstrukteur selbst erkennen und formulieren muss.

2.1.1 Ermitteln und Präzisieren von Konstruktionsaufgaben

Gegeben ist i. Allg. eine Prinziplösung des Gesamtgeräts (**Bild 2.4a**) oder ein technischer Entwurf wie im Bild 2.3a. Die Arbeitsschritte enthält **Tabelle 2.2**. Bei komplexen Baugruppen sollte man die Aufgaben schriftlich formulieren (**Tabelle 2.3a**), während es beim Entwerfen und Gestalten

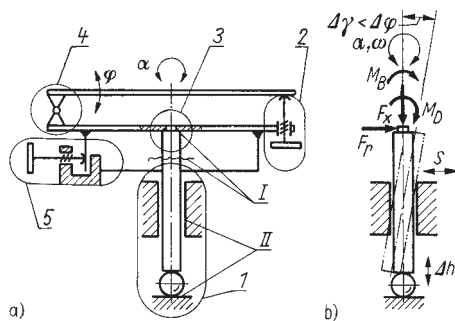


Bild 2.4 Bestimmen konstruktiver Teilaufgaben

- a) technisches Prinzip eines Justiertisches
 1 Vertikallager; 2 Schraubenge triebe; 3 Welle-Nabe-Verbindung;
 4 Horizontallager; 5 Klemmung; I, II Schnittstellen;
 α Drehwinkel; φ Kippwinkel
- b) abgegrenztes Vertikallager mit Funktionsgrößen
 ω Winkelgeschwindigkeit; $\Delta\gamma$ Kippwinkel der Welle;
 $\Delta\varphi$ zulässige Winkelabweichung von φ ; S Spiel;
 Δh axiale Verlagerung

Tabelle 2.2 Arbeitsschritte für das Ermitteln und Präzisieren von Konstruktionsaufgaben

Ermitteln konstruktiver Teilaufgaben

1. Analysiere die Funktion des Gesamtgeräts und bestimme die erforderlichen Konstruktionselemente! (s. Tabelle 1.2)
2. Grenze innerhalb der gegebenen Struktur gedanklich Konstruktionselemente ab! (s. Bild 2.4a)
 - Schnittstellen mit eindeutigen Übertragungsverhältnissen für Funktionsgrößen festlegen! (keine Wandlung von Größen, keine Relativbewegungen zwischen Bauteilen, keine Unstetigkeiten hinsichtlich Beanspruchung innerhalb von Körpern oder an festen Koppelstellen; siehe I im Bild 2.4a)
 - Forderungen für abgegrenztes Konstruktionselement aus Funktionsfluss des Gesamtsystems und Umgebungsbedingungen innerhalb und außerhalb des Geräts ableiten!
3. Formuliere die Konstruktionsaufgabe!

Präzisieren von Aufgaben

1. Präzisiere die Angaben über die Funktion! (an den Schnittstellen abgegrenzte Elemente durch ihre Wirkungen ersetzen, s. Bild 2.4b)
 - Funktionswichtige Ein- und Ausgangsgrößen mit zulässigen Abweichungen, Störgrößen und Nebenwirkungen
 - Teilfunktionen des Bauelements
2. Ermittle Gegebenheiten und Forderungen hinsichtlich der Gestalt!
 - Gegebene Gestaltelemente (Flächen, Werkstoff, Maße)
 - Einbau- und Koppelbedingungen innerhalb des Geräts
3. Erfasse Vorgaben über die Fertigung!
 - Teilefertigung, Montage, Prüfung
4. Leite Forderungen aus weiteren Umweltbereichen des Produktlebenszyklus ab!
 - Transport, Lagerung, Installation, Bedienung, Wartung, Recycling
5. Plane das Vorgehen für die Bearbeitung der Aufgabe!
 - Gliedere in Teilaufgaben:
 - a) nach technischen Gesichtspunkten (Teilfunktionen, Baugruppen)
 - b) nach methodischen Schritten (s. Bild 2.2, Tabelle 2.1)!
 - Ermittle notwendige Hilfsmittel (Methoden, Rechenprogramme, Rechner, Laborausrüstungen) und Kapazitäten!
 - Bestimme Bearbeitungsfolge und -zeiten!

einfacher oder häufig wiederkehrender Konstruktionselemente genügt, die Arbeitsschritte nach Tabelle 2.2 gedanklich zu vollziehen.

Das **Präzisieren** der Aufgabe hat zum Ziel, alle für das Entwerfen, Berechnen, Bewerten und Detaillieren erforderlichen Informationen zu ermitteln, welche man zweckmäßig in einer Forderungsliste ordnet (Tabelle 2.3b).

Sie enthält alle *objektspezifischen Forderungen*, graduert nach ihrer Bedeutung für das Konstruktionsergebnis: Festforderungen (F), Mindestforderungen (M), Wünsche (W), Ziele (Z). Daneben gelten unabhängig vom speziellen Erzeugnis *allgemeingültige Forderungen* für jede Entwicklungsaufgabe (s. Abschnitt 2.1.3.1). Ihre Bearbeitung führt mit zunehmendem Lösungsfortschritt zu neuen Forderungen, andere müssen geändert oder präzisiert werden, so dass die Forderungsliste stets auf dem neuesten Stand zu halten ist. Als Hilfsmittel für die Aufgabenpräzisierung haben sich Leitblätter [2.9] (Tabelle 2.2, Tabelle 2.3b) oder Checklisten [1.7] [2.5] bewährt.

2.1.2 Prinzipbestimmung für Konstruktionselemente

Obwohl für alle Konstruktionselemente der Feinmechanik nach Tabelle 1.2 bewährte Lösungsprinzipie bekannt und in den meisten Fällen übernehmbar sind, sollte jeder detaillierten Bearbeitung einer Konstruktionssaufgabe wenigstens gedanklich das Festlegen oder Feststellen des für die Lösung geeigneten technischen Prinzips vorausgehen. Dieser Abstraktionsschritt bringt auch im Fall der Wiederverwendung vorhandener Elemente (*Lösungsweg 1*, Tabelle 2.1) einen guten Überblick über Lösungsalternativen und bietet höhere Sicherheit beim Auswählen, Dimensionieren und Einfügen der Lösung in den Gesamtentwurf.

Das *technische Prinzip* (auch Wirk-, Arbeits- oder Funktionsprinzip) ist eine abstrahierte Darstellung der Struktur, die funktionswichtige geometrisch-stoffliche Eigenschaften des Konstruktionselements qualitativ festlegt.

Die Prinzipphase bereitet das Gestalten der Konstruktionselemente durch Festlegen der funktionswichtigen Gestaltelemente vor und soll die grundsätzlichen Gestaltungsmöglichkeiten aufzeigen. Die Darstellungsformen der Lösungsvarianten reichen deshalb von den abstrakten Symbolen (s. Tabelle 2.6) bis zu einfachen technischen Entwürfen [1.2] [2.5], um gute Anschaulichkeit und Verständlichkeit zu erreichen (s. Bild 2.4).

Allgemeinere Darstellungen (wie Funktionsstruktur und Verfahrensprinzip in Blockbildform [1.13] [1.14] [2.10]) sind beim Entwerfen einzelner Konstruktionselemente in der Regel nicht erforderlich.

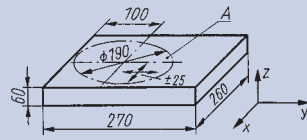
Für die Prinzipbestimmung von Konstruktionselementen sind folgende Methoden besonders geeignet:

Ausnutzen physikalischer Effekte. Neue Technologien bewirken, dass für mechanische Bauelemente und deren Kopplung physikalische Effekte genutzt werden, die man bisher wenig beachtete oder aus ökonomischen Gründen nicht anwenden konnte. Da bei zahlreichen Konstruktionselementen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit die physikalische Grenze erreicht ist, muss man beim Vordringen in neue Größenordnungen bei Miniaturisierung, Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Dynamik, Unempfindlichkeit gegenüber Störungen u. a. nach neuen physikalischen Ansätzen suchen. Kataloge physikalischer Effekte [2.5] [2.10] [2.20] sowie rechnerunterstützte Rechensysteme [2.22] sind dafür als Hilfsmittel einsetzbar.

Tabelle 2.3 Aufgabenstellung für einen Kreutztisch

a) Aufgabenstellung

Aufgabenskizze



Aufgabe: Es ist ein Gerätetisch zu konstruieren, dessen Oberteil von Hand um ± 25 mm in allen Richtungen einer Ebene verstellbar ist. Die Abweichung von der Parallelität ist kleiner $30''$ gefordert. Die zum Verschieben notwendige Betätigungskraft F_H darf 10 N nicht überschreiten. Verschieben und Feststellen des Tisches in beliebiger Stellung innerhalb des Bewegungsbereiches sollen an einem Bedienelement erfolgen, welches aus dem vorgegebenen Bauraum herausragen kann (A Arbeitsfläche).

b) Forderungsliste

Nr.	Wichtung	Forderungen	Bemerkungen
1	F	Funktion Bewegungsbereich $x = 50$ mm, $y = 50$ mm	keine Drehung um z-Achse; Durchbiegung, Fertigungstoleranzen beachten!
2	F	Parallelitätsabweichungen Tischplattenoberfläche – Aufstellfläche in allen Stellungen $< 30''$	
3	M	Bewegung von Hand mit Betätigungskraft $F_H < 10$ N	
4	F	Feinfühligkeit der Betätigung $F_u = 1$	$F_u = \frac{\text{Betätigungsweg}}{\text{Funktionsweg}}$
5	M	Belastung mit Masse ≤ 20 kg	Klemmvorgang darf eingestellte Lage nicht beeinflussen
6	F	Sicherung des Tisches in jeder beliebigen Stellung (zwangfrei, spielfrei)	
7	M	Struktur / Gestalt maximale Abmessungen 270 mm $\times$ 260 mm $\times$ 60 mm, Arbeitsfläche A: 190 mm $\varnothing$	siehe Skizze
8	F	gemeinsames Betätigungselement für Bewegung und Lagesicherung des Tisches	Funktionenintegration
9	W	Ausführung als geschlossene Baugruppe	geeignete Koppelstellen vorsehen
10	W	Tisch horizontierbar	
11	Z	modularer Aufbau	
12	F	Fertigung geringe Stückzahl	
13	F	Einzelfertigung im eigenen Musterbau	

Arbeitsschritte:

- Aufsuchen eines geeigneten Effekts
- Ableiten technischer Prinzipie aus dem physikalischen Zusammenhang
- Erarbeiten der Grundlagen für das Dimensionieren und Gestalten der konstruktiven Ausführung (mit z.T. umfangreicher theoretischer und experimenteller Grundlagenforschung).

Die **Tabellen 2.4 und 2.5** zeigen Beispiele für die ersten beiden Arbeitsschritte.

Kombination. Alle Konstruktionselemente besitzen trotz vielfältiger Ausführungsvarianten gemeinsame Merkmale, die innerhalb einer Bauelementegruppe in jeder Variante auftreten. Sie eignen sich als Oberbegriff und ermöglichen die Anwendung der Kombinationsmethode beim Erarbeiten prinzipieller Lösungen und Gestaltvarianten für mechanische Elemente und Verbindungen. Eine Ausgangsbasis für die Kombination ist das Grundprinzip [2.49] der gewünschten Konstruktionselementegruppe. **Tabelle 2.6a** enthält ein solches, abgeleitet aus dem übergeordneten Grundprinzip „Festhaltungen“ (s. Abschnitt 9). Aus den hervorgehobenen Merkmalen folgen die Oberbegriffe (ordnende Gesichtspunkte) der Kombinationstabelle (Tabelle 2.6b). Die Varianten findet man als unterscheidende Merkmale durch Analyse bekannter Lösungen, durch gedankliches Abwandeln des Ordnungsbegriffs oder aus Katalogen (wie z.B. die Varianten 3.1 bis 3.5).

Tabelle 2.4 Systematik physikalischer Effekte für feste und bewegliche Verbindungen
Auswahl aus [2.20]

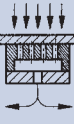
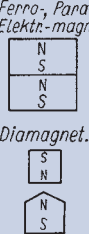
Effekt	1 Adhäsion	2 Kohäsion	3 Oberflächen- spannung	4 Hooke- sches Gesetz	5 Aero-/ Hydro- statik	6 Aero-/ Hydro- dynamik	7 Unter- druck	8 Gravitation	9 Elektro- statische Kräfte	10 Magnet. Kräfte
Prinzip- lösung										

Tabelle 2.5 Physikalische Effekte zum Erzeugen einer mechanischen Verschiebung, die durch Längen- oder Lage-
änderung erreichbar ist
Auswahl aus [2.10]; Zeichen und Benennungen s. Abschnitt 3.5

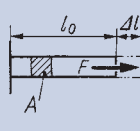
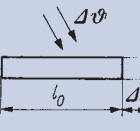
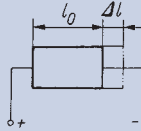
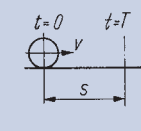
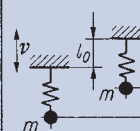
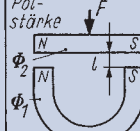
	Längenänderung			Lageänderung		
Physikal. Effekt	Hookesches Gesetz	Wärmedehnung	Elektrostriktion	Bewegte Masse	Resonanz	Coulombsches Gesetz Magnetfeld
Gleichung	$\Delta l = \frac{l_0}{EA} F$	$\Delta l = l_0 \alpha \Delta \vartheta$	$\Delta l = l_0 E d$ <i>d Materialkonstante</i>	$s = \int v \cdot dt$	$l = \frac{l_0}{1 - (\frac{v}{\omega_0})^2}$	$l = \sqrt{\frac{\Phi_1 \Phi_2}{4\pi \mu_0 \mu_r F}}$
Skizze						

Tabelle 2.6 Prinzipbestimmung für eine Klemmung mittels Kombination

a) Grundprinzip	
	Durch eine Klemmung
Gegebenheit	wird ein gelagertes Teil
Funktionsziel	an einer möglichen Bewegung gehindert,
Eingrenzende Bedingungen	und zwar allseitig und bis zu einem bestimmten Grenzdrehmoment,
Erforderliche Maßnahmen	wenn mindestens ein weiteres Teil hinzutritt, das Kräfte zum Erzeugen von Reibung überträgt und ausschaltbar ist.

Tabelle 2.6 Prinzipbestimmung für eine Klemmung mittels Kombination (Fortsetzung)

b) Kombinationstabelle					
Oberbegriff	Varianten				
1. Krafttrichtung	1.1. axial 	1.2. radial 	1.3. tangential 		
2. Kraftangriff	2.1. einseitig 	2.2. beidseitig 	2.3. zentrisch 		
3. Kraftverstärker	3.1. Schraube 	3.2. Exzenter 	3.3. Kegel 	3.4. Hebel 	3.5. Schlingfeder 
4. Kraftübertragung	4.1. ohne Übertragungselemente (direkt)		4.2. mit Übertragungselementen 4.2.1. gelagert 4.2.2. geführt		

Die Kombinationstabelle liefert durch formales Kombinieren

$$N = \prod_{i=1}^n a_i; \quad (2.1)$$

a_i Anzahl der Varianten je Oberbegriff,

N Komplexionen (im Beispiel $N = 135$).

Darunter befinden sich technisch nicht realisierbare Verknüpfungen (z.B. die Varianten 1.1 und 2.3 in Tabelle 2.6b), welche auszusondern sind; die verbleibenden bilden Lösungsansätze für Prinzipvarianten. Die Klemmung 5 im Bild 2.4a entstand aus den Varianten 1.1, 2.2, 3.1, 4.1; die Lösungen im Bild 9.20g und h entsprechen der Komplexion 1.2, 2.1, 3.1, 4.2.2.

Die Kombinationsmethode (oder morphologische Methode) [1.14] [2.4] [2.9] bietet Vorteile, wenn ein größeres Lösungsfeld zu erschließen ist. Außerdem ist die Kombination ein wichtiges Prinzip der Variantenkonstruktion (s. Abschnitt 2.2.2, Bild 2.32).

Variation. Sind Alternativen für eine vorhandene Konstruktionslösung zu finden, so bietet sich die Variationsmethode an [1.13] [2.10] [2.11] [2.28]. Sie gelangt durch partielle Veränderung einer gegebenen Lösung zu neuen Varianten. Analysen [2.11] ergaben, dass über 60 % der Patente auf diesem Wege entstehen. Die grundsätzlichen Möglichkeiten der beim Konstruieren durchführbaren Veränderungen sind in **Tabelle 2.7** zusammengestellt.

Tabelle 2.7 Übersicht über Variationsmöglichkeiten

Variationsgegenstand	Variationsmerkmal	Variationsoperation
Umwelt Umweltobjekte Medien, Klimate	Größe	Größenwechsel durch Vergrößern, Verkleinern, Grenzübergänge, Umkehr von Größenrelationen
Funktion Ein- und Ausgangsgrößen Störgrößen Übertragungsparameter	Lage	Lagewechsel durch Drehen, Verschieben, Spiegeln, Vertauschen
Struktur Elemente (Funktionselemente, physikalische Effekte, Effekträger, Baugruppen, Einzelteile, Formelemente) Kopplungen Werkstoff	Anzahl	Zahlenwechsel durch Hinzufügen, Weglassen, Trennen, Vereinigen, Wiederholen
	Form	Formenwechsel durch Austausch sowie Größen-, Lage- oder Zahlenwechsel von Formelementen
	Art	Austausch (Substitution)

Bild 2.5 lässt zwei wichtige Merkmale der Variationsmethode erkennen:

- Jede durch Variation erzeugte Variante kann selbst wieder Ausgangslösung für einen neuen Variationsschritt sein.
- Ein bestimmtes Variationsziel ist durch verschiedene Variationsoperationen bzw. Folgen solcher Operationen erreichbar.

Um die Vielfalt der Variationsmöglichkeiten zu erschließen, zerlegt man auch relativ einfache Strukturen, wie den Winkelhebel im **Bild 2.6**, in seine Bestandteile. Die Formänderung des Hebels wird auf die Variation von Größe, Lage, Form und Anzahl seiner Elemente zurückgeführt.

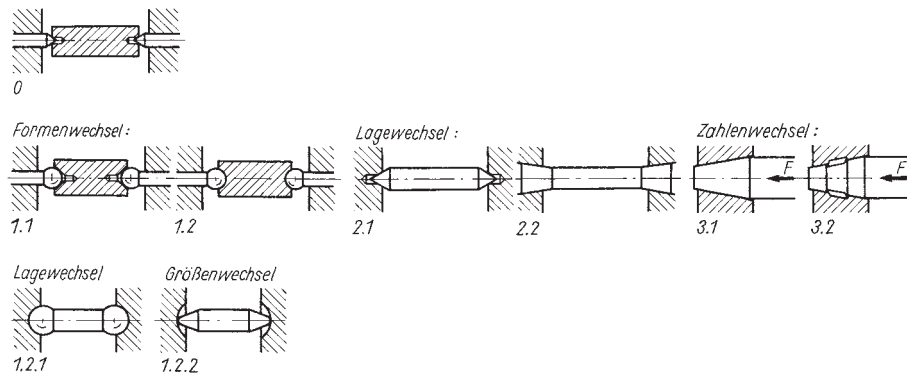


Bild 2.5 Variation eines Doppelkegellagers

Nachteiliges funktionsnotwendiges Spiel der Anfangslösung 0 verringern Varianten 2.1 und 2.2 durch größeren Lagerabstand und vermeiden die offenen Lager 3.1 und 3.2. Die Überbestimmtheit von 0 umgehen 1.1 bis 1.2.2 (Lager 1.2 und 1.2.1 für große, Spitzenlager 1.2.2 für kleine Lagerkräfte)

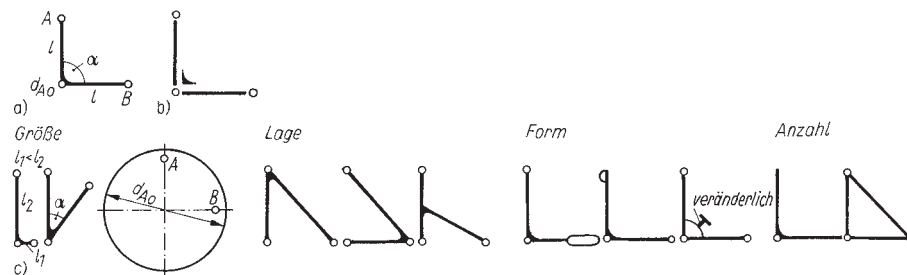


Bild 2.6 Variation eines Winkelhebels

a) Anfangslösung; b) Formelemente; c) Variation der Formelemente; d_{A0} Zapfendurchmesser

Gleiches gilt für die Variation von Koppelstellen. Die wegen des Vermeidens von Zwang in Geräten häufig benutzte Paarung Kugel-Ebene (**Bild 2.7**) ist konstruktiv so auszuführen, dass Kinematik und Flächenpressung der Kopplung den Erfordernissen entsprechen. Sollte das ausschließliche Abwandeln gegebener Strukturbestandteile (eingeschränkte Variation) nicht ausreichen, so kann man durch Einführen neuer Elemente (erweiterte Variation) zum Ziel kommen. Dieser Schritt ist die Verbindung zum kombinatorischen Vorgehen.

Unterschiedliche Funktionen übernimmt ein Bauelement bei Variation seiner Umgebung (**Bild 2.8**), ohne dessen Gestalt zu ändern. Ebenso wichtig ist der Austausch von Elementen bei möglichst unveränderter Umgebung, wie bereits im Bild 2.3 gezeigt.

		Anfangslösung			
		Eingeschränkte Variation		Erweiterte Variation	
	Form	Lage	Zahl	Größe	Art
Kinematik	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1
	1.2	2.2			5.2
Flächen- pressung	1.3	2.3	3.2	4.2 = 4.1	
					6.3
					Zahl
					6.1
					6.2

Bild 2.7 Variation einer Koppelstelle unter Beibehaltung des Freiheitsgrades $f = 5$

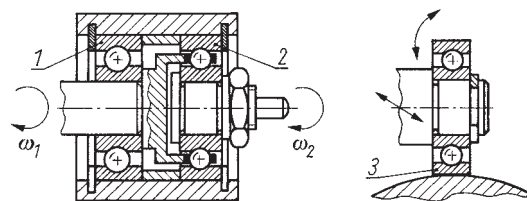


Bild 2.8 Verwendung eines Rillenkugellagers für verschiedene Funktionen
1 Lager; 2 Umlaufrädergetriebe (Antrieb am Käfig);
3 Rolle

Die dem Variationsziel dienende (primäre) Änderung des Variationsgegenstandes zerstört in der Regel den Zusammenhang innerhalb der gegebenen Lösung, der durch eine nachfolgende Anpassung wiederhergestellt werden muss (**Bild 2.9**).

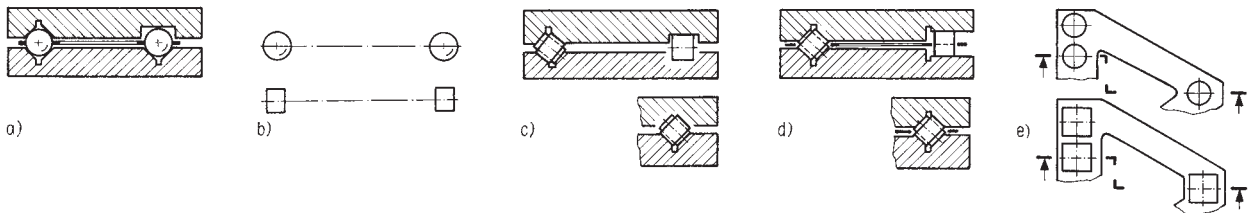


Bild 2.9 Variation einer Wälzführung

d) gegebene Lösung; b), c) Erhöhung der Tragfähigkeit der Führung durch Austausch der Wälzkörper (primäre Variation mit notwendiger Formänderung); d) Anpassen der Nebenführung; e) Anpassen des Käfigs (d, e sekundäre Variationen)

Die Variationstechnik gehört sowohl in der Prinzip- als auch in der Gestaltungsphase zu den am häufigsten, wenn auch oft unbewusst benutzten Methoden. Neben den genannten sei noch auf Methoden der Ideenfindung [1.2] [1.14] [2.4] [2.11] [2.13] [2.53] verwiesen, die bei der Suche nach neuen Lösungsansätzen kreativitätsfördernd sind.

2.1.3 Gestalten von Konstruktionselementen [1.3] [1.14] [2.14] [2.24] [2.27]

Gestalten heißt, folgende Eigenschaften eines technischen Gebildes festzulegen:

■ Die geometrischen Eigenschaften

also die Form (z. B. Zylinder-, Kugel-, Prismenform, ebene oder gekrümmte Flächen, gerade oder

gekrümmte Kanten) und die Abmessungen (z.B. Längen, Höhen, Winkel, Abstände, Oberflächenqualitäten)

- *Die stofflichen Eigenschaften*
(z.B. die Werkstoffe und ihre physikalischen, chemischen und sonstigen Eigenschaften)
- *Die Zustandseigenschaften*
(z.B. Vorspannung, Temperatur, Magnetisierung).

2.1.3.1 Grundsätze

Jedes technische Gebilde muss die folgenden vier Grundforderungen erfüllen:

- *Es muss funktionieren*
(in allen vorgesehenen Einsatzfällen und so gut, wie erforderlich)
- *Es muss herstellbar sein*
(überhaupt und mit möglichst geringem Aufwand)
- *Es muss ökonomisch sein*
(bei Herstellung, Nutzung, Transport, Umschlag, Lagerung, Wartung, Recycling oder Verschrottung und so gut wie möglich)
- *Es muss ästhetisch sein*
(so weit, wie dies für den angestrebten Gebrauchswert notwendig und ökonomisch vertretbar ist).

Aus diesen Grundforderungen leiten sich alle anderen Forderungen an technische Gebilde ab. Sie müssen sowohl vom Lösungsprinzip als auch von jedem Gestaltdetail erfüllt werden, denn auch kleine Gestaltungsfehler können die Funktion oder andere wichtige Forderungen in Frage stellen.

Beispiele: Wird für die Gleitführung nach **Bild 2.10** der Bewegungswiderstand in den Buchsen (Reibwert, Schmierung, Spiel) in Relation zur Biegesteifigkeit des Blechwinkels falsch gewählt, verbiegt sich dieser so weit, dass Selbstsperrung, also totales Versagen der Funktion eintritt.

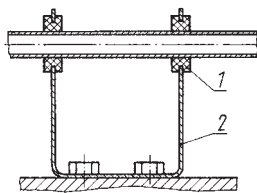


Bild 2.10

Gefahr der Selbstsperrung an einer zweistelligen Gleitführung
1 Buchsen aus Weichplast; 2 Blechwinkel

Den Einfluss der Gestalt auf die Ökonomie zeigen die Beispiele nach **Bild 2.11** [1.2].

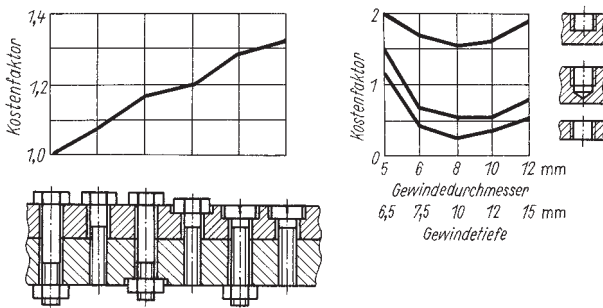


Bild 2.11 Beispiele für die Abhängigkeit der Kosten von der Gestalt

2.1.3.2 Auswahl der Form

Technische Gebilde sind aus Formelementen zusammengesetzt (**Bild 2.12**). Diese sollten möglichst einfach sein, weil damit vor allem Herstellung, aber z. B. auch Berechnung, Handhabbarkeit oder Verpackung einfacher werden. Einfache geometrische Elemente sind Gerade, Kreis und rechter Winkel sowie, daraus abgeleitet, ebene und zylindrische Flächen bzw. Prismen und Zylinder (**Bild 2.13**). Für die sehr zahlreichen genormten Halbzeuge, lieferbar als Bleche, Platten, Stangen, Rohre oder Sonderprofile (s. Tabellen 3.45 und 3.46), werden vorrangig diese Grundelemente genutzt (s. auch Abschnitt 3.6.4).

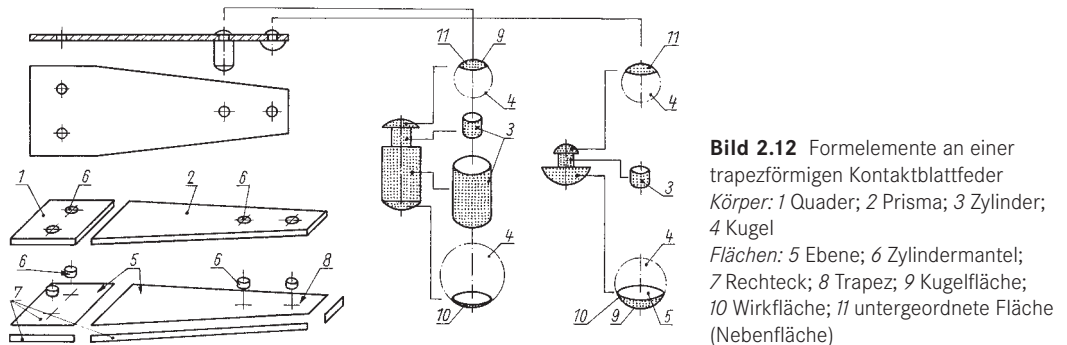


Bild 2.12 Formelemente an einer trapezförmigen Kontaktblattfeder
 Körper: 1 Quader; 2 Prisma; 3 Zylinder; 4 Kugel
 Flächen: 5 Ebene; 6 Zylindermantel; 7 Rechteck; 8 Trapez; 9 Kugelfläche; 10 Wirkfläche; 11 untergeordnete Fläche (Nebenfläche)

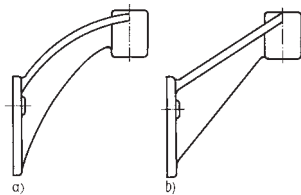


Bild 2.13

Beispiel für ein geometrisch ungünstig (a) bzw. günstig (b) gestaltetes Gussteil

Die Auswahl der Formelemente nur nach funktionellen Gesichtspunkten führt zu der sog. Zweckform. Die Ausführungsform, d. h. die für das technische Gebilde dann endgültig festgelegte Form, wird durch zahlreiche weitere, vor allem fertigungstechnische Forderungen beeinflusst (**Bilder 2.14 und 2.15**) [1.3].

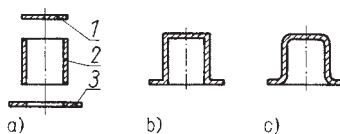


Bild 2.14

Gestaltung einer Gehäusekappe aus Formelementen

a) Grundformen (1 ebene Kreisplatte; 2 Hohlzylinder; 3 ebener Kreisring);
 b) Zweckform; c) fertigungstechnisch bedingte Ausführungsform (Tiefziehteil)

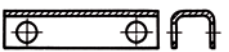
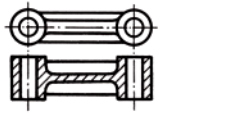
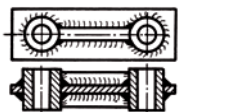
Ausführungsform	Fertigungsverfahren
1 	Sägen, Fräsen, Bohren
2 	Schneiden, Biegen, Bohren
3 	Gießen, Bohren
4 	Schneiden, Sägen, Schweißen
5 	Schneiden, Sägen, Bohren, Drehen, Montieren

Bild 2.15

Unterschiedliche Ausführungsformen eines Hebels mit zwei Lagerstellen in Abhängigkeit von den gewählten Fertigungsverfahren

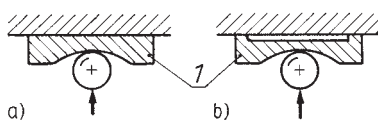
2.1.3.3 Auswahl der Werkstoffe

Mit dem Werkstoff wird das technische Gebilde realisiert. Seine Auswahl muss den Forderungen aus der Nutzung des technischen Gebildes (z.B. bezüglich der Dichte, der Festigkeit, des Verschleiß- oder Korrosionsverhaltens, der elektrischen, magnetischen, physiologischen Eigenschaften), der Herstellung (z.B. bezüglich der Spanbarkeit, Verformbarkeit, Schweißbarkeit, Veredelungsfähigkeit) und der Ökonomie (z.B. bezüglich des Preises, der Lieferbedingungen, der Abmessungen) genügen.

Konkrete Angaben zu den Eigenschaften und den Einsatzmöglichkeiten ausgewählter Konstruktionswerkstoffe folgen im Abschnitt 3.6.

Die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe wirken immer im Zusammenhang mit den anderen Gestalteigenschaften des technischen Gebildes. Zum Beispiel ist die Festigkeit eines Bauteils nicht nur abhängig von der Festigkeit des verwendeten Werkstoffes, sondern sehr wesentlich auch von der Form (z.B. Kerbwirkung, s. Abschnitt 3.5) und den Zustandseigenschaften (z.B. Restspannung, Temperatur). Beide beeinflussen die Beanspruchung und damit die Reaktionen des technischen Gebildes auf die Einwirkungen (z.B. Kräfte, Wärmestrahlung, Feuchte) aus der Umgebung.

Beispiele: Nach Bild 2.16 ergibt die Durchbiegung der Führungsleiste nach (b) eine Vergrößerung der Berührungsfläche zwischen Kugel und Führungsbahn, so dass die Beanspruchung dort kleiner, also die Belastbarkeit bei gleicher Werkstoffpaarung größer wird als bei (a).

**Bild 2.16**

Gestaltvarianten einer Führungsleiste 1

Die Korrosionsbeanspruchung eines Bauteils wird größer, wenn durch Falze, Spalte oder horizontale Flächen aggressive Flüssigkeiten länger auf den Werkstoff einwirken können.

Alle Gestalteigenschaften des technischen Gebildes müssen in Abhängigkeit von den in allen Phasen seiner Existenz (Herstellung, Transport, Nutzung, Wartung, Recycling, Verschrottung) auftretenden Einwirkungen aufeinander abgestimmt sein.

2.1.3.4 Festlegen der Zustandseigenschaften

Die Zustandseigenschaften kennzeichnen solche Gestalteigenschaften des technischen Gebildes, die nicht aus der Geometrie und den Angaben zum Werkstoff abgeleitet werden können. Sie sind häufig von wesentlicher Bedeutung für die Funktion.

Beispiele: Vorspannung einer Feder, Magnetisierung eines Permanentmagneten, eingeprägte Spannungen in einer Sicherheitsglasscheibe, Spannungen in optischen Bauelementen.

Der Konstrukteur muss diese Eigenschaften in den Konstruktionsunterlagen fordern bzw. eingrenzen und ggf. besondere Vorschriften zur Realisierung angeben.

Beispiel: Größe der Anzugsdrehmomente und die Reihenfolge ihres Aufbringens an den Schrauben zur Befestigung eines Zylinderkopfes.

2.1.3.5 Einflussfaktoren auf die Gestalt

Alle das technische Gebilde begleitenden Prozesse und damit auch die daraus ableitbaren Einflussfaktoren stellen bestimmte Forderungen an die Gestalt. Diese Forderungen sind in den Gestaltungsrichtlinien formuliert, so z. B. für

- Fertigungsgerechtes [1.3] (**Bild 2.17**)
- Toleranz- und passungsgerechtes (s. Abschnitt 3.2, Tabelle 3.20)
- Leichtbaugerechtes (**Tabelle 2.8**)
- Kraftgerechtes (**Tabelle 2.9**)
- Montage- und demontagegerechtes Gestalten (**Tabelle 2.10**)
- Recyclinggerechtes Gestalten (ausführliche Darstellung s. [1.3] [1.30] [1.49]).

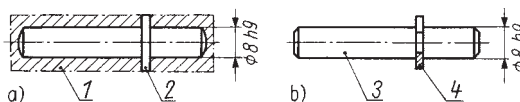


Bild 2.17 Beispiel für eine Gestaltungsrichtlinie zum Spanen – das Spanvolumen ist zu reduzieren

a) großes Spanvolumen 1 durch angedrehten Bund 2; b) kleines Spanvolumen durch Verwendung von gezogenem Halbzeug 3 und genormtem Sicherungsring 4, einfachere Fertigung durch Fase statt Kugelkuppe

Aus der Aufgabenstellung und den Festlegungen des Konstrukteurs folgt, welche Einflussfaktoren, also welche Gestaltungsrichtlinien überhaupt bzw. vorrangig zu beachten sind.

Beispiele: Für die Entwicklung eines Funktionsmusters mit großer Festigkeit, aber kleiner Masse, für das der Konstrukteur die Herstellung durch Gießen vorgesehen hat, sind vorrangig die Gestaltungsrichtlinien zum kraftgerechten, zum leichtbaugerechten und zum gießgerechten Gestalten zu beachten. Dagegen sind die Richtlinien zum Gestalten bei automatisierter Montage für ein Funktionsmuster ohne Bedeutung, bei Vorbereitung einer Serien- oder Massenproduktion aber von zusätzlichem Interesse (s. Tabelle 2.10).

Tabelle 2.8 Richtlinien zum leichtbaugerechten Gestalten [1.3] [1.11] [1.15]

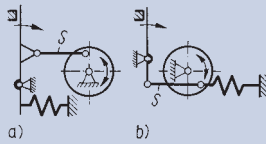
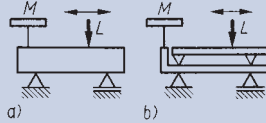
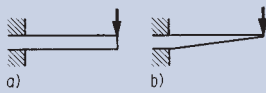
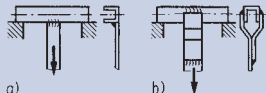
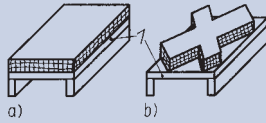
Richtlinien	Beispiele
Reduzierung der Masse muss schon durch Wahl des Funktionsprinzips vorbereitet werden.	1 Querschnitt und damit Masse des Übertragungsgliedes S können wesentlich kleiner gewählt werden, wenn durch Prinzipänderung statt der Druckbeanspruchung (a) eine Zugbeanspruchung (b) erreicht wird.  a) b) 2 Bewegte Last L bewirkt infolge der Durchbiegung der Führungsbahn ein Verkippen des Messelements M (a). Funktionentrennung zwischen Führung und Gestell (b) vermeidet Biegemomente am Gestell und damit Verkippen des Messelements. Führung und Gestell können dadurch wesentlich leichter gebaut werden.  a) b)
Jeweils wichtige Kenndaten der zur Auswahl stehenden Werkstoffe (z. B. Dichte, E-Modul, Korrosions- und Temperaturbeständigkeit, Spanbarkeit, Preis, Lieferbedingungen) sind zu vergleichen. Es ist der Werkstoff auszuwählen, der bei einem Minimum an Masse alle anderen Forderungen ausreichend erfüllt (Stoffleichtbau).	3 Lebensdauer eines durch Korrosion beanspruchten Blechs kann trotz reduzierter Dicke, also geringerer Masse, erhalten bleiben, wenn korrosionsträgerer Werkstoff oder zusätzlich ein gegen Korrosion schützender Anstrich verwendet wird. 4 Unterschiedliche zulässige Spannungen der verschiedenen Werkstoffe für den jeweiligen Belastungsfall bewirken, dass z. B. bei gleicher Festigkeit für die Verwendung als Zugstab Rein-Aluminium etwa 16 % leichter als S235JR und geringfügig leichter als Hartgewebe baut. Bei der Verwendung als Biegestab ist dagegen Rein-Aluminium etwa 38 % leichter als S235JR und nahezu 25 % schwerer als Hartgewebe.
Es sind die tatsächlich wirkenden Beanspruchungen zu ermitteln und zu berücksichtigen. Vermeidbare Unsicherheiten in der Ermittlung dürfen nicht durch erhöhte Sicherheitsfaktoren ausgeglichen werden. Verbleibende Unsicherheiten sind besser durch konstruktive Änderungen zu beseitigen.	5 Dimensionierung aller Querschnitte eines einseitig eingespannten Biegeträgers entsprechend der maximalen Spannung führt zu Überdimensionierung (a). Bei Wahl des Querschnitts entsprechend dem Momentenverlauf ergibt sich ein Biegeträger gleicher Beanspruchung (b) und ein Masseminimum für den Belastungsfall (Formleichtbau).  a) b) 6 Anlenken des Zugstabes an einen Biegebalken nach (a) führt zur Überlagerung verschiedener Spannungszustände, deren gegenseitige Beeinflussung schwer zu erfassen ist, so dass erhöhte Sicherheitsfaktoren notwendig wären. Besser ist es, den Zugstab in der neutralen Faser anzulenken und zusätzlich das Torsionsmoment um die Balkenlängsachse durch symmetrischen Kraftangriff zu vermeiden.  a) b)
Werkstoffe sind nach Art und Volumen nur so einzusetzen, wie es die Beachtung aller für das jeweilige technische Gebilde zutreffenden Gestaltungsrichtlinien verlangt.	7 Entdröhnen eines körperschallerregten flächigen Bauteils f auf der gesamten Fläche (a) ist unökonomisch. Dämpfungsmaßnahmen sind nur an den Orten der größten Schwingungsamplituden notwendig (b) [1.2] [2.53].  a) b) 8 s. auch Tabelle 2.9, Beispiele 4, 5 und 7

Tabelle 2.9 Richtlinien zum kraftgerechten Gestalten [1.2] [2.27] [2.58]

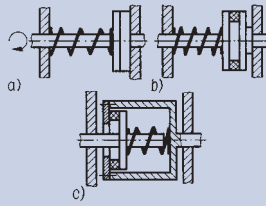
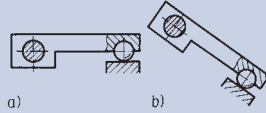
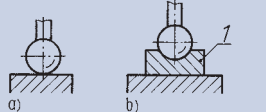
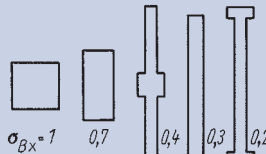
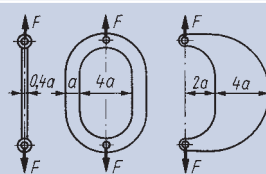
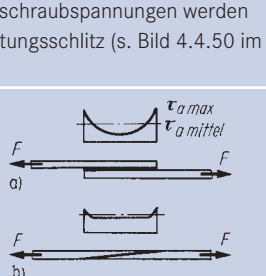
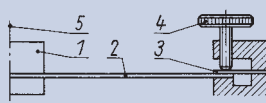
Richtlinien	Beispiele
Größe der Kräfte und Momente ist zu minimieren.	1 Für Reibkupplung nach (a) kann Federkraft reduziert werden durch kleineren Reibradius zwischen Abtriebsscheibe und Gehäuse, durch definierten Reibradius zwischen den Kupplungsscheiben sowie einen Reibbelag mit hohem Reibwert (b). In (c) sind durch kurze, direkte Kraftleitung zusätzlich noch die auf das Lager wirkenden Axialkräfte sowie das Reibmoment zwischen Feder und Gehäuse vermieden.  2 Normalkraft an der Punktberührung zwischen dem geführten Teil und der Nebenführung (a) wird kleiner in geneigter (b) oder vertikaler Anordnung. 
Wirkungen der Kräfte und Momente, also die Spannungen sind zu minimieren.	3 Große Flächenpressung an Kugel-Ebene-Paarung (a) kann vermieden werden durch Zwischenteil 1, ohne die Anzahl der Freiheitsgrade der Paarung (hier 5) einzuschränken (b).  4 Bei gleichem Werkstoffvolumen und gleichem Biegemoment variieren die Biegespannungen für die dargestellten Querschnittsformen etwa von 1 bis 0,2. 
Art und Ort der Spannungen sind zu optimieren, Größe der Spannungen ist zu vergleichmäßigen.	5 Bei gleicher Kraft und gleicher Spannung erfordert Zugbeanspruchung ein wesentlich geringeres Werkstoffvolumen.  6 Deformationen von Führungsbahnen bzw. -flächen infolge der Anschraubspannungen werden vermieden durch Verkleinern des verspannten Volumens und Entlastungsschlitz (s. Bild 4.4.50 im Abschnitt 4.4.4). 7 Unterschiedliche Dehnungen der sich gegenüberliegenden Volumenelemente zweier Zugstäbe an einer Kleb- oder Lötverbindung (a) führen zu Spannungsspitzen. Abgestimmte Verformung, hier durch allmähliches Verringern der Querschnitte, vergleichmäßigt die Spannungen (b). 
Einfluss der Spannungen auf die Funktion ist zu minimieren.	8 Wahlweises Verhindern der Drehbewegung der Funktionseinheit 1 um Achse 5 erfolgt über Klemmung der mit ihr fest verbundenen Ringfedermembran 2, so dass auch bei großer Klemmkraft nur sehr kleine Kippmomente auf 1 wirken. Weiterhin verhindert Blattfeder 3 Drehung von 1 infolge Drehung der Klemmschraube 4. 

Tabelle 2.10 Richtlinien zum Gestalten bei automatisierter Montage und Demontage [1.2] [2.16] [2.40] [2.59]

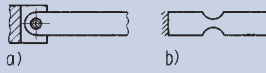
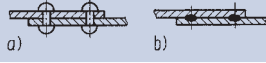
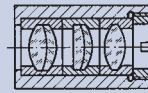
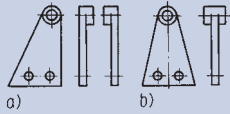
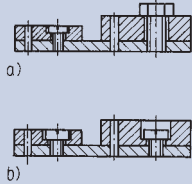
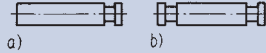
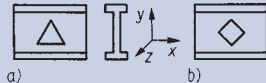
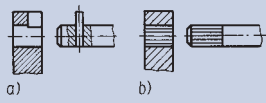
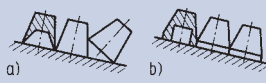
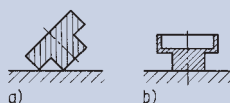
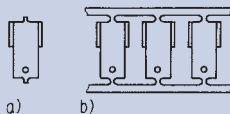
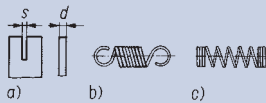
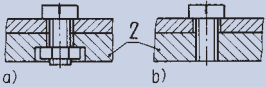
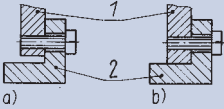
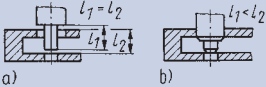
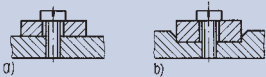
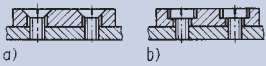
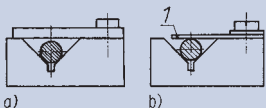
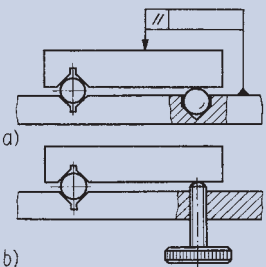
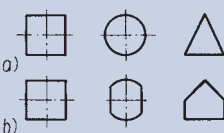
Richtlinien	Beispiele
Anzahl der Bauelemente je Baugruppe bzw. Gerät ist zu minimieren.	1 Drehgelenke (a) können für kleine Drehwinkel realisiert werden durch nur ein elastisches Bauteil (Funktionenintegration) (b). 
	2 Mittelbare Verbindungen (z. B. Nieten) (a) können durch unmittelbare Verbindungen (z. B. Punktschweißen) (b) ersetzt werden. 
	3 Durch Schachtelverbindung (hier Füllfassung) ist Sicherung nur am letzten Bauteil notwendig (s. auch Abschnitt 4.5). 
Wiederholteilgrad ist groß zu wählen.	4 Konstruktiv ähnliche Bauelemente, z. B. rechte und linke (a), sind durch gleiche zu ersetzen (b). 
	5 Unterschiedliche Verbindungselemente (Art und Größe) (a) sind möglichst durch gleiche zu ersetzen (b). 
Symmetrie um möglichst viele Achsen und gleiche Symmetrieachsen für Innen- und Außenform sind anzustreben.	6 Rotationssymmetrische Teile (a) sollten auch in der dritten Dimension symmetrisch gestaltet sein (b). 
	7 Unvollständige Symmetrie um x-Achse (a) sollte durch vollständige ersetzt werden (b). 
	8 Unsymmetrisch angeordnete Drehsicherung (a) erfordert beim Fügen große Ausrichtbewegung (bis zu 180 °). Symmetrie und größere Anzahl von Formschlusselementen (b) vereinfachen das Fügen. 
Durch Gleit-, Hänge-, Rollfähigkeit sowie günstige Massenverteilung ist automatischer Transport zu erleichtern.	9 Kleine Gleitflächen und scharfe Kanten (a) sollten durch größere Flächen und gerundete Kanten ersetzt werden (b), um Gleiten zu erleichtern und ein Aufsteigen der Teile aneinander zu verhindern. 
	10 Gezielte Massenverteilung (b) sichert Vorzugslage; Lösung (a) ist ungünstig. 
Das Ordnen der Teile ist zu erleichtern, ein Verkleben, Verhaken, Anhaften ist zu verhindern.	11 Gestalt der Teile sollte es ermöglichen, die bei Herstellung oft vorhandene Ordnung, hier die der Stanzteile (a) im Stanzstreifen (b), bis zur Montage beizubehalten. 
	12 Spaltbreiten s am Werkstück kleiner als die Dicke d (a) verhindern das Verhaken, ebenso sind Zugfedern eng zu wickeln (b) und bei Druckfedern die Enden anzuwickeln (c). 

Tabelle 2.10 Richtlinien zum Gestalten bei automatisierter Montage und Demontage [1.2] [2.16] [2.40] [2.59] (Fortsetzung)

Richtlinien	Beispiele
Gleichzeitigkeit mehrerer Fügeoperationen ist zu vermeiden.	13 Festhalten der Mutter während der Montage der Schraube (a) wird vermieden durch Gewindebohrung in Teil 2 (b). 
	14 Festhalten des Teils 1 gegen die Wirkung der Schwerkraft während der Schraubenmontage (a) wird vermieden durch Aufsetzen des Teils 1 auf Teil 2 (b). 
	15 Gleichzeitiges Anschnäbeln der beiden Zylinderflächen in der jeweiligen Bohrung (a) wird vermieden durch Maßänderung (b). Fasen erleichtern das Fügen zusätzlich. 
Zwischen den zu fügenden Teilen ist Formschluss zu bevorzugen.	16 Richtige Lage der Bauteile zueinander sollte nicht durch die Positioniergenauigkeit des Roboters (a), sondern durch eine Formpaarung mit Fügehilfen (z. B. Fasen) erreicht werden (b). 
Überbestimmtheiten sind zu vermeiden oder durch toleranzausgleichende Paarungen zu beherrschen.	17 Überbestimmte Paarung (a) erfordert eng tolerierte Bohrungsabstände, um Zwang zu verhindern. Bei Anwendung von Zylinderkopfschrauben wird Zwang vermieden sowie Herstellung und Montage der Bauelemente vereinfacht (b). 
	18 Überbestimmte Lagerung (a) fordert eng tolerierte Maße, um Zwang oder, wie dargestellt, Spiel zu vermeiden. Durch elastische Ausbildung des Teils 1 in (b) sind größere Toleranzen zulässig und Zwangskräfte durch die Wahl der Feder beherrschbar. 
Justierung sollte vermieden werden. Ist sie notwendig, sollte nicht eingepasst, sondern eingestellt werden.	19 Beim Einpassen notwendige mehrmalige Bearbeitung, Montage und Prüfung (a) wird vermieden durch Einstellen (b). 
An allen Bauelementen sind die Greifflächen möglichst gleichartig zu gestalten.	20 Kombination von z. B. ebenen, gekrümmten und winklig zueinander stehenden Greifflächen (a) sollte ersetzt werden durch z. B. nur ebene, parallel angeordnete Greifflächen (b). 

Diese Gestaltungsrichtlinien sind ein Ausschnitt aus einer großen Anzahl und Vielfalt. Weitere wichtige Gestaltungsrichtlinien werden auch in den Abschnitten 3 bis 14 behandelt. Außerdem sei auf die umfangreiche Literatur verwiesen [1.1] [1.3] [1.14] [1.15] [1.17] [2.14] [2.15].

Im **Bild 2.18** sind für eine Kreuzgriffschraube einige der Richtlinien genannt und den betreffenden Gestaltmerkmalen zugeordnet, die bei der Gestaltung berücksichtigt wurden.

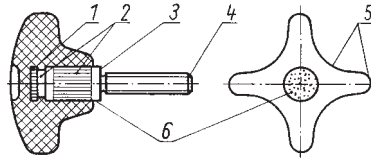
Sind die Funktionsforderungen und die Herstellbarkeit erfüllt, dann stehen die Forderungen zur Ökonomie (z. B. zu Wirkungsgrad, Herstellungsaufwand, Energiebedarf) im Vordergrund. Deshalb ist es vor allem die dritte Grundforderung (s. Abschnitt 2.1.3.1), die noch konkretere Unter-setzungen erfahren hat [1.2] [1.14] [2.26].

So werden für technische Gebilde gefordert:

- Minimale Herstellungskosten
- Minimaler Raumbedarf

- Minimale Masse
- Minimale Verluste
- Optimale Nutzung.

Damit sind für viele Gestaltungsaufgaben die wesentlichen Forderungen zur Ökonomie formuliert. Auch die allgemeinen Forderungen *eindeutig*, *einfach* und *sicher* haben das Ziel, den Aufwand zu verringern.



Gestaltdetail	Gestaltungsrichtlinie	Einflussfaktor
1	Schrumpflänge minimieren	Verbundguss, Spannung
2	Formschluss vorsehen	Verbundguss, Kraft, Moment
3	Kraftfluss nicht über Verbindungsstelle leiten	Kraft
4	Gewindeanfang mit Fase versehen	Montage
5	bei Handbetätigung scharfe Kanten vermeiden und Formschluss anstreben	Ergonomie
6	zu erwartende Formabweichungen durch geforderte Formen der gleichen Art verdecken	Ästhetik, Fertigung

Bild 2.18 Anwendung von Gestaltungsrichtlinien an einem Verbundgussteil (Kreuzgriffschraube) – Herstellung des Einlegeteils wird einfacher und Funktion sicherer, wenn das lange Rändel links bis in die Ringnut reicht [2.27]

Eindeutig sollen sein:

- Das Verhalten des technischen Gebildes bei Abweichung von den Sollwerten der Gestalt
- Die Anordnungen und Kopplungen zur Umwelt (**Bild 2.19**)
- Die Bedienung (z. B. durch sinnfällige und richtig bezeichnete Bedienelemente) [1.2]
- Die Wartung (z. B. durch Festlegungen, was, wann und wie gewartet werden muss)
- Die Beschreibung des technischen Gebildes.



Bild 2.19 Unsymmetrie erleichtert eindeutige Zuordnung zur Umwelt bei Montage eines Transistors (a), eines Schnittteils (b)

Das o. g. Verhalten des technischen Gebildes ist mehrdeutig bei Überbestimmtheiten (s. auch Tabelle 2.10), z. B. Doppelpassungen. Es tritt immer dann Zwang (erhöhte Kräfte, Deformationen) oder Spiel auf, wenn nicht durch besondere technologische Maßnahmen, also größeren Aufwand, die entsprechenden geometrischen und physikalischen Größen identisch sind (Toleranz 0). Zwang entsteht z. B. bei der Anwendung von zwei Festlagern für die Lagerung einer Welle (s. Abschnitt 8.2). Sind Überbestimmtheiten notwendig, lässt sich die Herstellung durch eine zweckmäßige Gestaltung erleichtern bzw. ermöglichen. Zum Beispiel wird eine mehrfach überbestimmte Schwalbenschwanzführung ohne nachstellbare Führungsleiste (**Bild 2.20**) spiel- und zwangfrei herstellbar (a), wenn sie aus drei Teilen besteht (b), so dass die jeweils zu paarenden Flächen in einer Aufspannung (c) bzw. gemeinsam (d) mit dem gleichen Werkzeug bearbeitet werden können.

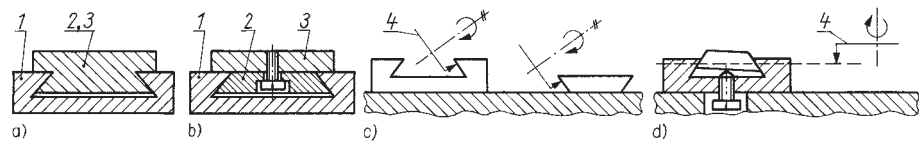


Bild 2.20 Zwang- und Spielfreiheit an einer überbestimmten Schwalbenschwanzführung (Teile 1, 2 und 3) durch Herstellung nach dem Prinzip der Gemeinsamkeiten

a) zweiteilige Schwalbenschwanzführung; b) dreiteilige Schwalbenschwanzführung; c) schematische Darstellung der Bearbeitung der Keilflächen der Teile 1 und 2 in einer Aufspannung mit dem gleichen Werkzeug; d) schematische Darstellung der gemeinsamen Bearbeitung der Teile 1 und 2 an den Paarungsflächen für Teil 3; 4 Werkzeug

Einfach heißt, den Aufwand zu minimieren für

■ **Herstellung**

(z.B. durch einfache Formen, s. Abschnitt 2.1.3.2, und Verzicht auf Sonderwerkstoffe und -behandlung)

■ **Nutzung**

(z.B. durch Beschränkung auf eine oder wenige Energiearten, auf wenige und sinnfällige Bedienelemente, Verzicht auf Zusatzeinrichtungen)

■ **Wartung**

(z.B. durch große Wartungsintervalle, geringe Qualifikationsforderungen an das Wartungspersonal)

■ **Transport**

(z.B. durch kleine oder teilbare Maße und Masse, Unempfindlichkeit bezüglich Raumlage, Klima, Beschleunigung)

■ **Recycling bzw. Verschrottung**

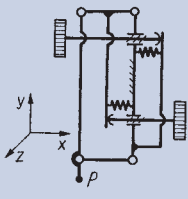
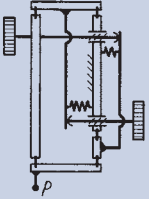
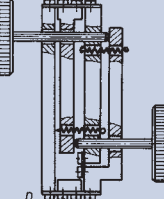
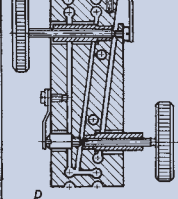
(z.B. durch gute Demontierbarkeit, weitgehende Wiederverwendbarkeit, geringe Umweltbelastung).

Sicher heißt, die Funktion für alle zulässigen Betriebszustände zu gewährleisten, den Einfluss auf die technische und biologische Umwelt in den zulässigen Grenzen zu halten und insbesondere den Menschen vor Gefahren bei Fehlbedienung (z.B. durch Berührungsschutz) und Havarien zu schützen.

2.1.3.6 Vorgehensweise beim Gestalten

Auch für das Gestalten ist es zweckmäßig, die gesamte Aufgabe in Teilaufgaben zu zerlegen und in Teilschritten zu lösen (**Tabelle 2.11**).

Tabelle 2.11 Grobstruktur für den Ablauf des Gestaltungsprozesses am Beispiel einer Feineinstellung [1.2] [2.27]

Entwicklungs- zustände	Technisches Prinzip	Konkretisiertes technisches Prinzip	Erstgestalt	Technischer Entwurf	Konstruktions- dokumentation
Beispiel					Zeichnungs- satz, Stückliste, Montagean- leitung, Justiervor- schrift, Prüfvor- schrift, u. a. Unterlagen
Arbeits- schritte	Konkretisieren		Optimieren		Vervollständigen

Ausgangspunkt ist das technische Prinzip (**Bild 2.21a**). Jedes Bauelement muss so gestaltet werden, dass es die ihm zukommende Teilfunktion sowie alle weiteren Forderungen erfüllen kann (s. Abschnitt 2.1.3.5).

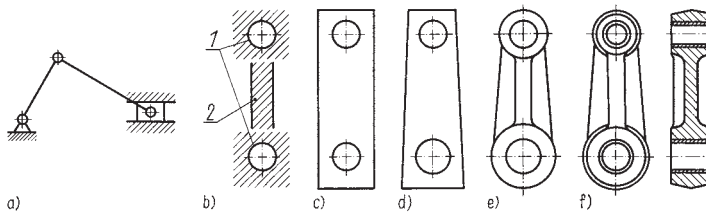


Bild 2.21 Gestaltung einer Kurbel

a) technisches Prinzip – Schubkurbelgetriebe; b) Wirkflächen 1 und Wirkkörper 2 der Kurbel; c) Erstgestalt – Zweckform; d) kraftgerechte Gestaltung; e) Kurbel als Leichtmetallgussteil; f) Ausführungsform für e)

Begonnen wird mit dem Festlegen der Formelemente, die die Hauptfunktion des technischen Gebildes realisieren. Das sind die Wirkkörper bzw. Wirkflächen.

Beispiele: Ein- und Austrittsflächen von Funktionsgrößen, Paarungsflächen mit der Umgebung oder Kräfte, Momente oder andere physikalische Größen übertragende Körperelemente (s. auch Bild 2.12). Für die Kurbel nach Bild 2.21 sind das die beiden Lagerstellen und der stabförmige Körper zur Übertragung der Kräfte und Momente zwischen den Lagerstellen (Bild 2.21b).

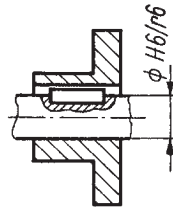
Der Gestaltungsprozess hat zwei Phasen:

- Entwerfen einer Erstgestalt
- Optimieren der Erstgestalt.

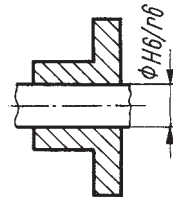
Beispiel: Die Variante im Bild 2.21c zeigt eine Erstgestalt für die Kurbel. Damit können die Funktionsforderungen erfüllt werden. Zur Optimierung ist es wichtig, eine ausreichende Festigkeit der Kurbel bei einem Minimum an Masse und Kosten zu erreichen sowie einen beanspruchungsgerechten Werkstoff an den Lagerstellen einzusetzen. Entsprechend dem Kraft- und Momentenverlauf und der daraus resultierenden Beanspruchung kann die Zweckform (Bild 2.21c) zu der kraftgerechten Form (Bild 2.21d) verbessert werden. Ist das Fertigungsverfahren gewählt, ergibt sich eine fertigungsgerechte Form analog Bild 2.15. Soll die Kurbel z. B. als Leichtmetallgussteil gefertigt werden (Bild 2.21e), ist es zweckmäßig, spezielle Lagerbuchsen, z. B. aus Aluminium-Bronze (s. Abschnitte 3.6 und 8.2) einzusetzen. Die Beachtung weiterer Einflussfaktoren und ihrer Gestaltungsrichtlinien (s. Abschnitt 2.1.3.5) führt dann zu der endgültigen Gestalt der Kurbel. Bild 2.21f zeigt dafür ein Beispiel.

Neben der qualitativen Festlegung der Gestalt sind immer auch quantitative Festlegungen vorzunehmen. Diese Bauteildimensionierung wird in den folgenden Abschnitten 2.2 sowie 3 bis 14 behandelt. Die dazu oft notwendigen Berechnungen lassen sich in vielen Fällen vermeiden oder erleichtern, wenn eine qualitativ günstigere Gestalt gewählt wird. So ist z. B. das Nachrechnen der Toleranzen und eventueller Zwangskräfte unnötig, wenn keine Überbestimmtheiten vorhanden sind.

Beispiel: Die Berechnung einer Welle-Nabe-Verbindung (s. auch Abschnitte 4 und 7) wird einfacher, wenn die Querschnittsschwächung und Kerbwirkung durch eine Passfedernut nach **Bild 2.22** bei Anwendung nur einer Presspassung gemäß **Bild 2.23** beseitigt wird.

**Bild 2.22**

Welle-Nabe-Verbindung mit Presspassung und Passfeder

**Bild 2.23**

Welle-Nabe-Verbindung nur durch Presspassung

2.1.4 Bewerten und Auswählen von Konstruktionselementen

Konstruieren heißt, eine optimale technische Lösung zu entwickeln. Da jede technische Aufgabe mehrere Lösungen besitzt, muss der Konstrukteur die beste auswählen. Diese Situation tritt in jeder Phase des konstruktiven Entwicklungsprozesses auf. Besonders wichtige *Entscheidungen* sind:

- Festlegen der Forderungen bei der Aufgabenpräzisierung
- Auswahl des optimalen technischen Prinzips
- Festlegen der optimalen Gestalt.

Lösungsvarianten können nach den Abschnitten 2.1.2 und 2.1.3 auf sehr unterschiedliche Weise entstehen. Die Bewertung ist nur an vergleichbaren Varianten durchführbar. Es müssen hinreichende Informationen über diese Varianten vorliegen. Die zur Entscheidung dienenden Informationen sollten so konkret als möglich sein. Zweckmäßig sind folgende *Arbeitsschritte*:

- Analyse der vorliegenden Varianten (Fehlerkritik)
- Bewerten der Varianten
- Auswahl und Entscheidung.

Aufwand und Gründlichkeit dieser Tätigkeit richten sich nach der ökonomischen Tragweite der Entscheidung.

Für die Aufgabe in Tabelle 2.3 zeigen die **Tabellen 2.12 und 2.13** beispielhaft das Vorgehen. Die Fehlerkritik ermittelt die Eigenschaften der Lösungen, indem sie jede Variante hinsichtlich Funktion, Fertigung u. a. Forderungen analysiert. Außerdem gibt sie vor der Entscheidung noch Hinweise zu deren Verbesserung. Quantitative Angaben sind auf dieser Abstraktionsebene nur begrenzt möglich, wie z. B. das Abschätzen der Betätigungskraft F_H unter Beachtung des Reibwertes. Die sich anschließende Bewertung bereitet die Auswahl vor. Dabei ist die Wichtigkeit der einzelnen Forderungen in der präzisierten Aufgabenstellung (Tabelle 2.3b) zu berücksichtigen. Die für das Gesamtergebnis wesentlichen Forderungen sind als Bewertungskriterien heranzuziehen und müssen auf alle Varianten zutreffen.

Fest- und Mindestforderungen eignen sich zur Vorselektion von Varianten (Tabelle 2.13a) auf der Grundlage von Ja-Nein-Entscheidungen. Das jeweilige Kriterium ist so zu formulieren, dass nur zwei Werte (0 oder 1) eindeutig feststellbar sind. Die Mehrzahl der Forderungen ist feiner graduert. Sie bilden die Basis für die mehrwertige Bewertung.

Tabelle 2.12 Kritik von Prinzipvarianten der Tischführung der Aufgabe in Tabelle 2.3

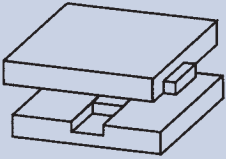
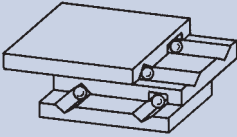
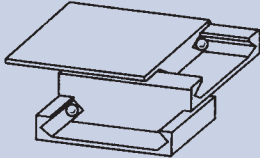
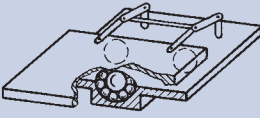
Varianten Nr.; Skizze	Fehlerkritik	
	Vorteile	Nachteile
1 Offene, zweidimensionale Gleitführung 	einfacher Aufbau, geringe Bauhöhe, vertikal spielfrei, hohe Steifigkeit	Reibung groß (erforderliche Betätigungskraft $F_H > 10\text{ N}$), überbestimmt durch Drehsicherung, Kraftaufnahme vorzugsweise vertikal, Abhebesicherung erforderlich
2 Offene Wälzkörperführung 	Reibung gering ($F_H < 10\text{ N}$), spielfrei, zwangfrei	hohe Fertigungskosten (Härten und Schleifen verschiedener Führungsbahnen), Kraftaufnahme vorzugsweise vertikal, hohe Flächenpressung, Abhebesicherung erforderlich
3 Geschlossene Wälzkörperführung 	Reibung gering ($F_H < 10\text{ N}$), Kraftaufnahme in beliebiger Richtung, Spiel und Zwang durch Verspannen beherrschbar, modularer Aufbau	hohe Fertigungskosten (jedoch geringer als bei 2), überbestimmt, hohe Flächenpressung
4 Lenkergeradführung mit Kugelwälzelementen 	Reibung gering ($F_H \approx 10\text{ N}$), kleine Bauhöhe, Bearbeitung einfach (Schleifen ebener Führungsflächen)	Drehsicherung durch zusätzliches Getriebe, Abhebesicherung erforderlich, hohe Flächenpressung, Kraftaufnahme vorzugsweise vertikal

Tabelle 2.13 Bewerten der Lösungen in Tabelle 2.12

a) zweiwertige Bewertung; b) Bewertungsmaßstab; c) mehrwertige Bewertung

a)

Kriterium	Varianten			
	V_1	V_2	V_3	V_4
$F < 10\text{ N}$	0	1	1	1

b)

Werteskala		Forderungsskala
Punkte p	Erfüllungsgrad	Kriterium: Spiel S
4	sehr gut	$S = 0$ (offene Führung)
3	gut	$S \rightarrow 0$ (justierbar)
2	ausreichend	$0 < S_{\max} < S_{\text{zul}}$
1	noch tragbar	$0 < S_{\max} = S_{\text{zul}}$
0	unbefriedigend	$S > S_{\text{zul}}$

c)

Bewertungskriterien K_j	Einflusszahlen g_j	Varianten V_i					
		V_2		V_3		V_4	
		p_{2j}	$g_j \cdot p_{2j}$	p_{3j}	$g_j \cdot p_{3j}$	p_{4j}	$g_j \cdot p_{4j}$
<i>Funktion</i>							
K_1 Spiel	4	4	16	3	12	4	16
K_2 Genauigkeit	4	3	12	3	12	4	16
K_3 Verhalten gegenüber Störgrößen	8	2	16	4	32	1	8
<i>Struktur</i>							
K_4 modularer Aufbau	4	2	8	4	16	3	12
K_5 Bauraum	3	2	6	3	9	1	3
<i>Fertigung</i>							
K_6 Fertigungsaufwand	6	2	12	3	18	2	12
Σ	29	70		99		67	
Gesamtwerte $x_i = \frac{\sum g_j \cdot p_{ij}}{p_{\max} \cdot \sum g_j}$		$x_2 = 0,605$		$x_3 = 0,853$		$x_4 = 0,578$	

Jedes Kriterium bezieht sich auf eine durch Forderungen belegte Eigenschaft der zu bewertenden Lösungen. Um die Ergebnisse für die verschiedenen Kriterien zu einem Gesamtwert zusammenfassen zu können, benötigt man eine für alle Kriterien einheitliche Werteskala. Bewährt hat sich eine fünfstufige Einteilung (Tabelle 2.13b) [2.9] [2.17], der für jedes Kriterium eine nach Möglichkeit quantifizierte Forderungsskala zuzuordnen ist. Beide Skalen bilden den Bewertungsmaßstab. Er soll die Subjektivität beim Bewerten herabsetzen. Hauptproblem beim Bewerten ist das Ermitteln der technischen und ökonomischen Eigenschaften der entworfenen Lösung in einer möglichst frühen Entwicklungsphase. Erfahrungswerte wie im Bild 2.11 – als Forderungsskala geeignet – sowie Rechnerprogramme und Relativkostenkataloge [2.18] [2.56] unterstützen die Bewertung. Die unterschiedliche Bedeutung der Bewertungskriterien für das Entwicklungsergebnis berücksichtigt man durch Einfluss- oder Gewichtungsfaktoren g_j ($0 < g_j \leq 1$ oder $1 \leq g_j \leq 10$). Ihr absoluter Wert ist beliebig, jedoch müssen ihre Relationen die realen Verhältnisse erfassen. Wesentliche Kriterien erhalten eine hohe Einflusszahl. Die Gesamtbewertung ermittelt man mit Hilfe einer Bewertungstabelle (Tabelle 2.13c).

Sie enthält nur noch die bei der Vorselektion (Tabelle 2.13a) positiv bewerteten Lösungen V_2 , V_3 , V_4 . Der idealen Lösung $x_i = 1$ kommt V_3 am nächsten.

Für die Entscheidung sind prinzipiell zwei *Regeln* geeignet:

- Wähle V_i mit $x_i = x_{\max}$!
- Wähle V_i mit $x_i \geq x_{\text{befriedigend}}$!

Die erste selektiert eine Variante, die zweite Regel solche Varianten, die besser als ein gewähltes Vergleichsobjekt sind und für weitere Untersuchungen bereitstehen.

Beim Entwerfen einfacher Konstruktionselemente verlaufen Bewertungs- und Auswahlvorgänge oft nur gedanklich, ohne schriftliche Fixierung ab. Vereinfachungen sind auch möglich bei der Auswahl von Elementen aus Firmenschriften, DIN-Normen und Wiederholteilkatalogen [2.5] [2.24], die alle notwendigen Parameter aufbereitet enthalten. In solchen Fällen (z. B. bei Wälzlager, Welle-Nabe-Verbindungen, Zahnrädern, Kupplungen) sind auch rechnerunterstützte Auswahlssysteme anwendbar [2.7] [2.8] [2.69].

2.2 Rechnerunterstütztes Konstruieren

Die Rechentechnik ist zu einem unverzichtbaren Hilfsmittel für den Konstrukteur geworden. So genannte CAx-Systeme (CA für „Computer Aided“, x für den jeweiligen Einsatzfall) unterstützen im Dialog mit dem Menschen alle informationellen Prozesse des Lebenszyklus eines Produktes [2.2] [2.7] [2.8] [2.19]. Für mechanische Elemente und Baugruppen fördern CAx-Systeme

- Die Qualität der Konstruktionsergebnisse durch Variantenentwicklung, exakte Dimensionierung, Optimierung, Funktions- und Fertigungssimulation sowie
- Die Produktivität der Konstruktionsarbeit (Beschleunigungsfaktor 1,4 bis 5 je nach Konstruktionsaufgabe [2.35]) und der nachfolgenden Prozesse durch rationelle Datenspeicherung und -bereitstellung, automatisches Zeichnen, maschinelle Dokumentation der Ergebnisse, Wiederverwendung und Anpassung bewährter Konstruktionen, rationellen Änderungsdienst sowie direkten Datenaustausch mit anderen Betriebsbereichen.

2.2.1 Rechnereinsatz in der Produktentwicklung

Für das Entwerfen, Gestalten und Dimensionieren mechanischer Bauteile und Baugruppen sind durchgängige CAD/CAM-Systeme (CAD: **Computer Aided Design**, CAM: **Computer Aided Manufacturing**) das dominierende Arbeitsmittel in der Praxis (**Bild 2.24**).

CAD-Systeme unterstützen drei typische Konstruktionsarten [1.16] [2.7] :

Neukonstruktion. Sie ist erforderlich, wenn keine Lösungen für die Konstruktionsaufgabe verfügbar sind. Der Entwurf erfolgt manuell und erfordert oft auch die Suche nach geeigneten Prinzipvarianten entsprechend Abschnitt 2.1.2.

Anpassungskonstruktion. Der Entwurf einer neuen Lösung geht hierbei von einem verwendbaren Vorgänger aus. Mittels Variation (s. Tabelle 2.7) modifiziert man die Gestalt (Geometrie, Abmessungen, Werkstoff) entsprechend den neuen Anforderungen (wie z. B. durch Austausch von Elementen in Bild 2.3).

Variantenkonstruktion. Die konstruktive Ausführung besitzt eine feste Geometrie, deren Abmessungen parametrisch variierbar sind. Grundlage ist ein Mastermodell, das man nach den in einer objektspezifischen Konstruktionslogik festgelegten Regeln modifiziert. Bei Baugruppen lässt sich nach einem Bauprogramm aus einem begrenzten Bausteinsortiment das Produkt aufbauen [2.55]. Diese stets firmenspezifischen Variantenprogramme benötigen eine umfangreiche Aufbereitung, reduzieren aber wiederkehrende Routinearbeiten erheblich. Beispiele sind Mikroskopobjektive, Getriebe und Antriebsbaugruppen.

Ergebnis aller drei Konstruktionsarten ist eine rechnerinterne Beschreibung der Produktgestalt, die bei den heute dominierenden 3D-CAD-Systemen als virtueller Prototyp nutzbar ist. Gehäuseteile, Bedienelemente und andere Bauteile mit Freiformflächen entstehen nicht selten als körperliche Modelle aus gut formbaren Werkstoffen (Industriedesign). Mittels 3D-Scanning lassen sie sich in die gleiche rechnerinterne Darstellung überführen und mit den Geometriefunktionen der CAD-Software weiter bearbeiten (*Reverse Engineering*) [2.7].

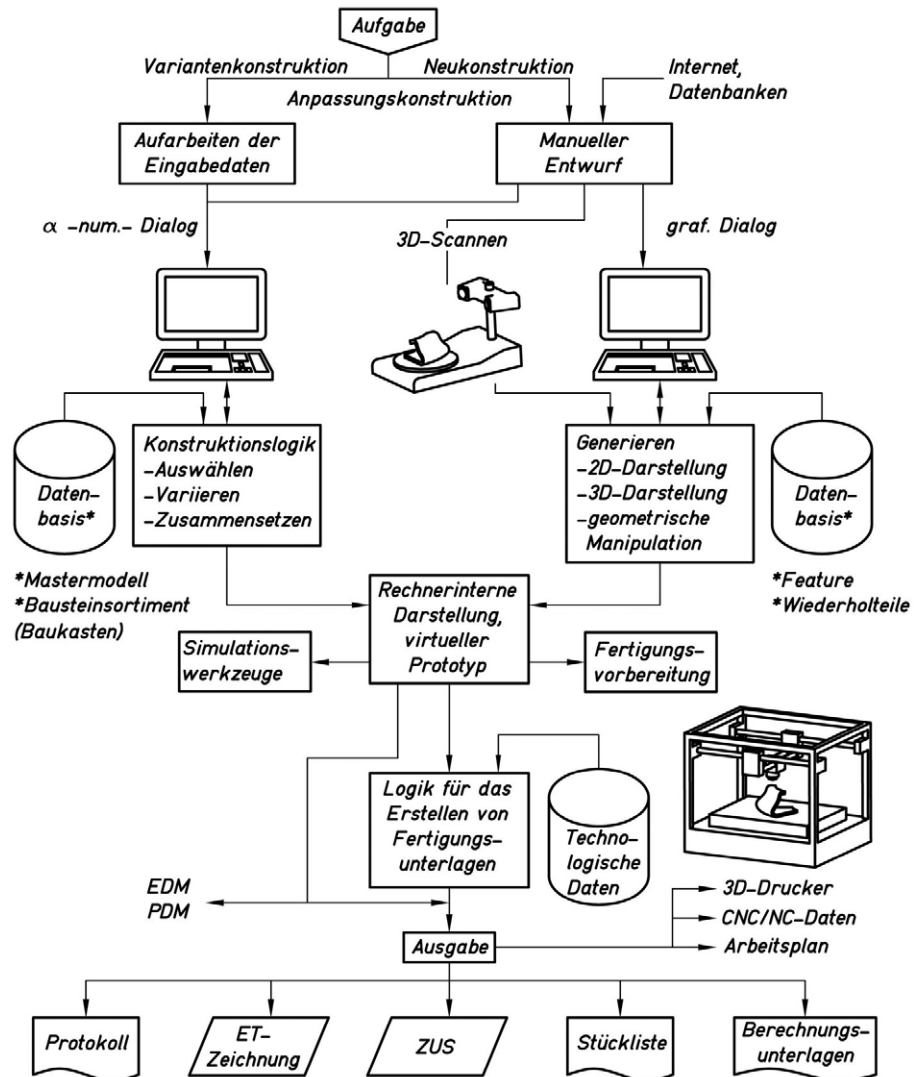


Bild 2.24 Grundsätzlicher Aufbau eines CAD/CAM-Systems

CAD-Systeme besitzen Berechnungsmodule, die das Dimensionieren der entworfenen Gestalt ohne Übergang in ein anderes Programm unterstützen. Additive Fertigungsverfahren gestatten das entworfene virtuelle Produktmodell kostengünstig z. B. mittels 3D-Druck körperlich zu realisieren. Damit ist eine frühzeitige Kontrolle wichtiger Produkteigenschaften, die Erprobung des Produktes bis hin zur Fertigung von Kleinserien möglich (s. auch Abschnitt 3.6.4)[2.15]. Die CAD-Daten sind direkt verwertbar vom angekoppelten CAM-System, das Steuerdaten für Werkzeugmaschinen, Arbeitspläne, Montageabfolgen und weitere Informationen erzeugt. Die Ausgabe gedruckter Unterlagen wird immer mehr zur Ausnahme in der industriellen Praxis, da über EDM/PDM-Systeme (EDM: Engineering Data Management, PDM: Product Data Management) die Konstruktionsergebnisse in digitaler Form allen Bereichen eines Unternehmens zugänglich sind (VDI 2219, s. Tabelle 2.21).

Weit verbreitet ist das Konfigurieren technischer Erzeugnisse mit einem hohen Anteil von Standard- und Zukaufteilen, die der Entwickler leicht aus Normteillbibliotheken der CAD-Systeme

und Datenbanken der Hersteller als 3D-Modell in seinen Entwurf einfügen kann. Dabei ist zu beachten, dass mit jedem neuen Bauteil Kosten von bis zu 2000 Euro für dessen Verwaltung und Datenpflege im Unternehmen entstehen [2.39]. Zur Vermeidung einer zu großen Teilevielfalt beschränken Firmen unter anderem das zugelassene Normteilsortiment. Zur ganzheitlichen und unternehmensweiten Verwaltung und Steuerung aller Produktdaten bietet PLM (Product Lifecycle Management) einen Ansatz, der Softwaremodule für alle Prozesse des gesamten Produktlebenszyklus umfasst (Bild 2.25).

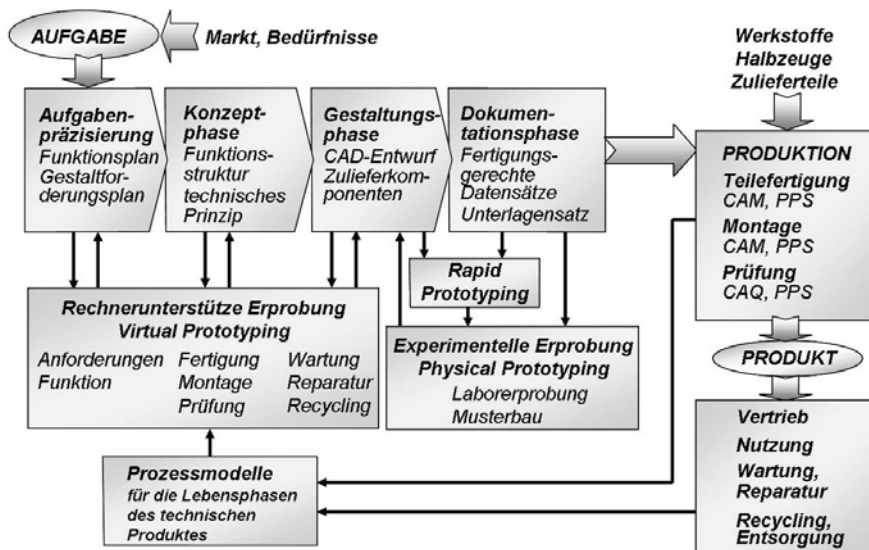


Bild 2.25 Stellung von Virtual Prototyping im Produktlebenszyklus

In diesem System erhält das *Virtual Prototyping* eine zentrale Funktion. Die mit CAD erarbeitete digitale Produktbeschreibung ist ein virtueller Prototyp und dient als Modell für die Simulation seines Verhaltens, das für alle Phasen des Produktlebenszyklus erfolgen kann. Ziel dieses Verfahrens ist die Überprüfung und Optimierung der Eigenschaften des entworfenen Produktes unter weitgehender Vermeidung aufwendiger physischer Modelle und deren Erprobung.

Für Produkte der Feinwerktechnik ist die Simulation der Funktion hinsichtlich Statik, Dynamik, Kinematik, Einflüssen von Störgrößen (Kräfte, Temperatur, Masse, Trägheit, Reibung, Gestaltabweichungen u. a.) dominierend. Aber auch Bauraumuntersuchungen, Fertigungs-, Montage- und Prüfsimulationen sind hilfreich bis hin zur rechnerunterstützten Erprobung der Demontage und von Recyclingoperationen am Lebensende des Produktes. Dafür sind jedoch entsprechende Prozessmodelle und zugehörige Software erforderlich.

Auch ohne ein ausgereiftes Produktmodell sind Simulationen möglich. So lassen sich die Anforderungen an ein zu entwickelndes Produkt ermitteln, wenn der Prozess simuliert wird, in dem es nach Fertigstellung eingesetzt werden soll (Bild 2.26). Messtechnik, Medizintechnik, Büro- und Haushaltstechnik sowie weitere Gebiete eignen sich dafür.

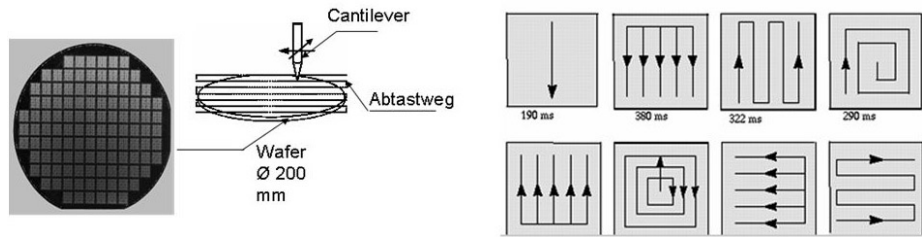


Bild 2.26 Simulation der Abtastung einer Waferoberfläche

Sie liefert Anforderungen und Informationen für den Entwurf der zu konstruierenden Messeinrichtung:

- Aufteilung der Bewegungskordinaten auf Cantilever und Wafer
- Positioniergeschwindigkeiten, Beschleunigungen und Toleranzen für die bewegten Elemente
- Varianten von Abtastwegen mit zugehöriger Messzeit.

In der Konzeptphase kann man mittels Simulation technischer Prinzipie wichtige Produktmerkmale für die nachfolgende Gestaltungsphase ermitteln. Die **Bilder 2.27 bis 2.29** zeigen unter Nutzung des Entwurfssystems MASP Beispiele für die Prinzipsimulation [2.25] [2.69].

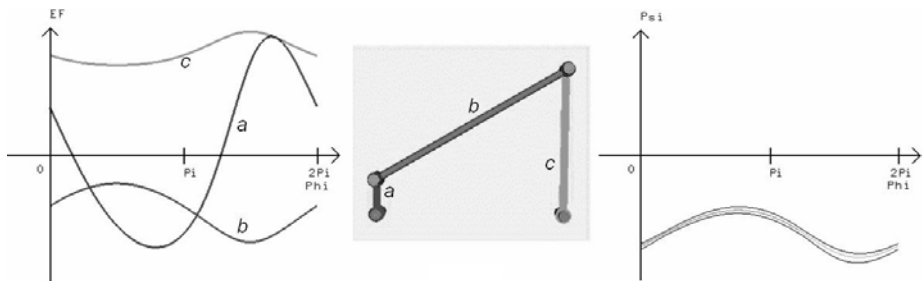


Bild 2.27 Simulation der Einflüsse der Längentoleranzen der drei Getriebeglieder einer Kurbelschwinge auf den Abtriebswinkel Psi der Schwinge c, die als Ergebnis ein Toleranzband zeigt (s. auch Tabelle 13.1.2)

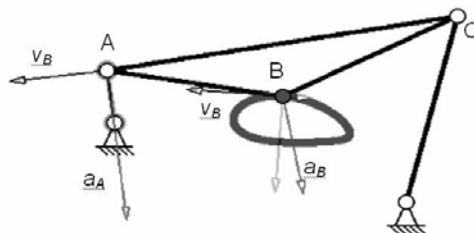


Bild 2.28

Bewegungssimulation einer Kurbelschwinge mit Dreieckskoppel ABC; B Koppelpunkt mit zugehöriger Bahnkurve; v_A , v_B Geschwindigkeiten; a_A , a_B Beschleunigungen

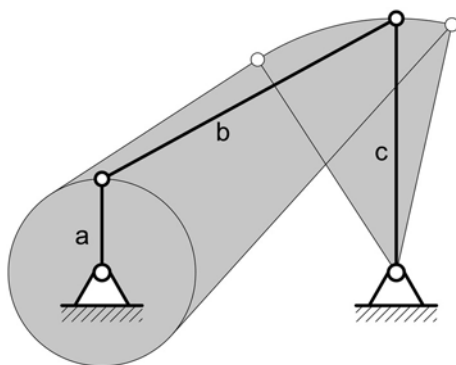


Bild 2.29 Bauraumsimulation der Kurbelschwinge in Bild 2.28

Sie zeigt die während der Bewegungssimulation von den Getriebegliedern überstrichene Fläche an, was besonders bei unübersichtlichen mehrgliedrigen Getrieben hilfreich ist.

Die sehr anschaulichen 3D-Darstellungen virtueller Prototypen eignen sich sehr gut zur Kundenpräsentation, für interdisziplinäre Design-Reviews, zur Schulung von Fachpersonal für Vertrieb, Wartung usw. Die Kommunikation zwischen Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen wird wesentlich erleichtert, wenn man die Visualisierung mittels *Virtueller Realität* (VR) durchführt (**Bild 2.30**), wobei das Objekt durch Stereoprojektion dargestellt und im Raum in Echtzeit interaktiv manipulierbar ist [2.7] [2.8] [2.37] [2.67].



Bild 2.30 Vergrößerte Darstellung einer Pick- und Place-Baugruppe im virtuellen Raum

Mit der manuellen Steuerung lassen sich beliebige Positionen und Ansichten auch im Inneren des Produktmodells einstellen. Die Bewegungen aller Bauteile des Mechanismus, der eine Zweikoordinatenbewegung erzeugt, sind mittels Simulation beobachtbar. Modelliert man die eingebauten Lager, den Motor, die Zahnriemen- und Zahnradgetriebe als Schallquellen, so sind die Geräusche der Baugruppe über das spezielle Akustiksystem dieser Anlage hörbar. Durch virtuelles Abschalten einzelner Quellen kann man deren Anteil am Gesamtgeräusch verdeutlichen [2.37] [2.66].

In der Produktion und in den nachfolgenden Prozessen lässt sich die Kombination von realen Objekten und virtuellem Prototyp vorteilhaft nutzen (**Bild 2.31**). Mit dieser Technologie der *Augmented Reality* (AR) können in einer realen Szene dem Operateur grafische Darstellungen zu bearbeitender Formelemente, zu bewegende Bauteile beim Montieren oder Justieren sowie Handlungsanweisungen am jeweiligen Objekt u.ä. im Prozess anschaulich vermittelt werden [2.31] [2.67] [2.68].

Durch Rechneinsatz und Virtual Prototyping lassen sich folgende Effekte in der Produktentwicklung erreichen [2.67]:

- **Höhere Produktivität:**
Bis zu 50 % weniger technischer Überarbeitungsaufwand und überflüssige Dateneingabe, um bis zu 20 % kürzere Entwicklungsdauer durch Wiederverwendung von Teilen.
- **Direkte Kosteneinsparungen:**
Geringere Kosten für Fehlerbehebungen/Nacharbeit (erhöhte Qualität), um 25 % bis 65 % geringere Produktkosten, bis zu 15 % weniger Ausschuss/Nacharbeitung in der Fertigung.
- **Einführung neuer Produkte:** Produkteinführungen sind bis zu zweimal erfolgreicher.
Bis zu 40 % kürzere Time-to-Market und verringerte Zyklusdauer für neue Produkte.

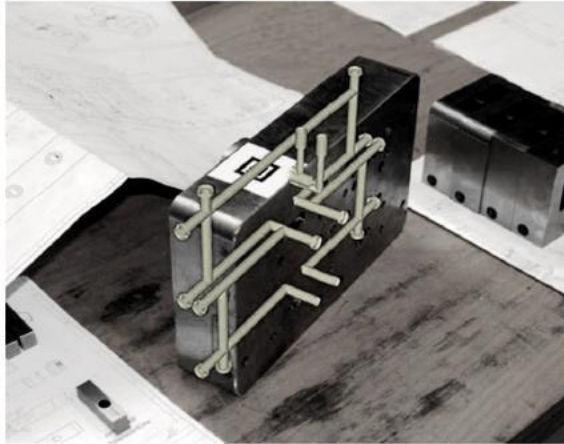


Bild 2.31 AR-Anwendung bei der Teilefertigung durch Projektion des CAD-Modells auf das zu produzierende Werkstück

An dem monolithischen Hydraulik-Block sind 32 Bohrungen und acht Gewinde herzustellen. Eine Kontrolle ist nach der Fertigstellung unverzichtbar. Die Inspektionszeit verringerte sich durch AR um den Faktor 3 gegenüber der Nutzung von bisher üblichen Tabellenzeichnungen. Die Fehlerrate sank auf Null [2.31].

Auf eine experimentelle Erprobung (s. Bild 2.25) kann man dennoch insbesondere bei Neuentwicklungen und bei Serienprodukten mit großen Stückzahlen nicht vollständig verzichten. Die generativen Fertigungsverfahren ermöglichen eine zeitsparende Bereitstellung physischer Prototypen (*Rapid Prototyping*; s. auch Abschnitt 3.6.4) [2.15].

2.2.2 Rechnerunterstützter Entwurf

Beim Entwurf der Gestalt von Einzelteilen und Baugruppen lassen sich das Zeichnen und Detailieren mittels CAD-Systemen rationalisieren und Zeiteinsparungen von 15 % bis 95 % erreichen. In der Praxis dominieren 3D-CAD-Systeme beim Entwurf technischer Produkte, die rechnerintern ein dreidimensionales geometrisches Modell des Bauteils oder der Baugruppe generieren [2.12] [2.45] [2.46].

Ein wichtiger Vorzug der modernen 3D-CAD-Systeme ist die *parametrische* Modellierung. Geometrische Parameter (Längen, Winkel, Abstände, Radien) sowie nichtgeometrische Größen (Kräfte, Momente, Werkstoffdaten u. a.) sind Variable im Geometriemodell und lassen sich durch arithmetische (+, -, x, :), logische (<, =, >, UND, ODER) und geometrische (horizontal, vertikal, parallel, koinzident usw.) Beziehungen verknüpfen. Sie ermöglichen Änderungen des Entwurfs unter Beibehaltung des Zusammenhangs, in dem die Bauteile stehen. Die *assoziative* Verknüpfung unterstützt den Entwurf zusammenhängender Elemente und das Erzeugen von Maßvarianten für eine entworfene Grundgestalt (Variantenkonstruktion auf Basis eines Mastermodells).

Das Vertikallager des Justiertisches in Bild 2.4b sei nach dem Prinzip der Variantenkonstruktion zu entwerfen (**Bild 2.32**). Die rechnerunterstützte Modellierung erfordert eine gute Vorbereitung. Ideen für die Varianten der Lagerwelle, der Lagerbuchse, der Stütz- und Befestigungselemente erarbeitet der Konstrukteur durch Vorüberlegungen, zweckdienlich unterstützt durch Handskizzen [2.43].

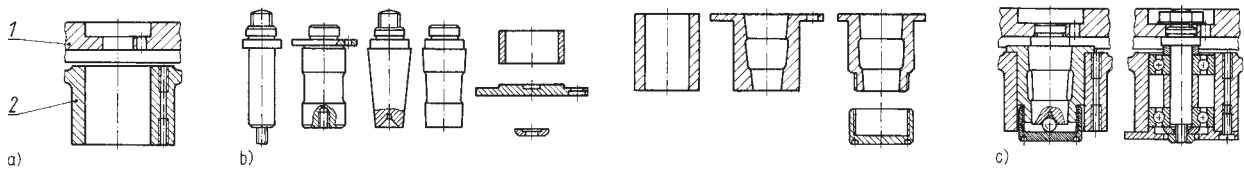


Bild 2.32 Entwurf der Lagerung eines Justiertisches mit Baukastenelementen, s. auch Bild 2.4

a) Aufgabenstellung; b) Baukastensortiment (Auszug); c) formal erzeugte und automatisch gezeichnete Varianten

1 Tisch; 2 Gestell

Wichtige Arbeitsschritte beim rechnerunterstützten Entwurf der kegelförmigen Welle nach Bild 2.32c) zeigt **Tabelle 2.14**.

Der Nutzer beginnt beim Entwurf im Skizzenmodus und erarbeitet im Dialog schrittweise eine zweidimensionale Darstellung der Kontur (Tabellenbild 1). Sie zeigt die Neigung der Kegelmantellinie und den Freistich, der die Reibfläche des Kegels verkürzt und zur Aufnahme von Abrieb und Schmierstoff dient.

Der Basiskörper der Kegewelle entsteht durch Rotation der Kontur um die vertikale Drehachse als 3D-Modell (Tabellenbild 2).

Den Zylinderansatz, der das zylindrische Distanzstück mit dem Abstand (a) zwischen Lageroberkante und Tisch sowie das Befestigungsgewinde (Länge l) aufnehmen soll, erzeugt man aus der Kreisfläche (Durchmesser d_8) durch ihre Verschiebung (Extrusion) bis zur Höhe d_9 (Tabellenbilder 3 und 4). Das Maß d_9 ergibt sich zu $d_9 = a + l$. Aus den noch getrennten Volumina des Kegels und des Zylinders entsteht durch die Boole'sche Operation „Vereinigung“ ein Körper.

In gleicher Weise werden der Gewindeansatz, der Gewindefreistich und die zum Stützlager gehörende Kegelfläche mit dem Öffnungswinkel d_{23} modelliert.

CAD-Systeme unterstützen mit der Featuretechnologie (s. [2.7] und VDI 2218) das Modellieren häufig vorkommender Formelemente, wie die Gewindedarstellung (Tabellenbild 7), die Fase (Tabellenbild 8) und die Bohrung mit Senkung (Tabellenbild 11).

Mit der Kegewelle liegt das erste Bauelement der Lagerung als 3D-Modell vor.

Im nächsten Entwurfsschritt ist die Lagerbuchse zu modellieren. Unter Nutzung der Assoziativität kann der Konstrukteur die Außenmaße der Welle für den Entwurf der passenden Kegelbuchse nutzen (**Tabelle 2.15**). Der Skizzenmodus übernimmt die Wellenmaße im Hauptschnitt der Kegewelle, so dass für die Kontur der Buchse nur noch die Außenmaße d_1 bis d_8 einzugeben sind. Für die einwandfreie Funktion des Lagers ist ein „Nachsetzen“ der Welle erforderlich, was durch Versatz der Abschlusskanten des Kegels gegenüber der Buchse in Richtung der Kegelspitze zu erreichen ist (s. Abschnitt 8.2.4, Bild 8.2.30). Funktionswichtig festzulegen sind somit noch das Radienmaß d_0 sowie der Versatz d_8 .

Tabelle 2.14 Assoziative, wirkflächenorientierte Modellierung der Kegelwelle

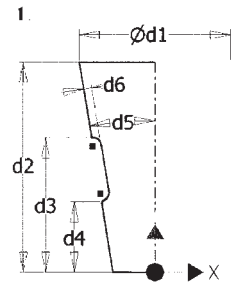
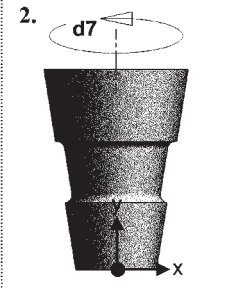
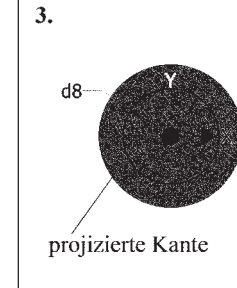
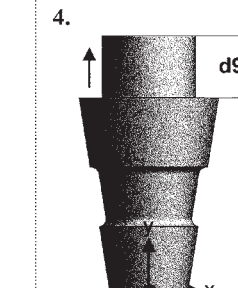
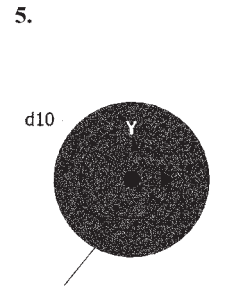
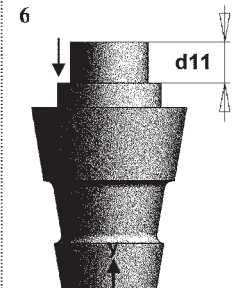
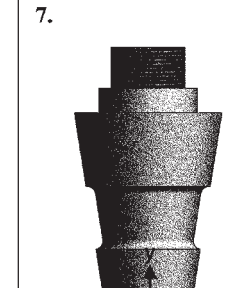
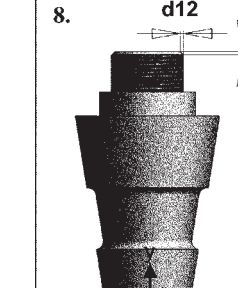
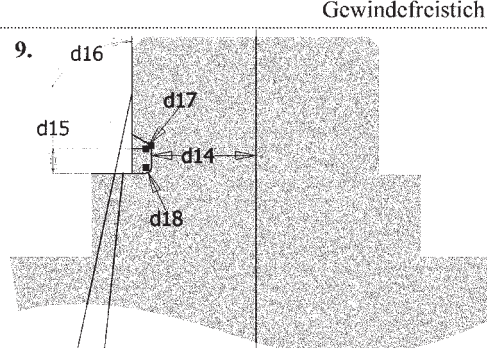
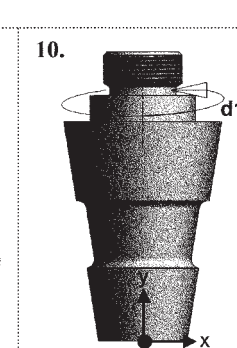
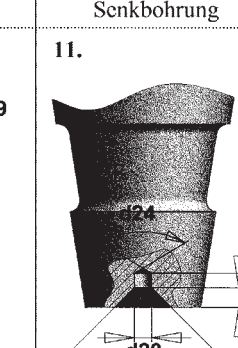
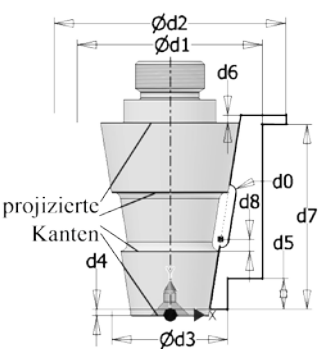
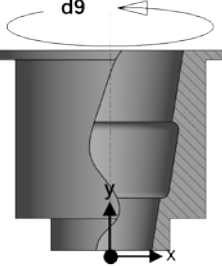
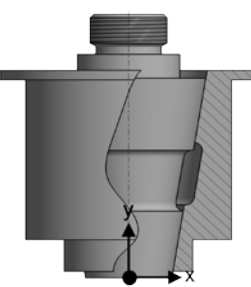
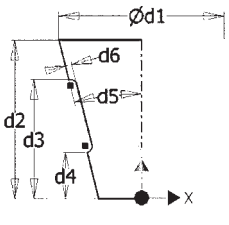
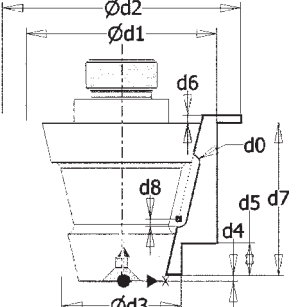
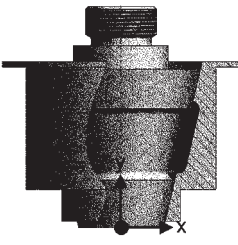
Basiskörper Kegel		Zylinderansatz	
1.  Parametrische 2D-Skizze in der xy-Ebene (Abhängigkeiten: Achse vertikal und koinzident zum Koordinatenursprung)	2.  Umdrehung mit Winkel d7 (Drehen, Rotation, Welle) voll um die Achse	3.  Skizze auf oberer Kreisfläche, (Abhängigkeit: konzentrisch zu projizierter Kante)	4.  Extrusion mit Höhe d9 (Austragen, Block), Boole'sche Operation Vereinigung Kegel mit Zylinder
Zylinder für Gewindeansatz		Gewinde	Fase
5.  Skizze auf Kreisfläche, (Abhängigkeit: konzentrisch zur Projektion der Kreiskante)	6.  Extrusion mit Tiefe d11 (Austragen, Tasche) der Kreisringfläche, Boole'sche Operation Differenz Zylinderansatz - Hohlzylinder	7.  Feature Gewinde mit technologischen Daten (wird nicht ausmodelliert, nur symbolisch angezeigt)	8.  Feature Fase mit 2 Abständen, hier: d12=13
Gewindefreistich		Senkbohrung	
9.  projizierte Schnittkanten Skizze auf xy-Ebene, (Bauteil in der Skizzierebene aufgeschnitten, Bemaßungen zu projizierten Schnittkanten)	10.  Umdrehung mit Winkel d19 (Drehen, Rotation, Nut), voll um die y-Achse, Boole'sche Operation Differenz	11. 	

Tabelle 2.15 Assoziative Bauteilmodellierung in der Baugruppe des Kegellagers

Kegelwelle	Skizze für Lagerbuchse	Lagerbuchse	Baugruppe
 1. Bauteil in der Baugruppe, Auswahl der xy-Ebene als Skizzierebene für neues Bauteil „Lagerbuchse“	 Innenkegel assoziativ zum Kegelzapfen, Kegelform definiert durch Koinzidenz zu Endpunkten der projizierten Kanten, Parameter nur für Außenform der Buchse notwendig	 2. Bauteil in der Baugruppe, Volumenmodell durch Drehung des Profils mit Winkel d9 um y-Achse	 Assoziative Baugruppe (Geometrie und Position)

Das Erzeugen von Varianten der Lagerbaugruppe mittels Parametervariation auf Grundlage der Assoziativität des CAD-Modells zeigt **Tabelle 2.16**.

Tabelle 2.16 Erzeugen einer Abmessungsvariante der Lagerbaugruppe

Skizze Kegel	Skizze Lagerbuchse	Baugruppenvariante
Änderung der Parameter d1 - d5 	 Innenkegel assoziativ, Kegelform ändert sich automatisch durch Koinzidenz zu Endpunkten der projizierten Kanten, Parameter d0 - d8 sind manuell variierbar	Geometrie und Position der Lagerbuchse sind assoziativ 

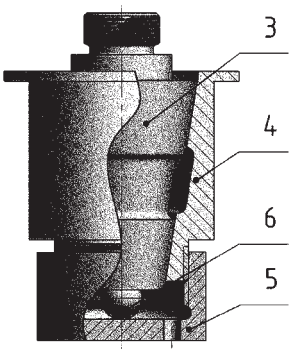
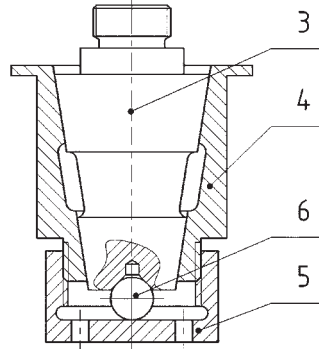
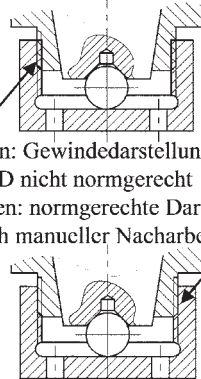
Eine Alternative zu dem hier dargestellten Ablauf wäre das fertigungsorientierte Vorgehen. Man beginnt dabei mit dem Halbzeug, aus dem ein Bauteil hergestellt werden soll. Im Falle der Kegelwelle (s. Tabelle 2.14) wäre das ein genormter Rundstahl nach DIN EN 10278 (s. Abschnitt 3.6) mit dem Durchmesser $\geq d1$ und einer Länge $\geq d2$. Die Lagerbuchse ließe sich ausgehend von einem Rohr mit entsprechenden Maßen für Innen- und Außendurchmesser sowie einer ausreichenden Länge fertigen und mit den beschriebenen Operationen modellieren.

Weitere Hilfen bieten CAD-Module für das Modellieren von Wellen (sog. Wellengeneratoren), von Blechteilen, von Gussteilen u. a. [2.12] [2.19].

Beim Entwerfen des Kegellagers (**Tabelle 2.17**) lassen sich die neu gestalteten Einzelteile sowie die aus anderen Quellen übernommenen Bauelemente, wie z.B. die Kugel 6 in eine Stückliste eintragen, die vom System automatisch erzeugt wird. Die CAD-Systeme gestatten, aus dem 3D-Modell technische Zeichnungen mit den erforderlichen Ansichten, Schnitten und Einzelheiten maßstäblich zu erzeugen.

Diese Zeichnungen sind jedoch oft nicht normgerecht [1.1] [2.41] bis [2.47]. Um eine verbindliche (justitiable) Zeichnungsdokumentation zu erhalten, ist eine Nachbereitung erforderlich, wie die Ergänzung fehlender Fertigungsangaben (fertigungs-, toleranz-, prüf- oder montagegerechte Bemaßungen, Toleranzen, Oberflächen- und Kantenbearbeitungen usw.) oder die Korrektur von Linienbreiten, Schraffuren, unsichtbaren Kanten, Ergänzen von Kommentaren u.ä. Die rechte Spalte der Tabelle 2.17 zeigt die Korrektur von Linienbreiten und der Schraffur.

Tabelle 2.17 Darstellung des kompletten Kegellagers

CAD-Baugruppenmodell	normgerechte Technische Zeichnung	Zeichnungsableitung aus CAD
		 oben: Gewindedarstellung aus CAD nicht normgerecht unten: normgerechte Darstellung nach manueller Nacharbeit

Nachdem ein dreidimensionales Geometriemodell vorliegt, ist es als virtueller Prototyp zur Überprüfung der Gestalteigenschaften des entworfenen Produktes wie Toleranzen, Festigkeit, Fertigung, Montage, Bedienung usw. mittels Rechnersimulation [2.7] [2.58] nutzbar.

Bild 2.33 zeigt am Beispiel der Montagesimulation, dass insbesondere bei der Serienproduktion bereits in einem frühen Entwurfsstadium quantifizierbare Ergebnisse zur Verbesserung der konstruktiven Lösung beitragen. Ohne das CAD-System zu verlassen, kann der Konstrukteur mit Hilfe des AssCE-Moduls (**A**ssembly **C**ost **E**stimation) die Montagefähigkeit seines Entwurfs überprüfen [2.58]. Das Programm analysiert die Konstruktion, stellt die Fügebeziehungen, die Fügerichtungen und anderes so zur Verfügung, dass die detaillierte Montageplanung darauf aufbauen kann. AssCE nutzt ein erweitertes MTM-Verfahren (**M**ethods **T**ime **M**easurements) zur Zeitbewertung für Fügevorgänge und komplette Montagehandlungen [2.40]. Außerdem werden die gestaltbildenden Features analysiert und die Ermittlung des Aufwandes in der Teilefertigung damit ermöglicht.

Die Beispiele zeigen, dass häufig benutzte Formelemente die Entwurfsarbeit als sog. Features (= Geometrie + Semantik) (s. VDI 2218) unterstützen können, indem man Formelementen einen Verwendungszweck (Gestaltelement, Funktion [2.25], Fertigung (**Bild 2.34**), Montagehilfe, Kostenfaktor [2.18] o.ä.) und damit eine Semantik zuordnet. So ist ein zylindrisches Loch z.B. als Bohrung, als Lagerstelle, als Einfügestelle für einen Passstift oder als Öffnung für ein Lichtbündel beim Entwerfen modellierbar. Features unterstützen nicht nur das Entwerfen (Design by Feature) sondern auch das Generieren von Arbeitsplänen, Montagefolgen, Prüfplänen, Kostenübersichten

usw. mittels formaler Identifikation (Feature Recognition) und Transformation bzw. Zusammenstellung (Feature Mapping) [2.8] [2.21].

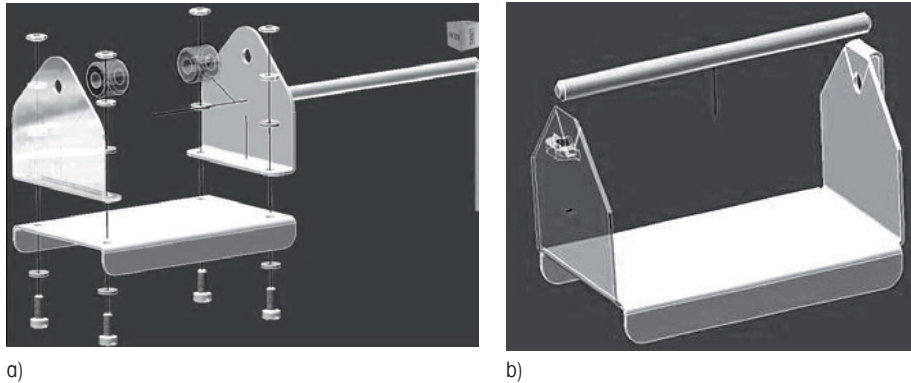


Bild 2.33 Montagesimulation einer Spindellagerung [2.58]

a) Erster Entwurf mit Darstellung der Fügerichtungen

Kritikpunkte:

- zu hohe Teileanzahl, 40 Teilepaarungen,
- hohe Anzahl von Fügerichtungen, z. T. entgegengesetzt,
- Schrauben M 3 ungünstig für Handling,
- Montagezeit: 3 min, 31,2 s.

b) Verbesserter Entwurf mit zwei Varianten zur axialen Spindelsicherung (links gestanzt, rechts gebogen)

- nur zwei Teile
- eine Fügerichtung
- Montageunterstützung durch Fasen an der Spindel und Prägungen in den elastischen Lagerwangen
- Montagezeit: 31,7 s.

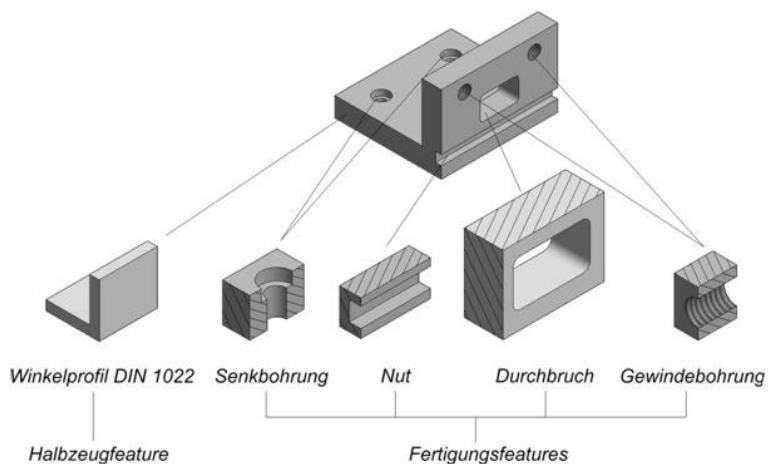


Bild 2.34 Feature-basierte Modellierung eines Bauteils

Voraussetzung für die effektive Nutzung dieser Werkzeuge ist eine räumliche Vorstellung von dem zu entwerfenden Objekt auf der Grundlage von Formelementen, wie sie im Bild 2.12 dargestellt sind, was man zweckmäßig durch entsprechende Handskizzen vorbereitet. Auch beim Bildschirmdialog ist das Vorgehen von „innen“ nach „außen“ (beginnend mit den funktionswichtigen Formelementen) angezeigt. Die Folge der Arbeitsschritte in den Tabellen 2.14 bis 2.17 verdeutlicht dieses Vorgehen.

2.2.3 Rechnerunterstützte Dimensionierung

Das Dimensionieren fordert zunehmend Berechnungen größeren Umfangs. Die durch Erfahrung, mitunter auch aus Zeitgründen oft überschlägliche Bestimmung von Abmessungen, Funktions- und Werkstoffparametern muss in vielen Fällen wegen der erhöhten Anforderungen durch exakte Rechnungen ergänzt werden. Für alle mechanischen Bauelemente ist spezielle Software verfügbar [2.19] [2.60] [2.62] [2.63] [2.70]. Standardberechnungen sind auch effektiv mit Berechnungsmodulen unmittelbar in CAD-Systemen möglich. Software für Berechnungen und Simulation fasst man oft unter CAE (Computer Aided Engineering) zusammen. Dazu gehören z. B. Spannungs- und Dynamikberechnungen an Komponenten und Baugruppen mittels Finite-Elemente-Analysen (FEA), Kinematik- und Dynamikanalysen von Mechanismen (Mehrkörperdynamik), Programme zur Optimierung u. a. [2.19].

Ihre Anwendung erfordert folgende Aktivitäten:

- Aufbereiten des Entwurfs nach dem im Programm benutzten Berechnungsmodell,
- Bestimmen der Eingabeparameter, Wertebereiche, Restriktionen,
- Ausführen der Berechnung mit Bereitstellung von Parametern aus Datenbanken,
- Auswerten und Überprüfen der Ergebnisse.

Für die Aufbereitung des Berechnungsansatzes, der Eingabedaten und die Überprüfung der Computerausgaben durch Überschlagsrechnung, die in jedem Falle erfolgen sollte, stellen die Abschnitte 3 bis 14 dieses Buches die notwendigen Grundlagen für mechanische Elemente bereit. Hinsichtlich des methodischen Vorgehens und der rechentechnischen Realisierung sind verschiedene Berechnungsarten zu unterscheiden [1.2] [2.8] [2.34] (Tabelle 2.18).

Tabelle 2.18 Berechnungsverfahren, grundsätzlicher Programmablauf und Anwendung

P_{vorh} , P_{zul} vorhandene, zulässige Parameter; j ja, n nein

Nachrechnung	Auslegung	Optimierung	Simulation
Nachrechnen von Abmessungen, Kräften, Spannungen, Deformationen, Verlagerungen, Schwingungen, Bahnkurven, Lebensdauer	Berechnen von Abmessungen, Werkstoffkennwerten sowie der Anzahl von Formelementen (z. B. Zähnezahlen) und Bauelementen (z. B. Wälzkörperanzahl)	Optimieren bezüglich – Menge (Material-, Energiebedarf, Masse) – Qualität (Funktionserfüllung, Toleranzen, Lebensdauer) – Kosten (bei Herstellung, Nutzung)	Überprüfen des Verhaltens unter verschiedenen Einflüssen: – Dynamik (Schwingungen, Stöße, Prellen, Start-Stop-Betrieb) – Temperatur – Kollision (zwischen bewegten Elementen und bei der Montage)

Nachrechnung überprüft ein entworfenes und vorläufig dimensioniertes Bauelement hinsichtlich der Erfüllung bestimmter Forderungen, indem die in der Lösung vorhandenen Parameter P_{vorh} ermittelt und mit den zulässigen P_{zul} verglichen werden. An einem Bauelement sind oft mehrere solcher Nachweise erforderlich (z.B. Funktions- und Festigkeitsnachweis bei Federn), die nicht selten sich widersprechende konstruktive Maßnahmen verlangen. Ein Kompromiss folgt dann erst nach mehreren wiederholten Rechnungen.

Auslegung. Programme zur Auslegung ermitteln funktionswichtige Strukturparameter (Abmessungen, Werkstoffparameter) eines entworfenen Bauelements aus vorgegebenen Funktionsgrößen. Auslegungsrechnungen kommen als einfache Entwurfsrechnungen (z.B. überschlägliches Bestimmen eines Wellendurchmessers) oder als Maßsynthese (bei Mechanismen usw.) zur Anwendung. Ein gewünschtes Auslegungsergebnis lässt sich auch iterativ durch Nachrechnung erreichen.

Programme zur durchgängigen Dimensionierung von Konstruktionselementen enthalten sowohl Auslegungs- als auch Nachrechnungsoperationen. Die Suche nach den günstigsten Parametern einer Lösung kann mit Optimierungsrechnungen erfolgen.

Optimierung. Die zu dimensionierenden Parameter einer Konstruktionslösung werden so bestimmt, dass sie eine geforderte Zielfunktion unter Berücksichtigung eingrenzender Bedingungen erfüllen [2.7] [2.8] [2.21] [2.61].

Mathematisch fasst man die n gesuchten Parameter einer Konstruktion als Variable zu einem Vektor zusammen:

$$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (2.2)$$

Die Wahl der Werte für $\mathbf{X}$ unterliegt konstruktiv bedingten Einschränkungen (Restriktionen), die als

$$\text{Ungleichungen} \quad g_i(\mathbf{X}) \geq 0 \text{ oder} \quad (2.3)$$

$$\text{Gleichungen} \quad h_j(\mathbf{X}) = 0 \quad (2.4)$$

zu formulieren sind (z.B. max. Einbaudurchmesser $d = 50$ mm für ein Lager: $g(\mathbf{X}) = 50 - d \geq 0$). Die Gesamtheit der Restriktionen definiert das Gebiet der zulässigen Lösungen, in welchem das Optimum durch Bewerten der Varianten mit einer Zielfunktion $F(\mathbf{X})$ gesucht wird:

$$F(\mathbf{X}_{\text{opt}}) = \text{Extremum}. \quad (2.5)$$

Das Optimum wird als Minimum (z.B. Masse, Volumen, Kosten) oder Maximum (Lebensdauer, Wirkungsgrad usw.) der Zielfunktion gefunden. Für die Suche stehen zahlreiche Verfahren [2.1] zur Verfügung. Sollen gleichzeitig mehrere Kriterien zur Optimierung herangezogen werden, so liegt ein Problem der *Polyoptimierung* vor [2.1] [2.19].

Die vorhandenen Optimierungsprogramme setzen die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems voraus. Die Rechenvorschrift für die Zielfunktion $F(\mathbf{X})$ ist dabei einmalig für den Entwicklungsgegenstand (Einzelteil, Baugruppe, Gerät) zu erarbeiten. Ein Beispiel zeigt **Tabelle 2.19**.

Simulation bildet das Verhalten eines entworfenen Objektes mit Hilfe eines rechnerinternen Modells nach. Es werden Reaktionen der entworfenen Struktur auf verschiedene Einflussgrößen

(Funktionsgrößen, Störgrößen, extreme Betriebsbedingungen) berechnet. Durch Verändern der Modellparameter gelangt man zu einer günstigen Dimensionierung (**Bild 2.35**).

In Simulationsprogrammen können Nachrechnung und Optimierung integriert sein [2.19] [2.54] [2.57]. Bei der Entwicklung von Baugruppen und von komplexeren Gebilden lassen sich durch rechnerunterstützte Simulation langwierige Experimente einsparen oder abkürzen. Im Dialog sind entsprechende Korrekturen am Entwurf möglich.

Rechenprogramme helfen, eine größere Anzahl von Varianten effektiv durchzurechnen und die in der Feinmechanik häufige Überdimensionierung zu reduzieren (**Bild 2.36**). Alle Programme benutzen Berechnungsmodelle (**Bild 2.37**), die auf den Grundlagen der Statik, Dynamik, Festigkeitslehre, Werkstoffkunde und weiterer Disziplinen die realen Zusammenhänge vereinfacht erfassen (s. Abschnitt 3) (**Tabelle 2.20**).

Tabelle 2.19 Optimierung einer Druckfeder [6.1] – Erläuterungen s. Abschnitt 6.6

Eingabe:					
Federkraft $F = 300 \text{ N}$	Werkstoff $G = 80 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$				
max. Federkraft $F_{\text{max}} = 500 \text{ N}$	$\tau_{\text{tertr}} = 600 \text{ N/mm}^2$				
Federweg $s = 7,5 \text{ mm}$	Toleranz von c : $T_c = \pm 5\%$				
Spannungsverhältnis $\eta_s : 0,75 \leq \eta_s \leq 1$; $\eta_s = \frac{\tau_{\text{tvorh}}}{\tau_{\text{tertr}}}$					
Wickelverhältnis $w = D/d : 4 \leq w \leq 16$ (D mittlerer Windungsdurchmesser in mm, d Drahtdurchmesser in mm)					
Anzahl der federnden Windungen n : $n = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; \dots$					
Ergebnisse:	Federvarianten				
	1	2	3	4	5
Zielfunktionen					
Federvolumen V_F in mm^3	3360	2842	3022	2921	2881
Einbauvolumen V_E in mm^3	10419	9834	14268	21812	21296
Spannungsverhältnis η_s	0,91	0,97	0,96	0,98	0,97
Variable					
Drahtdurchmesser d in mm	3,2	3,2	3,6	3,6	4,0
Anzahl der federnden Windungen n	9,5	7,5	4,5	2,5	2,5
Wickelverhältnis w	4,38	4,69	5,83	7,40	7,30
Äußerer Windungsdurchmesser D_a in mm	17,2	18,2	24,6	33,2	33,2
Ermittelte Federparameter					
Federsteife c in N/mm	40,73	41,91	40,81	40,40	41,64
Länge der ungespannten Feder L_0 in mm	52,34	45,30	37,52	32,10	32,10
Suchfeld für die Federoptimierung					

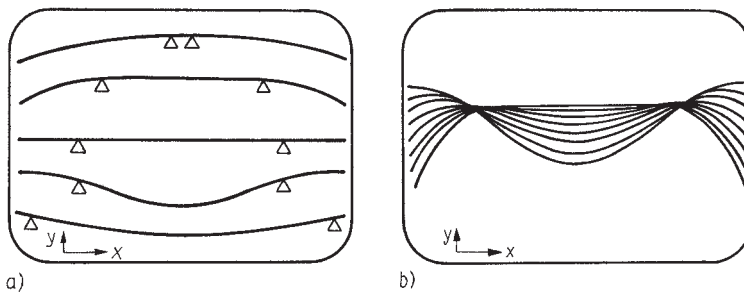


Bild 2.35 Simulation der Durchbiegung einer Welle am Bildschirm

Belastung durch Eigenmasse bei verändertem Lagerabstand (Auslenkung in y -Richtung stark vergrößert)

a) ausgewählte Stellungen;

b) Bereich in der Umgebung der Besselschen Punkte [1.2]

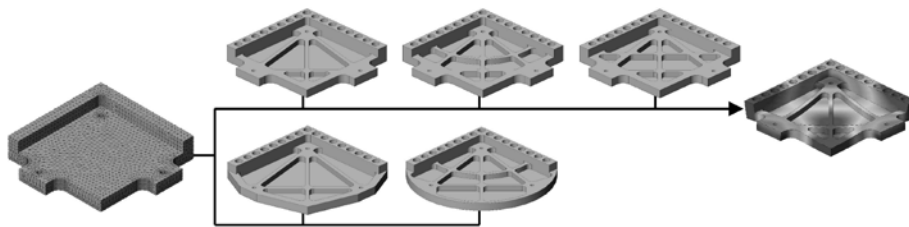


Bild 2.36 Finite-Elemente-Berechnung zur Überprüfung der Gestaltvarianten eines Präzisionsmessspiegels hinsichtlich Massereduzierung und Deformation [2.36]

links: Anfangsvariante mit FEM-Netz (25 000 Elemente); rechts: Endlösung: Masse reduziert auf 45 %, Deformation reduziert auf 79 %

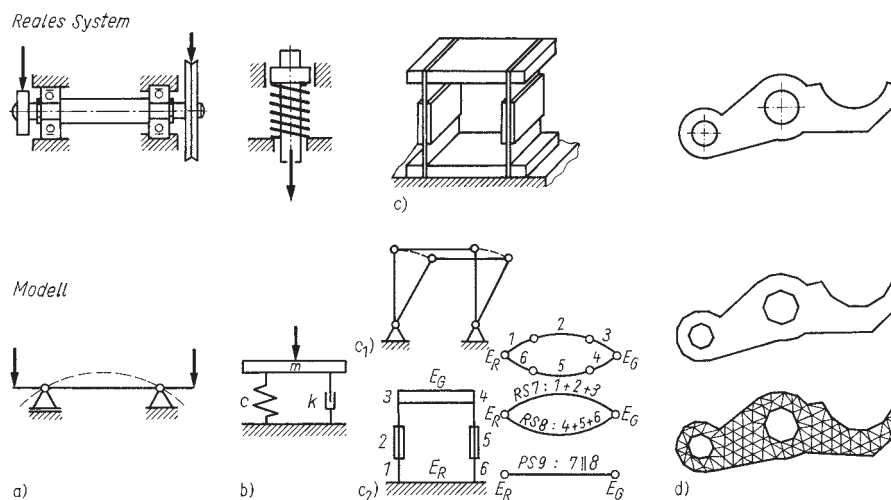


Bild 2.37 Modelle als Berechnungsgrundlage

a) wälzgelagerte Welle mit Balkenmodell; b) gefederter Stößel mit Feder-Masse-System; c) versteifte Federführung mit kinematischem Modell (c_1) und Ersatzschaltung als Graph (c_2), RS Reihenschaltung, PS Parallelschaltung, E_G Gangsystem, E_R Rastsystem [2.32]; d) Einzelteil, Kontur als Polygonzug, Finite-Elemente-Netz [2.30] [2.33]

Der Rechneinsatz bewährt sich vor allem bei wiederholt auftretenden Aufgaben. Durch höheren Informationsumsatz gegenüber manueller Tätigkeit führen CAD-Systeme zu Qualitäts- und Pro-

duktivitätsgewinn. Die in diesem Buch behandelten Konstruktionselemente sind günstige Objekte für das rechnerunterstützte Konstruieren.

Abschnitt 2.2 gibt dazu beispielhaft die grundsätzlichen Wege an.

Tabelle 2.20 Hinweise zur Anwendung von Berechnungsprogrammen

Gesichtspunkte/Hinweise
Genauigkeit der Rechenergebnisse – begrenzt durch Rechenmodell (Fehler bis zu 20% durch Abstraktion eines Bauelements als geometrisch exakter, als starrer oder rein elastischer Körper, Verwenden von Ersatzelementen, wie Punktmasse, Ersatzfederelement, Dämpfungselement u. ä.) – Zulässigkeit des verwendeten Modells stets prüfen! – Stellenanzahl der Rechengrößen (Rundungsfehler in der Regel kleiner als Fehler durch Modell)
Anwendungsbereich der Programme – festgelegt durch Gültigkeitsbereich des verwendeten Modells – anzustreben sind objektunabhängige Modelle, wie bei der Finite-Elemente-Methode (FEM) [2.3]
Problemaufbereitung – Abstrahieren des realen Systems bis zum Rechenmodell – Aufbereitung der Eingabedaten erforderlich (Plausibilitätsprüfung) – Unterstützung durch Anwenderführung mittels Dialogs – spezielle Präprozessoren (z. B. automatisches Aufstellen von Differentialgleichungen, Generieren von FEM-Netzen)
Ergebnisabgabe und -prüfung – übersichtliche Drucklisten mit eingegebenen, berechneten und vom Programm automatisch gewählten Größen – Diagrammausgabe, Geometrie mit Zustandsbeschreibung – Vergleich mit Überschlagsrechnung (Dimension, Größenordnung)
Speicherdaten – sollen in einer programmunabhängigen Datenbasis die für den Anwendungsbereich wiederholt benötigten Fakten enthalten (z. B. ISO-Toleranzen, Werkstoffparameter, Beiwerte, Formfaktoren, Vorzugszahlen u. a.) – müssen stets dem neuesten Änderungsstand entsprechen und daher gewartet werden – um Sonderfälle berechnen zu können, ist Möglichkeit der manuellen Eingabe vorzusehen

Eine Zusammenstellung ausgewählter Normen und Richtlinien zum Abschnitt 2 enthält **Tabelle 2.21**.

Tabelle 2.21 Normen und Richtlinien zum Abschnitt 2

DIN-Normen	
DIN 40150	Begriffe zur Ordnung von Funktions- und Baueinheiten
Richtlinien	
VDI 2206	Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme
VDI 2209	3-D-Produktmodellierung
VDI 2218	Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Feature-Technologie
VDI 2219	Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung – Einführung und Betrieb von PDM-Systemen
VDI 2220	Produktplanung; Ablauf, Begriffe und Organisation
VDI 2221	Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
VDI 2222 Bl.1	Konstruktionsmethodik; Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien
VDI 2222 Bl. 2	Konstruktionsmethodik; Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen
VDI 2223	Methodisches Entwerfen technischer Produkte
VDI 2225 Bl. 1	Konstruktionsmethodik; Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; Vereinfachte Kostenermittlung
VDI 2225 Bl. 2	Konstruktionsmethodik; Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; Tabellenwerk
VDI 2249	Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung, CAD-Benutzungsfunktionen
VDI 3405 Bl. 1	Additive Fertigungsverfahren; Rapid Manufacturing

Empfehlungen zur weiteren Lektüre

Die umfassenden Tabellen der nächsten Abschnitte unterstützen Auswahl, Berechnung und Entwurf der Elemente und ermöglichen dem Leser, ohne aufwendige Problemanalyse für eine konkrete Aufgabe sehr schnell ein Programm in einer nutzerfreundlichen Programmiersprache zu schreiben und an Hand der beigefügten Beispiele zu überprüfen.

Diese Form der tabellarischen Aufbereitung besitzt gegenüber Programmablaufplänen oder gar Programmlistings den Vorteil größerer Flexibilität bei der Wahl der Arbeitsschrittfolge. Außerdem bleiben vorhandene Hardware und Grund-Software nutzbar, und der Nutzer kann die inhaltlichen Zusammenhänge der Konstruktion gut übersehen.

Literatur zum Abschnitt 2

(Grundlagenliteratur s. Literatur zum Abschnitt 1)

Bücher, Dissertationen

- [2.1] *Schäppi, B.*; u. a.: Handbuch Produktentwicklung. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2005.
- [2.2] *Krause, F.-L.; Franke, H.-J.; Gausemeier, J.*: Innovationspotentiale der Produktentwicklung. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2007.
- [2.3] *Klein, B.*: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer-Verlag 2015.
- [2.4] *Müller, J.*: Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften – Systematik, Heuristik, Kreativität. Berlin [u. a.]: Springer-Verlag 1990.
- [2.5] *Roth, K.*: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Bd. 2; 3. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer-Verlag 2001.
- [2.6] *Kurz, U.; Hintzen, H.; Laufenberg, H.*: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen – ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner-Verlag 2009.
- [2.7] *Vajna, S.; Weber, Ch.; Bley, H.; Zeman, K.*: CAX für Konstrukteure – eine praxisbezogene Einführung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2009.
- [2.8] *Spur, G.; Krause, F.-L.*: Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1997.
- [2.9] *Hansen, F.*: Konstruktionssystematik. 3. Aufl. Berlin: Verlag Technik 1986.
- [2.10] *Koller, R.*: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. 4. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer-Verlag 2014.
- [2.11] *Klein, B.*: TRIZ/TIPS – Methodik des erfinderischen Problemlösens. 3. Aufl. Berlin [u. a.]: De Gruyter Oldenbourg 2014.
- [2.12] *Löhr, A.*: AutoCAD Mechanical 2015 – CAD-Grundlagen im 2D-Konstruktionsbereich praxisorientiert anwenden. 5. Aufl. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co. 2015.
- [2.13] *Altschuller, G. S.*: Erfinden – Wege zur Lösung technischer Probleme. Berlin: Verlag Technik 1998.
- [2.14] *Leyer, A.*: Allgemeine Gestaltungslehre – Maschinenkonstruktionslehre. Heft 1 bis 6. Basel [u. a.]: Birkhäuser Verlag 1964.
- [2.15] *Gibson I.*: Additive Manufacturing Technologies – 3D-Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. New York: Springer-Verlag 2015.
- [2.16] *Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.*: Montage in der industriellen Produktion – ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013.
- [2.17] *Kesselring, F.*: Bewertung von Konstruktionen – Ein Mittel zur Steuerung der Konstruktionsarbeit. Düsseldorf: Deutscher Ingenieur-Verlag 1951.
- [2.18] *Leibl, P.*: Entwicklung eines featureorientierten Hilfsmittels für die Konstruktion kostengünstiger Produkte – eine exemplarische Untersuchung an Blechteilen. Diss. TU Ilmenau 1998.
- [2.19] *Anderl, R.; Binde, P.*: Simulationen mit NX – Kinematik, FEM, CFD, EM und Datenmanagement. 4. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2017.
- [2.20] *Koller, R.; Kastrup, N.*: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin, Heidelberg [u. a.]: Springer-Verlag 1998.
- [2.21] *Schumacher, A.*: Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013.

- [2.22] *Höhne, G.*: Die digitale Mechanismen- und Getriebelbibliothek – DMG-Lib – Sicherung, Aufbereitung und Bereitstellung ingenieurtechnischen Wissens. Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Stuttgart/Leipzig: S. Hirzel Verlag 2012.
- [2.23] *Kletzin, U.*: Finite-Elemente basiertes Entwurfssystem für Federn und Federanordnungen. Diss. TU Ilmenau 2000. Ilmenau: Verlag ISLE 2000.
- [2.24] *Hoernow, G.; Meißner, T.*: Konstruktionspraxis im Maschinenbau – Vom Einzelteil zum Maschinendesign. Leipzig: Fachbuchverlag (im Carl Hanser Verlag München, Wien) 2014.
- [2.25] *Brix, T.*: Feature- und constraint-basierter Entwurf technischer Prinzipie. Diss. TU Ilmenau, Schriftenreihe des Instituts für Maschinenelemente und Konstruktion, Ilmenau: ISLE Verlag 2001.
- [2.26] *Schilling, M.*: Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik. Diss. B TH Ilmenau 1982.
- [2.27] *Sperlich, H.*: Das Gestalten im Konstruktionsprozess. Diss. B TH Ilmenau 1983.
- [2.28] *Höhne, G.*: Struktursynthese und Variationstechnik beim Konstruieren. Diss. B TH Ilmenau 1983.
- [2.29] *Herrlich, M.*: 3D-Modellierung mit interaktiven Oberflächen. Diss. Universität Bremen 2013.
- [2.30] *Gebhardt, Ch.*: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. 2. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2014.
- [2.31] *Schilling, T.*: Augmented Reality in der Produktentstehung. Diss. TU Ilmenau, Schriftenreihe des Instituts für Maschinenelemente und Konstruktion, Ilmenau: ISLE Verlag 2008.
- [2.32] *Nönnig, R.*: Untersuchungen an Federführungen unter besonderer Berücksichtigung des räumlichen Verhaltens. Diss. TH Ilmenau 1980.
- [2.33] *Rieg, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.*: Finite-Elemente-Analyse für Ingenieure – Grundlagen und praktische Anwendungen auf Z88Aurora. 5. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2014.
- [2.34] *Wittel, H.; Roloff/Matek*: Maschinenelemente Formelsammlung. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.
- [2.35] *Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.*: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6., überarb. und erw. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2017.
- [2.36] *Lotz, M.*: Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und Positioniermaschinen. Diss. TU Ilmenau, Schriftenreihe des Instituts für Maschinenelemente und Konstruktion, Ilmenau: ISLE Verlag 2009.
- [2.37] *Husung, S.*: Simulation akustischer Produkteigenschaften unter Nutzung der Virtual Reality während der Produktentwicklung. Diss. TU Ilmenau 2011, Berichte aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion, Ilmenau: Univ.-Verlag 2012.
- [2.38] *Dietz, P.; Gummersbach, F.*: Lärmarm konstruieren – XVIII: Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Wissenschaft 2000.
- [2.39] *Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.*: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014.
- [2.40] *Konold, P.; Reger, H.*: Praxis der Montagetechnik – Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2009.
- [2.41] *Kurz, U.; Wittel, H.*: Technisches Zeichnen – Grundlagen, Normung, Darstellende Geometrie und Übungen. 26. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014.
- [2.42] *Grollius, H.-W.*: Technisches Zeichnen für Maschinenbauer. Grundlagen, Praxistipps, Rechnergestützte Arbeit, Übungsaufgaben. 2. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag 2013.
- [2.43] *Viebahn, U.*: Technisches Freihandzeichnen. Lehr- und Übungsbuch. 8. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer Vieweg 2013.
- [2.44] *Praxisband Technisches Zeichnen: DIN – Normen und Technische Regeln* (Hrsg.: DIN, Deutsches Institut für Normung). Berlin: Beuth-Verlag 2003.
- [2.45] *Harnisch, H.-G.*: AutoCAD-Zeichenkurs. Lehr- und Übungsbuch. 3. Aufl. Wiesbaden: Verlag Friedrich Vieweg & Sohn 2008.
- [2.46] *Köhler, P.; Bechthold, J.*: Pro-ENGINEER-Praktikum – Arbeitstechniken der parametrischen 3D-Konstruktion mit Wildfire 3.0. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2010.
- [2.47] *Labisch, S.; Weber, C.*: Technisches Zeichnen – Selbstständig lernen und effektiv üben. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017.

Aufsätze

- [2.48] *Höhne, G.*: Wissensbedarf in der Mikro- und Feinwerktechnik. Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren (Hrsg. *G. Pahl*) Köln: Verlag TÜF Rheinland 1994.
- [2.49] *Bischoff, W.*: Das Grundprinzip als Schlüssel zur Systematisierung. Feingerätetechnik 9 (1960) 3, S. 91.
- [2.50] *Sperlich, H.*: Zur Definition der Gestalt in der Konstruktion. Konstruktion 45 (1993) 2, S. 61.
- [2.51] *Rogal, R.; Neumann, W.*: Trennzentrifuge mit Luftlagerung. Schmierungstechnik 19 (1979) 12, S. 363.
- [2.52] *Gebhardt, C.*: Parametrische Multiphysik-Simulation. Konstruktion 66 (2014) 7/8, S. 63.
- [2.53] *Schilling, C.; Witte, H.*: Bionische Anregungen zur Gestaltung von Gelenkungen. Konstruktion 66 (2014) 9, S. 69.
- [2.54] *Reichert, F.; Zentner, L.*: Modellierung und Simulation eines Federspeicherantriebssystems. Konstruktion 64 (2012) 3, S. 67.
- [2.55] *Jispeert, A.*: Magie mit Scheiben. Konstruktion 66 (2014) 11/12, S. 34.
- [2.56] *Krause, W.*: Entwicklung lärmarmen feinwerktechnischer Produkte. Jahrbuch Optik und Feinmechanik 2011, S. 203.
- [2.57] *Wartzack, S.; Stangl, T.*: Integrierte Gestaltoptimierung für die Produktentwicklung. Konstruktion 65 (2013) 11/12, S. 76.
- [2.58] *Holle, W.; Husung, S.*: MTM im CAD-System – Produktbewertung nach Zeit und Kosten. In: Betriebspraxis & Arbeitsforschung. Heidelberg: Haefner-Verlag, Bd. 221 (2014) S. 36.
- [2.59] *Straube, D.; Tritsch, U.; Franke, H.-J.; Büttgenbach, S.*: Modular software system for computer aided design of microsystems. Microsystem Technologies Vol. 12 (2006) S. 650.
- [2.60] *Wehmann, C.; Rieg, F.*: Berechnung von Tellerfedern – von der analytischen Betrachtung zur Finite Elemente Analyse. Konstruktion 64 (2012) 1/2, S. 67.
- [2.61] *Klein, B.*: DACE-gestützte Optimierung von Blechleichtbaustrukturen. Konstruktion 62 (2010) 9, S. 61.
- [2.62] *Kesselmans, C.; Köhler, P.*: Komponentenübergreifende Abhängigkeiten in Gestaltungs- und Berechnungsprozessen. Konstruktion 65 (2013) 10, S. 87.
- [2.63] *Gebhardt, Ch.*: Produktentwicklung mit (FE-) Methode:
 Teil 1 – Festigkeitsberechnungen. Konstruktion 62 (2010) 1/2, S. 36.
 Teil 2 – FEM-Simulationen bei Verbindungselementen. Konstruktion 62 (2010) 4, S. 32.
 Teil 3 – Schwingungsberechnungen. Konstruktion 62 (2010) 6, S. 34.
 Teil 4 – Materialverhalten. Konstruktion 62 (2010) 11/12, S. 17.
- [2.64] *Lustig, R.; Meerkamm, H.*: Verbesserte Toleranzanalyse durch genauere Charakterisierung der funktionalen Kontaktflächen. Konstruktion 59 (2007) 9, S. 99.
- [2.65] *Welp, E.; Breidert, J.; Weinert, K.; Buschka, M.; Petzoldt, V.*: Fertigungsgerechte, wissensbasierte Konstruktion in der Formgedächtnistechnik. Konstruktion 54 (2002) 10, S. 59.
- [2.66] *Höhne, G.; Husung, S.; Lotter, E.; Weber, C.*: Virtuelle Produktentwicklung unter Nutzung eines audiovisuellen VR-Systems. Konstruktion 61 (2009) 10, S. 52.
- [2.67] *Schenk, M.*: Mit VR- und AR-Technologien Produkte und Produktion neu gestalten. 2. Tagung zur Medienproduktion „Produktion und Virtualität – Branchen lernen voneinander“. Ilmenau: Vortrag 28.03.2008.
- [2.68] *Stelzer, R.; Steindecker, E.; Saske, B.*: AR-Systeme für die Wartungsplanung in immersiven Umgebungen. In: 11. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2013.
- [2.69] <http://www.dmg-lib.org/dmglib/main/portal>.
- [2.70] MDESIGN mechanical – die Berechnungs-Bibliothek für den Maschinenbau.
http://www.tedata.com/beschreibung_mdmechanical.html

Grundlagen zur Dimensionierung von Konstruktionselementen

Um einen gesicherten Austauschbau und vor allem eine wirtschaftliche Herstellung der Erzeugnisse zu ermöglichen, muss die Vielzahl möglicher Ausführungen und geometrischer Abmessungen von Bauelementen, Werkstoffen und deren Anlieferungsformen, technischen Parametern usw. eingeengt werden. Dazu gibt es Normen, bei denen nach dem Geltungsbereich zwischen internationalen, nationalen, Fachbereich- und Werknormen unterschieden werden kann. Beispiele sind die internationalen ISO-Normen, die Normen der Deutschen Bundesrepublik (DIN) und die europäischen Normen (EN). Sie sind als Einzelblätter und nach bestimmten Sachgebieten zusammengestellt, zusätzlich in Form von Taschenbüchern (z.B. für technische Zeichnungen, Stahl usw.) verfügbar. In Verzeichnissen, die jeweils auf dem letzten Stand gehalten werden, sind außerdem alle gültigen Normen aufgeführt (z.B. der DIN-Katalog für technische Regeln, Bde. 1 und 2). Zu den wichtigsten genormten Arbeitsunterlagen in der Phase der konstruktiven Entwicklung von Erzeugnissen gehören Normzahlen und Normmaße, Toleranzen und Passungen sowie die verfügbaren Werkstoffe. Auf ihre Anwendung wird im folgenden eingegangen, die Arbeit mit genormten Konstruktionselementen wird in den weiteren Hauptabschnitten beschrieben.

Zur Sicherung der Funktionen eines Geräts oder einer Maschine ist außerdem die mechanische Stabilität des Geräteaufbaus und seiner Einzelteile wesentliche Vorbedingung. Sie kann an Hand der Regeln der Statik, Dynamik und Festigkeitslehre durch exakte Vorausberechnung garantiert werden. Diese Wissensgebiete gehören deshalb mit zu den Grundlagen bei der konstruktiven Entwicklung von Erzeugnissen. Festigkeitsberechnungen sollen an Hand der vorliegenden Belastungen die erforderliche Dimensionierung der Bauteile erleichtern, für ein bereits vorgegebenes Bauteil die maximale Belastbarkeit bestimmen oder die Beanspruchung und die als Folge auftretende Verformung unter konkreten Bedingungen ermitteln. Voraussetzung für Festigkeitsuntersuchungen ist neben der Kenntnis der Werkstoffeigenschaften eine genaue Analyse der an den einzelnen Bauteilen wirkenden Kräfte. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den Kräften an einem ruhenden (Beschleunigung $a = 0$, Geschwindigkeit $v = 0$) oder gleichmäßig bewegten Körper ($a = 0$, $v = \text{konst.}$), die man im Teilgebiet Statik behandelt, und Kräften an einem beschleunigt bewegten Körper, die nach dem dynamischen Grundgesetz $F = ma$ berechnet werden und Inhalt des Teilgebietes Dynamik sind.

Aus dem „Internationalen Einheitensystem (SI)“ kommen folgende Einheiten zur Anwendung:

Größe	Einheit
Länge	m oder mm
Kraft	N (Newton)
Druck, Spannung, Flächenlast	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ oder $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Streckenlast	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ oder $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$

Bisher wurden Kräfte in kp (Kilopond) angegeben. Für diese Einheit gilt die Umrechnung

$$1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N.}$$

Für allgemeine technische Belange genügt die Näherung

$$1 \text{ kp} \approx 10 \text{ N bzw. } 1 \text{ N} \approx 0,1 \text{ kp.}$$

Einige der seit Jahrzehnten üblichen Zeichen für Festigkeitswerte wurden international geändert.

So gelten z. B. jetzt für

Zugfestigkeit	R_m	(bisher σ_B)
Streckgrenze	R_e	(bisher σ_s)
0,2-%-Dehngrenze	$R_{p0,2}$	(bisher $\sigma_{0,2}$)
Bruchdehnung	A_5	(bisher δ_5).

Andere Zeichen wurden international beibehalten, z. B. für

Biegewechselfestigkeit	σ_{bW}	
Biegefließgrenze	σ_{bF}	
Ausschlagfestigkeit	σ_A	usw.

3.1 Normzahlen und Normmaße

Bei der Festlegung technischer, physikalischer und ökonomischer Größen (z. B. geometrische Abmessungen, elektrische Spannungen, Leistungen, Drücke, Übersetzungen, Messbereiche) sind zwecks Vermeidung von willkürlichen Abstufungen bei der Typung von Bauelementen, Baugruppen und Geräten Einschränkungen erforderlich. Diese werden über Normzahlen und Normmaße geregelt, die eine logarithmisch aufgebaute Zahlenauswahl darstellen.

3.1.1 Normzahlen [1.1] [3.1] bis [3.5]

Diese Zahlen sind gerundete Glieder geometrischer Reihen. Sie entstehen, indem man die Zwischenbereiche der Zehnerpotenzen 1, 10, 100 usw. so aufteilt, dass das Verhältnis je zwei aufeinanderfolgender Zahlen konstant ist. Dieses Verhältnis (*Stufensprung* q) ist zusammen mit den daraus entwickelten Zahlenreihen in DIN 323 festgelegt. Für den Stufensprung q einer solchen Reihe $a, aq, aq^2, \dots, aq^{n-1}$ gilt $q_r = \sqrt[r]{10}$ mit der Stufenzahl $r = 5, 10, 20$ und 40.

Entsprechend diesen Gesetzmäßigkeiten lassen sich unterschiedliche Reihen, die Grundreihen, Rundwertreihen und abgeleiteten Reihen bilden. Sie werden nach dem Erfinder *Renard* mit R gekennzeichnet; n ist die Anzahl der Glieder.

Grundreihen. Mit den Stufensprüngen q_5, q_{10}, q_{20} und q_{40} sind vier Grundreihen R_r festgelegt:

$$\text{Reihe } R \ 5: \quad q_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1,6; \quad \text{Reihe } R \ 20: \quad q_{20} = \sqrt[20]{10} \approx 1,12;$$

$$\text{Reihe } R \ 10: \quad q_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1,25; \quad \text{Reihe } R \ 40: \quad q_{40} = \sqrt[40]{10} \approx 1,06.$$

Die für den normalen Gebrauch vorgesehenen Hauptwerte dieser Reihen (**Tabelle 3.1**) sind geringfügig gerundet.

Die Abweichungen der Hauptwerte von den Genauwerten liegen bis auf wenige Ausnahmen unter einem Prozent. Generell gilt, dass gröbere Reihen den Vorrang vor feineren haben, also R 5 vor R 10, R 10 vor R 20 und R 20 vor R 40. Nur in Sonderfällen können die *Zusatzreihen* (*Ausnahmereihen*) R 80 und R 160 verwendet werden, die mit $q_{80} = \sqrt[80]{10} \approx 1,029$ und $q_{160} = \sqrt[160]{10} \approx 1,015$ allerdings eine sehr kleine Stufung ergeben.

Außerdem lassen sich *begrenzte Reihen* bilden, die in einer oder beiden Richtungen begrenzt sind, z. B. Reihe R 80 (75 ... 300) mit allen Gliedern von 75 bis 300 der Reihe R 80. Gleichmaßen sind auch zusammengesetzte Reihen möglich durch Kombinieren von zwei oder mehreren Teilreihen, deren Anfangs- und Endglieder identisch sein müssen, z. B. R 20 (1 ... 2) – R 10 (2 ... 10) – R 5 (10 ... 100).

Rundwertreihen. Bereitet die Anwendung der Hauptwerte in der Praxis Schwierigkeiten oder sind handelsübliche Größen zu berücksichtigen, können die Normzahlen stark gerundet werden (z. B. bei R 10 statt 6,3 Wert 6). Aus derartigen Rundwerten ergeben sich die in DIN 323 festgelegten Rundwertreihen R' und R'' (Tabelle 3.1), wobei die Reihe R'' die größte Rundung aufweist, aber möglichst zu vermeiden ist.

Generell sollten die Reihen R' und R'' nur auf zwingende Fälle beschränkt bleiben, da die Abweichungen von den Genauwerten z. T. so groß sind, dass die sinnvolle Stufung, zumindest der feineren geometrischen Reihen R 20 und R 40, empfindlich gestört ist.

Eine der bekanntesten historisch entstandenen Reihen mit $q_3 = \sqrt[3]{10} \approx 2,15$ und den Werten 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100 usw. findet für die Stufung von Geld, Wägestücken od. dgl. Anwendung.

Abgeleitete Reihen. Durch Benutzung jedes p -ten Gliedes einer Grundreihe entstehen abgeleitete Reihen (R r/p mit der Steigung p und dem Stufensprung $q_{r/p} = q_r^p$). So kann man z. B. aus der Reihe R 20 durch Auswahl jedes 3. Gliedes die abgeleitete Reihe R 20/3 mit dem Stufensprung $q_{20/3} = q_{20}^3 = 1,12^3 \approx 1,4$ und den Werten 1,0; 1,4; 2,0; 2,8; 5,6; 8,0 usw. bilden, die u. a. für die Stufung der Blendenwerte in fotografischen Kameras Anwendung findet.

Tabelle 3.1 Normzahlen, Reihen der Hauptwerte (Grundreihen) und Reihen der Rundwerte (Rundwertreihen) nach DIN 323

Grundreihen				Rundwertreihen						Genauwerte	
Hauptwerte				Rundwerte							
R5	R10	R20	R40	R"5	R'10	R"10	R'20	R"20	R'40		
1,00	1,00	1,00	1,00 1,06	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00 1,05	1,0000 1,0593	
		1,12	1,12 1,18				1,10	1,10	1,10 1,20	1,1220 1,1885	
		1,25	1,25 1,32		1,25	1,20	1,25	1,20	1,25 1,30	1,2589 1,3353	
	1,25	1,40	1,40 1,50				1,40	1,40	1,40 1,50	1,4125 1,4962	
		1,60	1,60	1,60 1,70	1,50	1,60	1,50	1,60	1,60	1,60 1,70	1,5849 1,6788
			1,80	1,80 1,90				1,80	1,80	1,80 1,90	1,7783 1,8836
	2,00	2,00	2,00 2,12		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00 2,10	1,9953 2,1135	
		2,24	2,24 2,36				2,20	2,20	2,20 2,40	2,2387 2,3714	

Tabelle 3.1 Normzahlen, Reihen der Hauptwerte (Grundreihen) und Reihen der Rundwerte (Rundwertreihen) nach DIN 323 (Fortsetzung)

Grundreihen				Rundwertreihen						Genauwerte
Hauptwerte				Rundwerte						
R5	R10	R20	R40	R"5	R'10	R"10	R'20	R"20	R'40	
2,50	2,50	2,50	2,50 2,65	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50 2,60	2,5119 2,6607
		2,80	2,80 3,00				2,80	2,80	2,80 3,00	2,8184 2,9854
	3,15	3,15	3,15 3,35		3,20	3,00	3,20	3,00	3,20 3,40	3,1623 3,3497
		3,55	3,55 3,75				3,60	3,50	3,60 3,80	3,5481 3,7584
4,00	4,00	4,00	4,00 4,25	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00 4,20	3,9811 4,2170
		4,50	4,50 4,75				4,50	4,50	4,50 4,80	4,4668 4,7315
	5,00	5,00	5,00 5,30		5,00	5,00	5,00	5,00	5,00 5,30	5,0119 5,3088
		5,60	5,60 6,00				5,60	5,50	5,60 6,00	5,6234 5,9566
6,30	6,30	6,30	6,30 6,70	6,00	6,30	6,00	6,30	6,00	6,30 6,70	6,3096 6,6834
		7,10	7,10 7,50				7,10	7,00	7,10 7,50	7,0795 7,4989
	8,00	8,00	8,00 8,50		8,00	8,00	8,00	8,00	8,00 8,50	7,9433 8,4140
		9,00	9,00 9,50				9,00	9,00	9,00 9,50	8,9125 9,4406
10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,0000

Die Zahlenwerte für die Dezimalbereiche < 1 und > 10 lassen sich durch Multiplikation mit Potenzen von 10 errechnen. Die Reihen R' gelten nach DIN 323 auch als **Normmaße** in mm (vgl. auch Tabelle 3.2), und für den kleinsten Dezimalbereich gilt dann die Reihe 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; 0,005; 0,006; 0,007; 0,008; 0,009 mm.

Beispiel: Entspricht eine Länge der Reihe R r ($r = 5, 10, 20, 40$), so erhält man für die abgeleiteten Größen, also Fläche, Volumen usw., folgende Zusammenhänge:

Länge	R r	(Stufensprung q)
Fläche	R r/2	(Stufensprung q^2)
Volumen, Widerstandsmoment	R r/3	(Stufensprung q^3)
Flächenträgheitsmoment	R r/4	(Stufensprung q^4).

Ähnliche Gesetzmäßigkeiten ergeben sich, wenn Kraft und Zeit in derartige Betrachtungen einbezogen werden.

Generell liegen die Vorteile einer gröberen Stufung in der Häufung der Stückzahlen je Größe und damit der wirtschaftlichen Gestaltung einer Serien- oder Massenfertigung. Zugleich ergeben sich Einsparungen am Aufwand für Vorrichtungen, Werkzeuge und Lehren sowie bezüglich der Lagerhaltung und der Ersatzteile. Eine zu grobe Stufung kann jedoch zu Mehraufwand in Bezug auf Bearbeitungsfläche und Material führen und damit die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen.

3.1.2 Normmaße

Die Werte der Reihen R' dienen entsprechend DIN 323 als *Normmaße*. Sie werden in der Normung häufig angewendet, da sie diese sowohl in nationaler als auch in internationaler Hinsicht sehr erleichtern (Beispiele s. **Tabelle 3.2**). Für besondere Anwendungen enthält diese Norm außerdem zusätzliche Maße. Normmaße sind auch für Rundungshalbmesser an Schrauben- oder Wellenkuppen sowie für Winkel, Kegel usw. festgelegt worden (**Tabelle 3.3**).

► Für die meisten konstruktiven Probleme stellen die Werte der Reihe R' 20 die zweckmäßigste Zahlenauswahl dar.

Hingewiesen sei noch darauf, dass die Nennwerte elektrischer Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren usw.) nach einer anderen geometrischen Reihe, der *Internationalen E-Reihe*, gestuft sind, bei der $q_r = \sqrt[r]{10}$ mit $r = 6, 12, 24$ und 48 festgelegt ist (Reihen E 6, E 12, E 24 und E 48).

Die Stufung von Zahlenwerten nach arithmetischen Reihen, bei denen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Werten eine konstante Differenz besteht, sind zu vermeiden, da sich eine große Ungleichmäßigkeit ergibt [1.1].

Eine Zusammenstellung ausgewählter Normen und Richtlinien zum Abschnitt 3.1. enthält **Tabelle 3.3**.

Tabelle 3.2 Anwendungsbeispiele für Normmaße
Werte (Auswahl) in mm

a) Rundungshalbmesser, Radien r nach DIN 250													
Vorzugsreihe	0,2	0,4	0,6	1	1,6	2,5	4	6	10	16	20	25	32
	40	50	63	80	100	125	160	200					
Nebenreihe	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,6	2 2,5	3	4	5
	6	8	10	12	16	18	20	22	25	28	32	36	40
	45	50	56	63	70	80	90	100	110	125	140	160	180
	200												

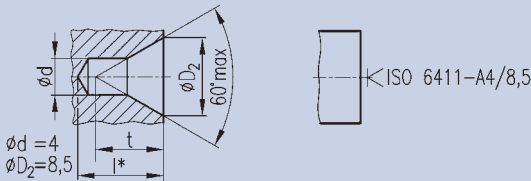
b) Zentrierbohrungen nach DIN ISO 6411 (Form A), bei der vereinfachten Angabe wird als Norm ISO 6411 angegeben													
d	0,5	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10
D_2	1,06	1,7	2,12	2,65	3,35	4,25	5,3	6,7	8,5	10,6	13,2	17	21,2
t	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,5	4,4	5,5	7,0	8,7

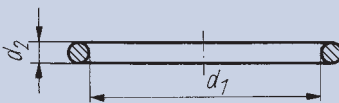
d Durchmesser der Freibohrung

D_2 großer Durchmesser der Kegelbohrung

t^* abhängig vom Zentrierbohrer

(t^* nicht kleiner als t)



c) Runddichtringe (s. auch Abschnitt 7.6)																					
																					
d_1	2	2,24	2,5	2,8	3,15	3,55	4	4,5	5	5,6	6,3	7,1	8	9	10	11,2	12,5	14	16	18	20
d_2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5	3,15	3,15

d) Schmalkeilriemen nach DIN 2215 (s. auch Abschnitt 13.9.3)					
Wirklänge L_w		436 bis 522	530 bis 660	685 bis 843	865 bis 1048
Zulässige Abweichung der Innen- bzw. Wirklänge L_w		+2,5 -5	+3 -6	+4 -8	+5 -10

Tabelle 3.2 Anwendungsbeispiele für Normmaße (*Fortsetzung*)

Zulässiger Unterschied der Wirklängen der Keilriemen eines Satzes bei mehrrolligen Antrieben		1,3	1,6	2	2,5
1079 bis 1302	1330 bis 1661	1640 bis 2075	2050 bis 2575	2672 bis 3232	3200 bis 4082
+6 -10	+8 -12,5	+10 -12,5	+12 -12,5	+15 -12,5	+20 -15
3,2	4	5	6,3	8	10
4060 bis 5082	5330 bis 6382	6743 bis 8082	8548 bis 10082	10652 bis 12582	13700 bis 16082
+25 -15	+30 -23	+40 -30	+50 -30	+60 -51	+80 -76
12,5	16	20	25	32	40

Tabelle 3.3 Normen zum Abschnitt 3.1

DIN 250	Radien
DIN 254	Reihen von Kegeln und Kegelwinkeln; Werte für Einstellwinkel und -höhen
DIN 323	Normzahlen und Normzahlreihen; Hauptwerte, Genauwerte, Rundwerte; Einführung
DIN 406 T10, T11	Technische Zeichnungen; Maßeintragung; Begriffe, Grundlagen
DIN 820	Normungsarbeit; Grundsätze, Gestaltung von Dokumenten, Begriffe
DIN 1313	Größen
DIN 1315	Winkel; Begriffe, Einheiten
DIN ISO 128	Technische Zeichnungen; Allgemeine Grundlagen der Darstellung

3.1.3 Berechnungsbeispiele

Aufgabe 3.1.1 Stufung der Abmessungen von Isolierelementen

Für die Befestigung einer Baureihe von Relais auf den zugehörigen Chassis werden Isolierelemente aus thermoplastischen Werkstoffen mit quadratischem Querschnitt (Seitenlänge a) in folgenden Abmessungen benötigt:

$$a = 12; 18; 26; 40; 60 \text{ mm.}$$

Für die zugehörigen Dicken gelten die Werte

$$d = 2; 3,15; 5; 8; 12,5 \text{ mm.}$$

Zu ermitteln sind die zugrunde liegenden Reihen und Stufensprünge q .

Lösung. Durch Vergleich mit den Zahlenwerten der Grundreihen bzw. Rundwertreihen in Tabelle 3.1 und der Feststellung der Steigung p (p -tes Glied der jeweiligen Reihe) ergibt sich für die Stufung der Seitenlänge a die Reihe R' 40/7.

Der zugehörige Stufensprung q kann aus dem allgemeinen Bildungsgesetz der geometrischen Reihen

$$a; aq; aq^2; \dots aq^{n-1}$$

mit dem Anfangsglied $a = 12 \text{ mm}$ und der Anzahl der Glieder $n = 5$ berechnet werden:

$$aq^4 = 60; 12q^4 = 60; q = \sqrt[4]{60/12} = \sqrt[4]{5}, q \approx 1,5 \left(\approx 1,06^7; p=7 \right).$$

Entsprechend ergibt sich für die Stufung der Dicke d die Reihe R 10/2 (= R 5) mit $q \approx 1,6$ und $p = 2$.

Aufgabe 3.1.2 Typenreihe von Messgeräten

Für eine Typenreihe von Einbaumessgeräten mit tubusförmigem Gehäuse werden Abdeckscheiben aus Glas mit den Durchmessern d von 30 bis 120 mm nach der abgeleiteten Reihe R 20/3 benötigt.

Es sind der Stufensprung q der Reihe und die Durchmesser der Glasscheiben zu berechnen.

Lösung. Bei der abgeleiteten Reihe R 20/3 gilt für den Stufensprung $q_{20/3} = 10^{3/20} \approx 1,12^3 \approx 1,4$.

Die Stufung nach der geometrischen Reihe mit dem allgemeinen Bildungsgesetz a ; aq ; aq^2 ; ... aq^{n-1} ergibt mit dem Anfangsglied $a = d = 30$ mm folgende Durchmesserwerte (gerundet):

$$d = 30; 42; 60; 84; 120 \text{ mm.}$$

Aufgabe 3.1.3 Baureihe von Getriebemotoren

Elektrische Kleinstmotoren (Spaltpolläufer) sind mit hochübersetzenden Stirnradgetrieben unterschiedlicher Übersetzung so zu komplettieren, dass eine Baureihe von Getriebemotoren mit acht Baugrößen entsteht. Bei der kleinsten Größe soll eine Drehzahl der Abtriebswelle des Getriebes von $n_{ab} = 1$ U/min und ein Drehmoment von $M_{dab} = 1000$ N · mm vorliegen.

Die weiteren Drehzahlen sind zunehmend nach der abgeleiteten Reihe R 10/3 und die Drehmomente abnehmend nach der Grundreihe R 10 zu stufen. Außerdem ist zu ermitteln, nach welcher Reihe die Stufung der Leistung P erfolgt.

Lösung. Der Stufensprung für die abgeleitete Reihe R 10/3 beträgt $q_{10/3} = 10^{3/10} = 1,25^3 \approx 2$.

Die Stufung nach der geometrischen Reihe mit a ; aq ; aq^2 ; ... aq^{n-1} und dem Anfangsglied $a = n_{ab} = 1$ U/min ergibt folgende Werte für die Stufung der Drehzahlen n_{ab} der Abtriebswelle:

$$n_{ab} = 1; 2; 4; 8; 16; 32; 64; 128 \text{ U/min.}$$

Für die Grundreihe R 10 gilt $q_{10} = \sqrt[10]{10} \approx 1,25$.

Damit erhält man analog für die *Drehmomente*:

$$M_{dab} = 1000; 800; 640; 512; 410; 328; 262; 210 \text{ N} \cdot \text{mm.}$$

Die *Leistung* errechnet sich aus

$$P = 9,55 \cdot 10^{-5} M_{dab} n_{ab} \approx 10^{-4} M_{dab} n_{ab},$$

mit P in W, M_{dab} in N · mm, n_{ab} in U/min und den Werten

$$P \approx 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5 \text{ W.}$$

Berechnung von q für die Stufung der Leistungswerte P mit dem Anfangsglied $a = P = 0,1$ W:

$$\begin{aligned} a \cdot q^7 &= 2,6; & 0,1 q^7 &= 2,5; & q &= \sqrt[7]{25}; \\ \lg q &= (1/7) \lg 25 = (1/7) \cdot 1,3979 = 0,1997; & q &= 1,584. \end{aligned}$$

Dies entspricht der Stufung nach der geometrischen Reihe R 5.

Aufgabe 3.1.4 Baureihe LötKolben

Für die Fertigung einer LötKolbenbaureihe sind die einzelnen Größen der Anschlussleistung gemäß der Normreihe R 5/2 zu stufen. Der kleinste LötKolben im Fertigungsprogramm soll 10 W elektrische Leistung aufnehmen und die Baureihe fünf Leistungsstufen umfassen.

Diese Leistungsreihe ist zu berechnen.

Lösung. Die Reihe R 5 hat einen Stufensprung $q_5 \approx 1,6$. Da nur jedes zweite Glied der Reihe für die Baureihe zweckmäßig ist, beträgt der Stufensprung $q_{5/2} \approx 1,6 \cdot 1,6 = 2,56$. Damit ergibt sich die Leis-

tungsreihe zu 10 W; 25,6 W; 65,53 W; 167,8 W und 429,5 W. Diese Werte sind zu runden. Ein Vorschlag könnte lauten: 10 W; 25 W; 63 W; 170 W und 450 W.

Literatur zum Abschnitt 3.1

- [3.1] *Friedewald, H.-J.*: Normzahlen – Grundlage eines wirtschaftlichen Erzeugnisprogramms. Handbuch der Normung, Bd. 3. Berlin: Beuth-Verlag 1972.
- [3.2] *Gerhard, E.*: Baureihenentwicklung. Konstruktionsmethode Ähnlichkeit. Grafenau: expert-Verlag 1994.
- [3.3] *Kloberdanz, H.*: Rechnerunterstützte Baureihenentwicklung. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 40. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- [3.4] *Czichos, H. (Hrsg.)*: HÜTTE – Das Ingenieurwissen. 34. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 2012.
- [3.5] *Klein, M.*: Einführung in die DIN-Normen. 14. Aufl. Vieweg+Teubner Verlag 2008.

3.2 Toleranzen und Passungen

Alle zu fertigenden Werkstücke weichen in ihren Abmessungen von den geforderten Maßen ab. Diese Abmaße und Toleranzen sind abhängig von der Beschaffenheit der zur Produktion verwendeten Maschinen und Werkzeuge, der Temperaturdifferenz zwischen Bearbeitung und Anwendung, von Spannungen im Werkstück, seinen elastischen Eigenschaften usw. Aufgabe des Konstrukteurs ist es, ihren Bereich so festzulegen, dass die Funktion stets erfüllt wird. Dabei ist zu beachten, dass die Fertigung in Verbindung mit der Prüfung um so teurer wird, je enger die Grenzen der Abmaße und Toleranzen gezogen werden.

Um eine rationelle Fertigung und vor allem einen gesicherten Austauschbau zu ermöglichen, sind im internationalen **ISO-System** (*ISO – International Organisation of Standardization*) vereinheitlichte Richtlinien geschaffen worden, die ihren Niederschlag in nationalen Normen gefunden haben (DIN EN ISO 286, bisher DIN 7154, 7155, 7157, 7161, 7182, 58700 usw.). Sie enthalten Festlegungen zu den Grenzabmaßen und Toleranzen an Einzelteilen (*Toleranzsystem*), zum Zusammenwirken von mit Toleranzen behafteten Innen- und Außenteilen (*Passsystem*) sowie zur Genauigkeit der Arbeits- und Prüflinien für die Fertigung (*Grenzmaßsystem für Lehren*).

- Zur Vereinfachung der Umstellung der bisherigen DIN-Normen auf DIN EN ISO 286 sind nachfolgend die neuen Zeichen und Benennungen zusammen mit denen nach DIN (in Klammer) aufgeführt.

3.2.1 Toleranzen [1.3] [3.2.1] [3.2.4] bis [3.2.8] [3.2.30] [3.2.31] [3.2.37] [3.2.38]

In der Technik werden die geometrischen Toleranzen und Toleranzen physikalischer, chemischer und anderer Eigenschaften (z. B. Temperatur, Härte, Stoffmengenverhältnisse) unterschieden. Die nachfolgend behandelten geometrischen Toleranzen beziehen sich auf die gesamte Gestalt von Bauteilen und Erzeugnissen und können sowohl die Abmessungen (Länge, Breite usw.) als auch die Formen (z. B. Kreisform oder Zylinderform), die Lagen (Symmetrie, Parallelität usw.), die kombinierten Formen und Lagen (u. a. Rundlauf und Stirnlauf) sowie die Rauheit der Oberfläche betreffen. Man unterscheidet

- Maßtoleranzen
- Form- und Lagetoleranzen
- Forderungen zur Oberflächenrauheit.

Es gibt also praktisch keine Abmessungen, die nicht einem bestimmten Fertigungsspielraum gerecht werden müssen.

Die zuerst genannten Maßtoleranzen (i. Allg. kurz mit Toleranzen bezeichnet) haben den Vorrang. Für spezielle Konstruktionselemente gibt es darüber hinaus Sondertoleranzen, z. B. für Zahnräder (s. Abschnitt 13.4.10), für Gewinde und Wälzlager.

3.2.1.1 Grundbegriffe

Gepaarte Teile berühren sich an den Passflächen. Man unterscheidet dabei im Allgemeinen zwischen Welle und Bohrung:

Welle ist die Kurzbezeichnung für alle **Außenmaße** zwischen zwei parallelen ebenen Flächen eines Werkstücks oder parallelen Tangentenebenen an runden Werkstücken.

Bohrung ist sinngemäß die Kurzbezeichnung für alle **Innenmaße**. Als Bezugsmaß dient das **Nennmaß** N bzw. D .

Das tolerierte **Maß**, auch Passmaß P genannt, ist ein Nennmaß, an welchem die Abmaße angegeben sind und das i. Allg. für eine Passung bestimmt ist.

Ein ausgeführtes Maß darf zwei **Grenzmaße** nicht über- oder unterschreiten. Grenzmaße sind das **Größtmaß** G (Höchstmaß) und das **Kleinstmaß** K (Mindestmaß), zwischen denen das **Istmaß** I liegen muss.

Die Differenz zwischen dem Größtmaß G und dem Nennmaß N stellt das **obere Abmaß** ES , es (A_o), die Differenz zwischen dem Kleinstmaß K und dem Nennmaß N das **untere Abmaß** EI , ei (A_u) und die Differenz zwischen dem Istmaß I und dem Nennmaß N das **Ist-Abmaß** E_{ist} (A_i) dar.

Grenzabmaße sind Abmaße zum Nennmaß, wenn die Nulllinie durch das Toleranzfeld geht oder dasselbe berührt.

Das **Istmaß** I ist das am fertigen Teil gemessene Maß, das aufgrund von Formabweichungen an verschiedenen Stellen unterschiedlich groß sein kann.

Die Differenz zwischen dem Größt- und Kleinstmaß oder zwischen dem oberen und dem unteren Abmaß bezeichnet man als **Toleranz** T .

Die **Nulllinie** ist die dem Nennmaß und damit dem Abmaß Null entsprechende Bezugslinie für die Abmaße.

Ein **Freimaß** F ist ein Nennmaß, welches frei von Abmaßen angegeben ist (vgl. Abschnitt 3.2.1.3). Am Beispiel einer Welle und einer Bohrung (**Bild 3.1a, b**) sind in **Tabelle 3.4** die wichtigsten Toleranzbezeichnungen zusammengestellt und erläutert. Sie gelten sinngemäß auch für flache Teile (**Bild 3.1c**).

Tabelle 3.4 Bezeichnungen bei tolerierten Maßen nach DIN EN ISO 286 (s. Tabelle 3.21), bisherige Angaben nach DIN 7182 in Klammer; Maße in mm

Bezeichnung	Kurzzeichen	Beispiel (Bohrung)	Erläuterungen
Nennmaß	N bzw. D	100	Maß zur Größenangabe, auf das Abmaße bezogen werden
Passmaß		$100^{+0,2}_{-0,1}$	in Zeichnung eingetragenes toleriertes Nennmaß
Abmaß*) – Ist-Abmaß – oberes Abmaß – unteres Abmaß	$E_{ist}(A_i)$ $ES(A_{oB})$ – Innenmaße $es(A_{oW})$ – Außenmaße $EI(A_{uB})$ – Innenmaße $ei(A_{uW})$ – Außenmaße	$0,1$ $0,2$ $-0,1$	vorhandene zulässige Abmaße vom Nennmaß
Beispiel Bohrung: Grenzmaße – Größtmaß (Höchstmaß) – Kleinstmaß (Mindestmaß)	$G = N + ES (= N + A_{oB})$ $K = N + EI (= N + A_{uB})$	100,2 99,9	zulässiges größtes und kleinstes Maß eines Teils (durch Toleranzangaben festgelegt)
Istmaß	$I = N + E_{ist} (= N + A_i)$	100,1	Maß des fertigen Teils
Toleranz	$T = G - K$ $= ES - EI (= A_{oB} - A_{uB})$	0,3	zulässiger Schwankungsbereich zwischen G und K
Nulllinie	$0 \text{ — } 0$		durch Nennmaß festgelegte Bezugslinie für Abmaße

*) Abmaße für Außenmaße (Wellen) werden nach DIN EN ISO 286 mit Kleinbuchstaben (es , ei), für Innenmaße (Bohrungen) mit Großbuchstaben (ES , EI) gekennzeichnet.

Für die Tolerierung von Maßen und deren Angabe in Zeichnungen stehen grundsätzlich drei Möglichkeiten zur Verfügung (**Bild 3.2**):

- ISO-Toleranzen nach DIN EN ISO 286 und bisher nach DIN 58700
(z. B. $\varnothing 10 d9$, $\varnothing 4 H8$) (s. Abschnitt 3.2.1.2)
- Grenzabmaße (obere und untere Abmaße) für Maße ohne Toleranzangabe, die sog. Allgometoleranzen (Freimaßtoleranzen) nach DIN ISO 2768 (bisher DIN 7168 T1)
(z. B. zu Maß 32 im Zeichnungsschriftfeld Angabe der Toleranzklasse *fein*, *mittel*, *grob* oder *sehr grob*) (s. Abschnitt 3.2.1.3)
- Toleranzen durch Angabe frei gewählter Abmaße, die nicht genormt sind
(z. B. $5^{+0,2}_{-0,1}$) (s. Abschnitt 3.2.1.3).

Bei der Auswahl dieser Toleranzen und Grenzabmaße sind Funktion, Sicherung der wirtschaftlichen Fertigung und Montage sowie Gewährleistung der Maßkontrolle zu beachten, möglichst mit handelsüblichen Messzeugen und Lehren [3.2.1].

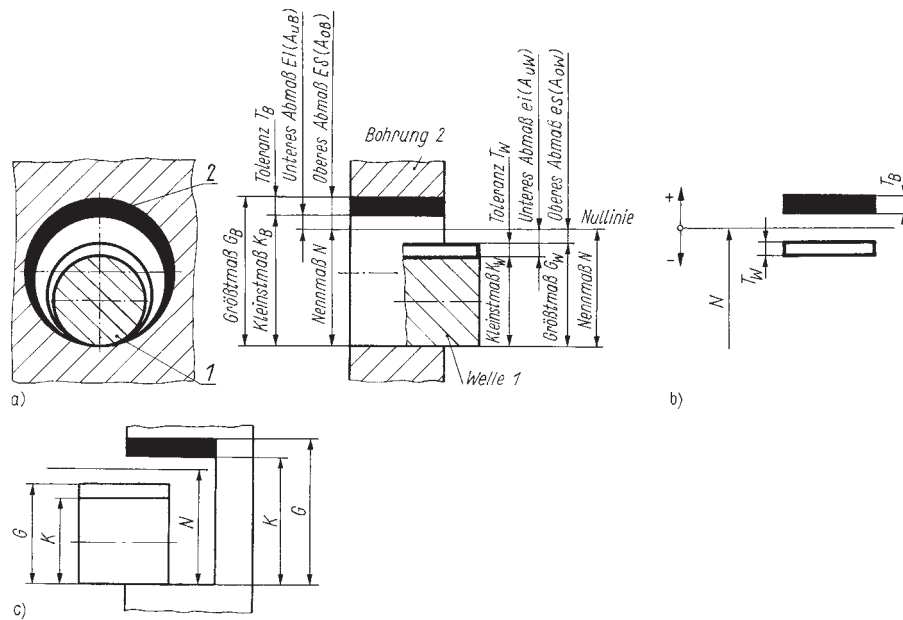


Bild 3.1 Maße, Abmaße und Toleranzen bei Außen- und Innenteilen

- a) ausführliche Darstellung bei Wellen und Bohrungen;
 b) schematische, in der Praxis übliche Vereinfachung (Achse des Erzeugnisses befindet sich immer unter dem Schema);
 c) Paarung flacher Teile nach DIN EN ISO 286 (s. Tabelle 3.21), bisherige Angaben nach DIN 7182 in Klammer

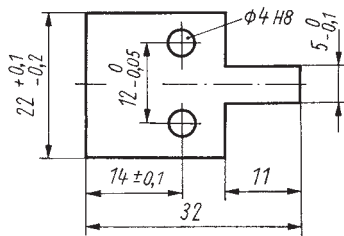


Bild 3.2 Schreibweise der Toleranzen in Zeichnungen

3.2.1.2 ISO-Toleranzen

Die Kennzeichnung der Toleranzfelder erfolgt durch einen Buchstaben (Lage der Felder bezüglich einer Nulllinie) und eine Ziffer (Größe der Felder).

Lage der Maßtoleranzfelder. Sie ist auf die durch das Nennmaß festgelegte Bezugslinie, die Nulllinie, bezogen. Zur Kennzeichnung der Lage werden bei Außenmaßen die kleinen Buchstaben a bis z, za, zb, zc und bei Innenmaßen analog die großen Buchstaben A bis Z, ZA, ZB, ZC verwendet, in einigen Fällen auch eine Kombination von je zwei Buchstaben (z. B. cd oder EF). Insgesamt ergeben sich damit für Außen- und Innenmaße jeweils 28 mögliche Lagen (Grundabmaße) (**Bild 3.3**).

Die Toleranzfelder mit den Buchstaben h und H liegen an der Nulllinie. Ein mit h bezeichnetes Toleranzfeld eines Außenmaßes bzw. einer Welle berührt die Nulllinie von unten (**Einheitswelle**), ein solches mit H für ein Innenmaß bzw. eine Bohrung diese dagegen von oben (**Einheitsbohrung**).

Die Toleranzfelder, die mit den übrigen kleinen und großen Buchstaben bezeichnet sind, liegen symmetrisch zur Nulllinie.

Bei der Prüfung von Werkstücken unterscheidet man in diesem Zusammenhang **Gutgrenzen** (Grenzen der maximalen Materialmenge), die bei der Fertigung zuerst, sowie **Ausschussgrenzen** (Grenzen der minimalen Materialmenge), die bei der Fertigung zuletzt erreicht werden und nach deren Überschreitung das Bauteil dann Ausschuss ist.

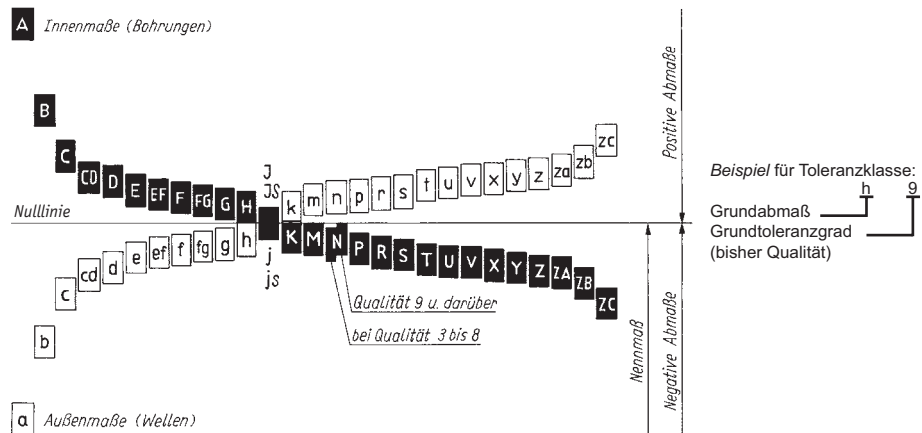


Bild 3.3 Lage der ISO-Maßtoleranzfelder für Innenmaße (Bohrungen) und Außenmaße (Wellen) nach DIN EN ISO 286

Größe der Maßtoleranzfelder. Nach DIN EN ISO 286 gelten folgende Festlegungen:

- Die Abmessungen von 1 bis 500 mm sind in 25 annähernd geometrisch gestufte Nennmaßbereiche unterteilt, in denen die Toleranzen einer Qualität (Grundtoleranzgrad) dem gleichen Genauigkeitsgrad für alle Nennmaße entsprechen.
- Die Größe der Toleranzen ist in 20 Bereiche – Qualitäten bzw. Grundtoleranzgrade genannt – untergliedert und wird mit den Zahlen 01, 0, 1 bis 18 bezeichnet. Sie bilden die Toleranzreihen IT 01, IT 0, IT 1 bis IT 18.

Die in den Toleranzreihen (**Tabelle 3.5**) festgelegten Grundtoleranzen beruhen auf folgenden Gesetzmäßigkeiten:

Zur Berechnung wird für Nennmaßbereiche von 1 bis 500 mm eine international vereinheitlichte Toleranzeinheit, der Toleranzfaktor i , herangezogen:

$$i = 0,45\sqrt[3]{D} + 0,001D \quad (\text{in } \mu\text{m}). \quad (3.1a)$$

Für Nennmaßbereiche über 500 mm gilt die Toleranzeinheit bzw. der Toleranzfaktor I :

$$I = 0,004D + 2,1 \quad (\text{in } \mu\text{m}), \quad (3.1b)$$

mit $D = \sqrt{D_1 D_2}$; (D_1, D_2 Grenzen des jeweiligen Nennmaßbereichs, für den Bereich bis 3 mm wird $D = \sqrt{3}$ verwendet; D in mm).

Die mit diesen Gleichungen zu berechnenden ISO-Grundtoleranzen T werden gerundet.

Des Weiteren ist die Qualität (Grundtoleranzgrad) IT 6 dem Betrag von $T = 10i$ zugeordnet, und jede nachfolgende IT-Qualität entsteht mittels der R 5-Reihe (Stufensprung $q = \sqrt[5]{10} \approx 1,6$, vgl. Abschnitt 3.1). Die Qualität IT 5 entspricht $T \approx 7i$. Für die Festlegung der Qualitäten IT 01 bis IT 4 wurden mit Rücksicht auf die zu deren Realisierung notwendigen höheren Fertigungsanstrengungen hiervon abweichende Gesichtspunkte gewählt. Ebenso gelten im Nennmaßbereich unter 1 mm

andere Bedingungen, wofür bisher in DIN 58701 besondere Grundtoleranzen festgelegt waren (**Tabelle 3.6**).

Die allgemeinen Anwendungsbereiche der ISO-Qualitäten (Grundtoleranzgrade) IT zeigt **Bild 3.4**. Bei deren Auswahl zur Tolerierung von Nennmaßen ist zu beachten, dass eine jeweils nächsthöhere Qualität bereits ein um 60% größeres Toleranzfeld aufweist und damit eine wesentliche Verringerung der Fertigungskosten ermöglicht (**Bild 3.5**).

Tabelle 3.5 ISO-Grundtoleranzen T für Nennmaße von 1 bis 500 mm nach DIN EN ISO 286; Werte in μm

Nennmaß- bereich mm	Qualität (Grundtoleranzgrad) IT																			
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
bis 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	1000	1400
über 3 bis 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	1200	1800
über 6 bis 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	1500	2200
über 10 bis 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800	2700
über 18 bis 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	2100	3300
über 30 bis 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900
über 50 bis 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000	4600
über 80 bis 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	5400
über 120 bis 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300
über 180 bis 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600	7200
über 250 bis 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200	8100
über 315 bis 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700	8900
über 400 bis 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300	9700

Tabelle 3.6 ISO-Grundtoleranzen T für Nennmaße kleiner als 0,2 bis 10 mm in der Feinwerktechnik bisher nach DIN 58701; Werte in mm

Nennmaß- bereich mm	Qualität (Grundtoleranzgrad) IT																			
	01f	0f	1f	2f	3f	4f	5f	6f	6,5f	7f	7,5f	8f	8,5f	9f	9,5f	10f	11f	12f	13f	14f
bis 0,2	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	12	16	20	32	50	75	125
über 0,2 bis 0,4	0,2	0,4	0,6	0,7	1,2	1,8	2,5	4	5	6	7	9	12	15	20	24	38	60	95	150
über 0,4 bis 0,8	0,3	0,4	0,7	1	1,5	2	3	5	6	7	9	11	14	18	23	28	45	72	115	180
über 0,8 bis 1,6	0,3	0,5	0,8	1,2	1,8	2,5	4	6	7	8	10	12	16	21	26	34	52	85	135	210

Tabelle 3.6 ISO-Grundtoleranzen T für Nennmaße kleiner als 0,2 bis 10 mm in der Feinwerktechnik
bisher nach DIN 58701; Werte in mm (Fortsetzung)

Nennmaß- bereich mm	Qualität (Grundtoleranzgrad) IT																			
	01f	0f	1f	2f	3f	4f	5f	6f	6,5f	7f	7,5f	8f	8,5f	9f	9,5f	10f	11f	12f	13f	14f
über 1,6 bis 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	8	10	12	14	19	25	32	40	60	100	140	250
über 3 bis 6	*	*	*	*	*	*	*	*	10	*	15	*	23	*	38	*	*	*	*	*
über 6 bis 10	*	*	*	*	*	*	*	*	12	*	18	*	28	*	46	*	*	*	*	*

Bezeichnung der Toleranzqualität 5 für die Feinwerktechnik (f): Qualität 5f ($f \triangleq$ fein)

Für Werte unter 1 μm liegen noch keine ausreichenden Erfahrungen vor. Für die mit * gekennzeichneten Qualitäten und Nennmaßbereiche s. Tabelle 3.5.

Bei Werkstücken mit Abmessungen unter 1 mm wirken sich Fertigungsungenauigkeiten, Temperatureinflüsse usw. anders aus. Außerdem nehmen z.B. Messfehler mit kleiner werdendem Nennmaß relativ stärker zu. Deshalb wurden die Toleranzfelder für den Nennmaßbereich < 1 mm gesondert genormt (s. Tabelle 3.16; vgl. DIN EN ISO 286), wobei Vorzugstoleranzfelder nicht vorgesehen sind. Alle Toleranzfelder der Wellen von cd bis z und der Bohrungen von CD bis Z liegen unabhängig von der Grundtoleranz (von IT 4 bis IT 10) symmetrisch zur Nulllinie. Analoge Festlegungen gibt es ebenfalls für den Nennmaßbereich über 500 bis 3150 mm (s. DIN EN ISO 286 und DIN 7172).

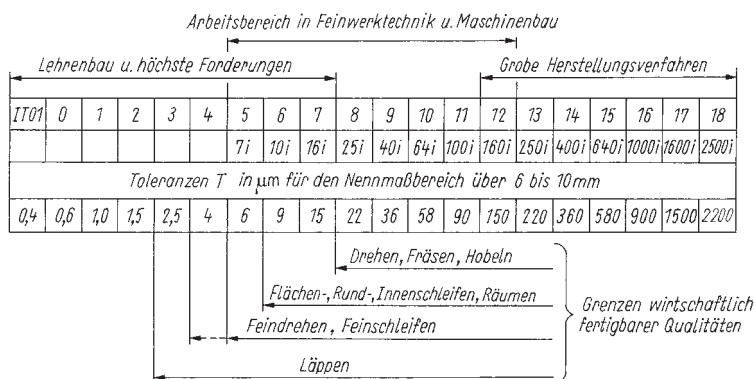


Bild 3.4 Anwendungsbereiche der ISO-Qualitäten (Grundtoleranzgrade) IT und der Toleranzen T
 T hier für N über 6 bis 10 mm

Toleranzklasse. Die Einheit von Lage (z.B. Grundabmaß h) und Größe eines Toleranzfeldes (z.B. Qualität bzw. Grundtoleranzgrad 9) bezeichnet man als Toleranzklasse (z.B. $h9$).

Bei Kombination aller möglichen Toleranzfeldlagen mit den IT-Qualitäten bzw. Grundtoleranzgraden entsteht für jeden Nennmaßbereich eine Vielzahl verschiedener Toleranzfelder. Im Sinne einer ökonomischen Fertigung ist die Beschränkung dieser Vielfalt zweckmäßig. DIN EN ISO 286 und bisher DIN 58700 enthalten deshalb nur wenige Toleranzen zur bevorzugten Anwendung. DIN 7154 enthielt bisher daneben weitere bevorzugte Toleranzen, die aber nur in Sonderfällen angewendet werden sollten, wenn das konstruktive Problem mit den Vorzugstoleranzen nicht lösbar ist (Tabelle 3.7).

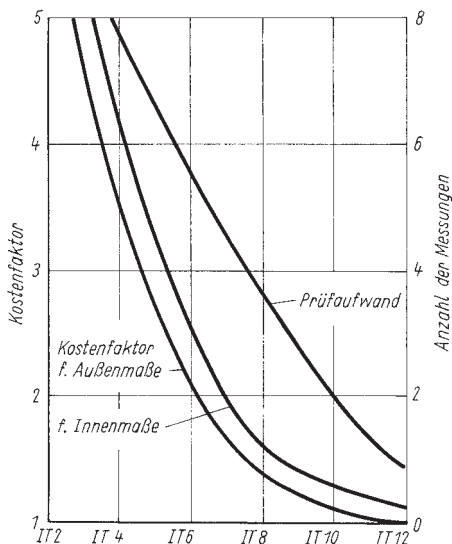


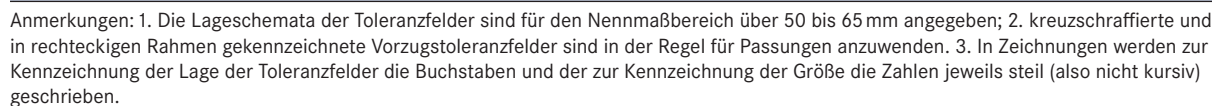
Bild 3.5 Verdeutlichung von Fertigungskosten und Prüf Aufwand bei ISO-Qualitäten (Grundtoleranzgrade) [1.15]

Tabelle 3.7 ISO-Toleranzfelder für Außen- und Innenmaße von 1 bis 500 mm
Auszug aus DIN EN ISO 286 (bisher DIN 754, 755, 757) für die Qualitäten (Grundtoleranzgrade) IT 6 bis IT 9 und Nennmaße von 1 bis 250 mm
DIN 58700 (zurückgezogen) enthält zusätzlich Toleranzfeldauswahl und zu empfehlende Passungen für die Feinwerktechnik (s. Tabelle 3.16)

Qualität 6											
a) Außenmaße											
Nennmaßbereich mm											
Toleranzfelder											
Nennabmaße / µm											
f6	g6	h6	js6	k6	m6	n6	p6	r6	s6	t6	
von 1 bis 3	-6 -2	0 +3,0	+6 +8	+10 +12	+16 +20	+23 +27	-	-	-	-	
über 3 bis 6	-12 -8	0 +4,0	+9 +12	+16 +20	+23 +27	-	-	-	-	-	
über 6 bis 10	-18 -12	0 +4,5	+10 +15	+19 +24	+28 +32	-	-	-	-	-	
über 10 bis 14	-13 -5	0 +4,5	+10 +15	+19 +24	+28 +32	-	-	-	-	-	
über 14 bis 18	-22 -14	0 +4,5	+10 +15	+19 +24	+28 +32	-	-	-	-	-	
über 18 bis 24	-16 -6	0 +5,5	+12 +18	+23 +29	+34 +39	-	-	-	-	-	
über 24 bis 30	-27 -17	0 +5,5	+12 +18	+23 +29	+34 +39	-	-	-	-	-	
über 30 bis 40	-20 -7	0 +6,5	+15 +21	+28 +35	+41 +48	-	-	-	-	-	
über 40 bis 50	-33 -20	0 +6,5	+15 +21	+28 +35	+41 +48	-	-	-	-	-	
über 50 bis 65	-25 -9	0 +8,0	+18 +25	+33 +42	+50 +59	-	-	-	-	-	
über 65 bis 80	-41 -25	0 +8,0	+18 +25	+33 +42	+50 +59	-	-	-	-	-	
über 80 bis 100	-36 -12	0 +11,0	+25 +35	+45 +59	+71 +91	-	-	-	-	-	
über 100 bis 120	-58 -34	0 +11,0	+25 +35	+45 +59	+71 +91	-	-	-	-	-	
über 120 bis 140	-43 -14	0 +12,5	+28 +40	+52 +68	+80 +104	-	-	-	-	-	
über 140 bis 160	-68 -39	0 +12,5	+28 +40	+52 +68	+80 +104	-	-	-	-	-	
über 160 bis 180	-58 -34	0 +14,5	+33 +46	+60 +79	+109 +159	-	-	-	-	-	
über 180 bis 200	-50 -25	0 +14,5	+33 +46	+60 +79	+109 +159	-	-	-	-	-	
über 200 bis 225	-79 -44	0 +17,0	+41 +57	+75 +103	+133 +188	-	-	-	-	-	
über 225 bis 250	-79 -44	0 +17,0	+41 +57	+75 +103	+133 +188	-	-	-	-	-	

Qualität 7											
Toleranzfelder											
Nennabmaße / µm											
e7	f7	h7	js7	k7	m7	n7	s7	t7	u7		
von 1 bis 3	-14 -6	0 +5	+10 +12	+14 +14	+14 +18	-	-	-	-	-	
über 3 bis 6	-24 -16	0 +5	+10 +12	+14 +14	+14 +18	-	-	-	-	-	
über 6 bis 10	-20 -10	0 +6	+13 +16	+20 +21	+31 +35	-	-	-	-	-	
über 10 bis 14	-37 -22	0 +6	+13 +16	+20 +21	+31 +35	-	-	-	-	-	
über 14 bis 18	-25 -13	0 +7,5	+16 +21	+25 +28	+38 +43	-	-	-	-	-	
über 18 bis 24	-40 -28	0 +7,5	+16 +21	+25 +28	+38 +43	-	-	-	-	-	
über 24 bis 30	-32 -16	0 +9	+19 +25	+30 +36	+46 +51	-	-	-	-	-	
über 30 bis 40	-50 -34	0 +9	+19 +25	+30 +36	+46 +51	-	-	-	-	-	
über 40 bis 50	-40 -20	0 +10,5	+23 +29	+36 +41	+56 +63	-	-	-	-	-	
über 50 bis 65	-61 -41	0 +10,5	+23 +29	+36 +41	+56 +63	-	-	-	-	-	
über 65 bis 80	-50 -25	0 +12,5	+27 +34	+42 +48	+68 +80	-	-	-	-	-	
über 80 bis 100	-75 -50	0 +12,5	+27 +34	+42 +48	+68 +80	-	-	-	-	-	
über 100 bis 120	-60 -30	0 +15	+32 +41	+50 +58	+71 +87	-	-	-	-	-	
über 120 bis 140	-90 -60	0 +15	+32 +41	+50 +58	+71 +87	-	-	-	-	-	
über 140 bis 160	-72 -36	0 +17,5	+38 +48	+58 +71	+87 +109	-	-	-	-	-	
über 160 bis 180	-107 -71	0 +17,5	+38 +48	+58 +71	+87 +109	-	-	-	-	-	
über 180 bis 200	-85 -43	0 +20	+43 +55	+67 +80	+100 +120	-	-	-	-	-	
über 200 bis 225	-125 -83	0 +20	+43 +55	+67 +80	+100 +120	-	-	-	-	-	
über 225 bis 250	-100 -50	0 +23	+50 +63	+77 +94	+119 +146	-	-	-	-	-	

Qualitäten 8 und 9											
Toleranzfelder											
Nennabmaße / µm											
c8	d8	e8	f8	h8	js8	u8	x8	z8	d9	e9	f9
von 1 bis 3	-60 -20	-14 -6	0 +7	+31 +34	+40 +40	-28 -14	-6	0 +12,5	-	-	-
über 3 bis 6	-74 -34	-28 -20	-14 -7	+18 +20	+26 +26	-45 -38	-31	-25 -12,5	-	-	-
über 6 bis 10	-70 -30	-20 -10	0 +9	+41 +46	+53 +53	-30 -20	-10	0 +15	-	-	-
über 10 bis 14	-88 -48	-38 -28	-18 -9	+23 +28	+35 +35	-60 -50	-40	-30 -15	-	-	-
über 14 bis 18	-80 -40	-25 -13	0 +11	+50 +56	+64 +64	-40 -25	-13	0 +18	-	-	-
über 18 bis 24	-102 -62	-47 -35	-22 -11	+28 +34	+42 +42	-76 -61	-49	-36 -18	-	-	-
über 24 bis 30	-95 -50	-32 -16	0 +11,5	+60 +60	+50 +50	-50 -32	-16	0 +21,5	-	-	-
über 30 bis 40	-122 -77	-59 -43	-27 -12,5	+33 +33	+27 +27	-93 -75	-59	-43 -21,5	-	-	-
über 40 bis 50	-118 -65	-40 -20	0 +16,5	+41 +41	+54 +54	-65 -40	-20	0 +26	-	-	-
über 50 bis 65	-143 -98	-73 -53	-33 -16,5	+81 +81	+97 +97	-117 -92	-72	-52 -26	-	-	-
über 65 bis 80	-120 -60	-30 -15	0 +19,5	+60 +60	+80 +80	-80 -50	-25	0 +31	-	-	-
über 80 bis 100	-159 -80	-50 -25	0 +19,5	+60 +60	+80 +80	-80 -50	-25	0 +31	-	-	-
über 100 bis 120	-130 -70	-40 -20	0 +23	+87 +87	+112 +112	-100 -60	-30	0 +37	-	-	-
über 120 bis 140	-176 -96	-60 -30	-46 -23	+148 +148	+192 +192	-174 -134	-104	-74 -37	-	-	-
über 140 bis 160	-170 -90	-50 -25	0 +27	+124 +124	+158 +158	-120 -72	-36	0 +43,5	-	-	-
über 160 bis 180	-224 -112	-60 -30	-54 -27	+198 +198	+264 +264	-207 -159	-123	-87 -43,5	-	-	-
über 180 bis 200	-230 -115	-60 -30	-54 -27	+198 +198	+264 +264	-207 -159	-123	-87 -43,5	-	-	-
über 200 bis 225	-280 -140	-70 -35	-63 -31,5	+252 +252	+336 +336	-245 -185	-143	-100 -50	-	-	-
über 225 bis 250	-352 -176	-88 -44	-72 -36	+336 +336	+448 +448	-285 -215	-165	-115 -57,5	-	-	-



68

Stanzteile, Schweißteile, gepresste und spritzgegossene Teile aus Metallen oder Kunststoffen, durch Pressen hergestellte keramische Werkstücke) gelten für die Maße ohne Toleranzangabe darüber hinaus besondere Normen.

Freitolerierte Maße. Sie werden dann vorgesehen, wenn sowohl die ISO-Toleranzen als auch die Allgemein- bzw. Freimaßtoleranzen nicht geeignet erscheinen. Dies kann der Fall sein, wenn beide Toleranzarten z. B. im Rahmen einer groben Vorfertigung durch Schmieden, Vorschruppen usw. noch zu fein sind oder an einem Werkstück oder einer Baugruppe Maße auftreten, die mit Lehren nicht messbar sind und bei denen durch eine frei gewählte Angabe von symmetrisch zum Nennmaß liegenden Toleranzen der Fertigung das Anstreben des Nennmaßes vorzuschreiben ist.

Richtlinien und Beispiele für die Tolerierung. Generell ist die Fertigungsrichtung zu beachten (Bild 3.6a). Für Absatzmaße sind demgemäß die Toleranzen zahlenmäßig positiv oder negativ zu wählen, abhängig davon, welche Maßbezugsebene zuerst gefertigt wird (b, c). Genormte Toleranzfelder sind für Absatzmaße nicht anzuwenden.

Lochmittenabstände (d) werden mit symmetrisch zum Nennmaß liegenden Toleranzen versehen. Bei mehreren aufeinanderfolgenden Mittenabständen (e, f) sind Kettenmaße und damit Summentoleranzen zu vermeiden (s. Abschnitt 3.2.4). Aus wirtschaftlichen Gründen ist es außerdem vielfach erforderlich, die Toleranzangabe z. B. auf eine bestimmte Länge zu begrenzen (g).

Ist bei Passmaßen die Begrenzung des Toleranzfeldes nur in eine Richtung erforderlich, werden die Nennmaße mit Hinweisen zu „Größtmaß“ oder „Kleinstmaß“ versehen (Bild 3.7). Bei der Fertigung auftretende Abmaße in der anderen Richtung dürfen jedoch die Funktion nicht beeinträchtigen.

Tabelle 3.8 Allgemeintoleranzen (Freimaßtoleranzen) für Maße ohne Toleranzangabe nach DIN ISO 2768 T1 und für Form und Lage (Geradheit und Ebenheit sowie Rechtwinkligkeit) nach DIN ISO 2768 T2 (Auszug)

a) Grenzabmaße für Längenmaße außer für gebrochene Kanten Rundungshalbmesser und Fasenhöhen siehe b); Werte in mm									
Toleranzklasse		Grenzabmaße für Nennmaßbereiche							
Kurzzeichen	Benennung	von 0,5 ¹⁾ bis 3	über 3 bis 6	über 6 bis 30	über 30 bis 120	über 120 bis 400	über 400 bis 1000	über 1000 bis 2000	über 2000 bis 4000
f	fein	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	–
m	mittel	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2
c	grob	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3	±4
v	sehr grob	–	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4	±6	±8

¹⁾ Für Nennmaße unter 0,5 mm sind die Grenzabmaße direkt an dem (den) entsprechenden Nennmaß(en) anzugeben.

b) Grenzabmaße für gebrochene Kanten Rundungshalbmesser und Fasenhöhen; Werte in mm				
Toleranzklasse		Grenzabmaße für Nennmaßbereiche		
Kurzzeichen	Benennung	von 0,5 ¹⁾ bis 3	über 3 bis 6	über 6
f	fein	±0,2	±0,5	±1
m	mittel			
c	grob	±0,4	±1	±2
v	sehr grob			

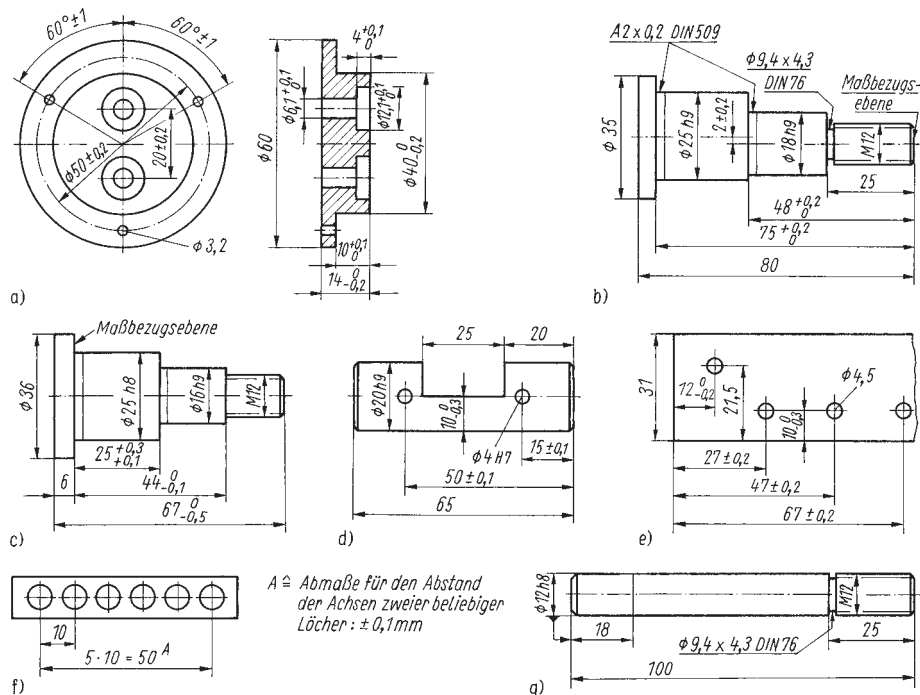
¹⁾ Für Nennmaße unter 0,5 mm sind die Grenzabmaße direkt an dem (den) entsprechenden Nennmaß(en) anzugeben.

Tabelle 3.8 Allgemeintoleranzen (Freimaßtoleranzen) für Maße ohne Toleranzangabe nach DIN ISO 2768 T1 und für Form und Lage (Geradheit und Ebenheit sowie Rechtwinkligkeit) nach DIN ISO 2768 T2 (Auszug) (Fortsetzung)

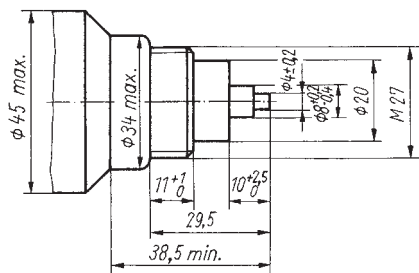
c) Grenzabmaße für Winkelmaße						
Toleranzklasse		Grenzabmaße für Längenbereiche, in mm, für den kürzeren Schenkel des betreffenden Winkels				
Kurzzeichen	Benennung	bis 10	über 10 bis 50	über 50 bis 120	über 120 bis 400	über 400
f	fein	±1°	±0°30'	±0°20'	±0°10'	±0°5'
m	mittel					
c	grob	±1°30'	±1°	±0°30'	±0°15'	±0°10'
v	sehr grob	±3°	±2°	±1°	±0°30'	±0°20'

d) Allgemeintoleranzen für Geradheit und Ebenheit						
Werte in mm						
Toleranzklasse	Allgemeintoleranzen für Geradheit und Ebenheit für Nennmaßbereiche					
Kurzzeichen	bis 10	über 10 bis 30	über 30 bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 3000
H	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4
K	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8
L	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6

e) Allgemeintoleranzen für Rechtwinkligkeit				
Werte in mm				
Toleranzklasse	Rechtwinkligkeitstoleranzen für Nennmaßbereiche für den kürzeren Winkelschenkel			
Kurzzeichen	bis 100	über 100 bis 300	über 300 bis 1000	über 1000 bis 3000
H	0,2	0,3	0,4	0,5
K	0,4	0,6	0,8	1
L	0,6	1	1,5	2

**Bild 3.6** Richtlinien für die Tolerierung [3.2.1]

a) in Fertigungsrichtung; b), c) von Absatzaßmaßen; d) von Lochmittenabständen; e), f) bei aufeinanderfolgenden Mittenabständen (Vermeiden von Summentoleranzen); g) bei begrenzter Toleranzangabe (Freistich nach DIN 509; Gewindefreistich nach DIN 76)

**Bild 3.7** Einseitige Begrenzung des Toleranzfeldes
max. Größtmaß; min. Kleinstmaß

3.2.1.4 Form- und Lagetoleranzen [3.2.8] [3.2.33] bis [3.2.36] [3.2.40]

Die Herstellung geometrisch idealer Werkstücke ist nicht möglich. Die einzelnen Formelemente, aus denen ein Werkstück zusammengesetzt ist (s. Bild 2.12), weichen von der geometrisch idealen Form und Lage ab. Es sind deshalb in DIN EN ISO 1101 und DIN ISO 2768 T2 zweckdienliche Begriffe und Symbole für Form- und Lagetoleranzen festgelegt, deren Anwendung und Eintragung in die Zeichnung Funktion und Austauschbau von Bauteilen und Baugruppen sichern.

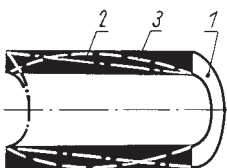
**Bild 3.8** Toleranzzone 1 bei einem Zylinder und Beispiele für Formtoleranzen; 2 schiefe Achse; 3 Tonnenform

Tabelle 3.9 Angabe von Form- und Lagetoleranzen in Zeichnungen (Auszug aus DIN EN ISO 1101)

Formtoleranzen/ Symbol	Beispiel	Erläuterungen
Geradheitstoleranz —		Das wirkliche Profil der Geraden in jedem Längsschnitt der tolerierten Ebene muss zwischen zwei parallelen Geraden vom Abstand $T = 0,1$ mm liegen.
Ebenheitstoleranz 		Die wirkliche Oberfläche jedes Abschnittes der tolerierten Ebene von der Größe $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ an beliebiger Stelle der tolerierten Ebene muss zwischen zwei parallelen Ebenen vom Abstand $T = 0,1$ mm und der Größe $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ liegen.
Rundheitstoleranz ○		Das wirkliche Profil des Kreises in jedem Radialschnitt der tolerierten Zylindermantelfläche muss zwischen zwei konzentrischen Kreisen vom Abstand $T = 0,01$ mm liegen.
Zylinderformtoleranz 		Die wirkliche Oberfläche der tolerierten Zylindermantelfläche muss zwischen zwei coaxialen Zylindern vom Abstand $T = 0,02$ mm liegen.
Rundlauftoleranz 		Das wirkliche Profil der tolerierten Zylindermantelfläche muss bei einer Umdrehung um die Bezugsachse $A-B$ in jeder beliebigen Messebene senkrecht zur Achse zwischen zwei konzentrischen Kreisen mit einem Abstand $T = 0,1$ mm liegen.
Lagetoleranzen/ Symbol	Beispiel	Erläuterungen
Parallelitätstoleranz //		Die tolerierte Ebene muss zwischen zwei zur Basisebene parallelen Ebenen vom Abstand $T = 0,02$ mm liegen. Der Zahlenwert der Toleranz entspricht, bezogen auf die Länge der größeren Seite der tolerierten Ebene (250 mm), einem Winkel von $\frac{0,02 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} = 0,08 \text{ mm/m} = 0,08 \text{ mrad} \approx 16''$.
Rechtwinkligkeitstoleranz ⊥		Die Achse des tolerierten Zylinders muss zwischen zwei zur Basisebene und zur Toleranzrichtung rechtwinkligen parallelen Ebenen vom Abstand $T = 0,1$ mm liegen, wobei das Abmaß vom Nennwinkel $\frac{0,1 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 1 \text{ mrad} \approx 3'26''$ nicht überschreiten darf.
Neigungstoleranz ∠		Die tolerierte Ebene muss zwischen zwei zur Basisebene im vorge-schriebenen Winkel von 40° liegenden parallelen Ebenen vom Abstand $T = 0,08$ mm liegen, wobei das Abmaß vom Nennwinkel $\frac{0,08 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 0,8 \text{ mrad} \approx 2'45''$ nicht überschreiten darf.
Konzentritäts- und Koaxialitätstoleranz ◎		Die Achse des tolerierten Zylinders der Bohrung muss innerhalb einer zur Basisachse coaxialen zylindrischen Toleranzzone vom Durchmesser $D = 0,1$ mm liegen.
Symmetrietoleranz ≡		Die Symmetrieebene der tolerierten Ebenen der Führung muss zwischen zwei parallelen Ebenen liegen, die symmetrisch im Abstand von $0,05 \text{ mm}$ zur Basissymmetrieebene angeordnet sind.
		Kennzeichnung der Maximum-Material-Bedingung: Soll für die tolerierte Fläche oder das Bezugselement die Maximum-Material-Bedingung gelten, wird dies durch das Symbol (M) angezeigt, und zwar hinter – dem Toleranzwert, Bild (a); – dem Bezugsbuchstaben, Bild (b); – oder beidem, Bild (c); je nachdem, ob die oben genannte Bedingung für das tolerierte Element, das Bezugselement oder für beide gilt.

Anmerkungen. Eintragung in Rahmen mit zwei oder drei Feldern: Erstes Feld enthält Symbol; zweites Feld enthält Toleranz in mm (in Zeichnung durch Strich-Punkt-Linie zu kennzeichnen, s. Bild 3.9); drittes Feld enthält Großbuchstaben für Basiselement (Bezug). Kennzeichnung des tolerierten Elementes bzw. des Basiselementes mit $\textcircled{M}$ bedeutet, dass diese Elemente der Maximum-Material-Bedingung unterliegen, d. h. die Toleranz des gekennzeichneten Elementes darf um den Betrag der Differenz zwischen Paarungsmaß und Maximum-Material-Maß (bei Bohrungen das Kleinst-, bei Wellen das Größtmaß) des betrachteten Elementes überschritten werden.

Formtoleranzen. Alle drei Koordinaten eines Körpers sind toleriert. Es entsteht also eine Toleranzzone, in der sich die äußere Gestalt eines Bauteils bewegen kann, ohne dabei die Toleranzgrenzen zu über- oder zu unterschreiten. Formtoleranzen begrenzen die Abmaße dieses Bauteils von seiner idealen geometrischen Form. Sie bestimmen also diese Toleranzzone.

Ein Zylinder (**Bild 3.8**) kann z. B. innerhalb der Toleranzzone eine Tonnen- oder Kegelstumpfform aufweisen, oder seine Form kann gekrümmt sein. Beispiele für die Angabe der Formtoleranzen in Zeichnungen enthalten **Tabelle 3.9** und **Bild 3.9**.

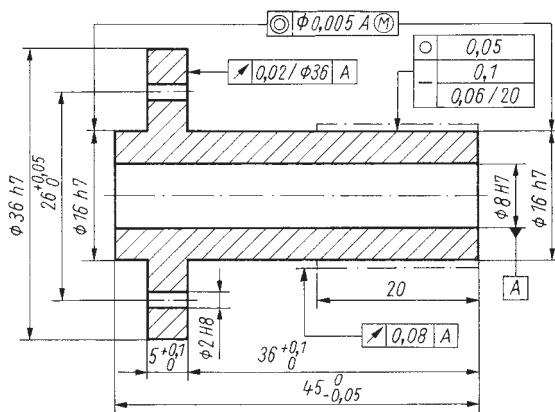


Bild 3.9 Angabe von Form- und Lagetoleranzen in Zeichnungen
Beispiel; s. auch Tabelle 3.9 und Bild 3.10

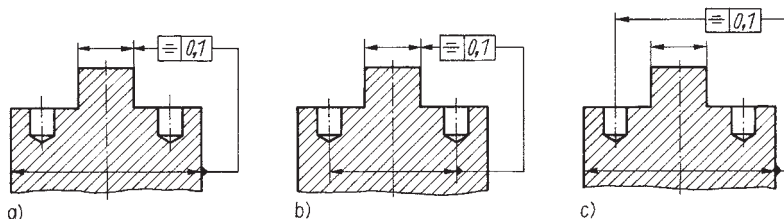


Bild 3.10 Angabe von Symmetrietoleranzen in Zeichnungen nach DIN ISO 1101

Lagetoleranzen. Ist es aus funktionellen oder fertigungstechnischen Gründen erforderlich, dass Formelemente eines Werkstücks in bestimmten Lagebeziehungen stehen, sind entsprechende Toleranzen vorzuschreiben. Dazu dienen Lagetoleranzen, die Richtungs-, Orts- oder Lauftoleranzen darstellen und die geometrische Lage zweier oder mehrerer Elemente begrenzen, wobei i. Allg. ein Basiselement (Bezug) festgelegt ist (gekennzeichnet durch geschwärztes Dreieck).

Die Darstellung der Lagetoleranzen in der Zeichnung erfolgt ebenfalls durch Verwendung bestimmter Symbole, wie sie Tabelle 3.9 und Bild 3.9 zeigt. Für die Tolerierung der Mittigkeit ist dabei das Symbol „Symmetrietoleranz“ zu verwenden (**Bilder 3.10a bis c**). Gemäß (a) ist ein Versatz des oberen Ansatzes um 0,1 mm zu den unteren Kanten zulässig, bei (b) ein Versatz zu den

Bohrungen von 0,1 mm und nach (c) eine Unsymmetrie der Bohrungen von 0,1 mm zu den beiden Außenkanten.

3.2.1.5 Oberflächenrauheit und deren Kennzeichnung

Die geforderte Oberflächenrauheit an Werkstücken sowie die Maß-, Form- und Lagetoleranzen müssen sinnvoll aufeinander abgestimmt sein, da sie eng zusammenhängen.

Wichtige Begriffe für die Oberflächenrauheit sind **Bild 3.11** zu entnehmen. Die Rauheit ist innerhalb der Rauheitsbezugsstrecke definiert. Die Rauheitskenngrößen sind auf eine Rauheitsbezugslinie (Referenzlinie) bezogen. Als solche wird das mittlere Profil bzw. die mittlere quadratische Linie (Profil-Regressionslinie) verwendet.

Tabelle 3.10 Definitionen gebräuchlicher Rauheitskenngrößen (vgl. auch Bild 3.11)

Zehnpunktehöhe der Unregelmäßigkeiten R_z (arithmetischer Mittelwert der Absolutwerte der Höhen von fünf höchsten Profilsitzen und der Tiefen von fünf tiefsten Profiltälern innerhalb der Bezugsstrecke, R_z vermeidet einmalige Ausreißer als Messgröße; Messung unwirtschaftlich, statt dessen ist die gemittelte Raubtiefe R_z anzuwenden)
Arithmetischer Mittenrauhwert R_a (arithmetischer Mittelwert der Absolutwerte der Profilabweichungen y_i innerhalb der Bezugsstrecke)
Raubtiefe, maximale Profilhöhe R_y (Abstand zwischen der Spitzenlinie bzw. dem Spitzenprofil und der Grundlinie bzw. dem Grundprofil innerhalb der Bezugsstrecke); $R_y \triangleq R_{max}$
Quadratischer Mittenrauhwert R_q $R_q \approx 1,25 R_a$
Linie der Profilkuppen (eine Äquidistante zur mittleren Linie bzw. Regressionslinie m durch den höchsten Punkt des wirklichen Profils innerhalb der Bezugsstrecke)
Linie der Profiltäler (eine Äquidistante zur mittleren Linie bzw. Regressionslinie m durch den tiefsten Punkt des wirklichen Profils innerhalb der Bezugsstrecke)
Linie der kleinsten Abweichungsquadrate des Profils (Regressionslinie m); „Mittellinie“ (eine Rauheitsbezugslinie bzw. Referenzlinie, die die Form des Nennprofils, also des geometrisch idealen Profils hat und das wirkliche Profil so teilt, dass die Summe der Quadrate der Profilabweichungen von dieser Linie innerhalb der Bezugsstrecke minimal ist)

Tabelle 3.11 Zuordnung der Werte der Rauheit zur Bezugsstreckenlänge

Gemittelte Raubtiefe R_z in μm	bis 0,1	über 0,1 bis 0,5	über 0,5 bis 10	über 10 bis 50	über 50
Arithmetischer Mittenrauhwert R_a in μm	bis 0,02	über 0,02 bis 0,1	über 0,1 bis 2	über 2 bis 10	über 10
Einzelmessstrecke in mm	0,08	0,25	0,8	2,5	8
Gesamtmessstrecke in mm	0,4	1,25	4	12,5	40

Definitionen gebräuchlicher Rauheitskenngrößen enthält **Tabelle 3.10**. Für die Bezugsstrecke l der Rauheit ist eine Stufung nach **Tabelle 3.11** einzuhalten.

Rauheitsforderungen sind vorzugsweise durch Angabe des Zahlenwertes des arithmetischen Mittenrauhwertes R_a (in der Zeichnung ohne Kurzzeichen R_a) oder der gemittelten Raubtiefe R_z (mit Kurzzeichen R_z) festzulegen.

Zwischen den in Tabelle 3.10 aufgeführten Rauheitswerten R_z , R_a , R_y und R_t besteht keine exakte mathematische Beziehung. Beim Trennen mit geometrisch definierter Schneide gilt $R_a \approx 0,25 R_z$, mit nicht definierter Schneide $R_a \approx 0,125 R_z$ und in grober Näherung allgemein $R_a \approx 0,1 R_z$ und $R_t \approx R_z$.

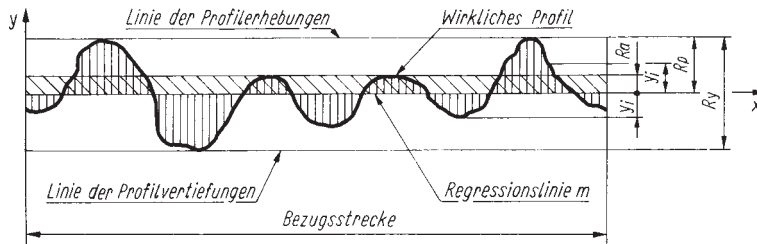


Bild 3.11 Bezugssystem für Oberflächenrauheit und Rauheitswerte

Der Oberflächenzustand des fertigen Werkstücks muss insgesamt aus der Zeichnung hervorgehen. Dessen Kennzeichnung erfolgt mit Symbolen nach **Tabelle 3.12a** und **Bild 3.12** und umfasst Angaben zur Rauheit der Oberfläche, zum anzuwendenden Bearbeitungsverfahren einschließlich des Verlaufs der Bearbeitungsspuren und der Rauheitsbezugsstrecke sowie zur Nachbehandlung durch Härten, Beschichten usw. (s. DIN EN ISO 1302).

Tabelle 3.12 Angabe der Oberflächenrauheit in Zeichnungen

a) Kennzeichnung von Oberflächen, nach DIN EN ISO 1302

1. Aufbau der Angaben zur Oberflächenrauheit

Bild	Stelle am Symbol	Angabe
	a	Kurzzeichen und Zahlenwert der Rauheitskenngröße
	b	Fertigungsverfahren und/oder andere zusätzliche Angaben
	c	Rauheitsbezugsstrecke
	d	Art und Lage der Bearbeitungsspuren

Anmerkungen:

1. Bei der Rauheitskenngröße R_a ist der Zahlenwert ohne Kurzzeichen anzugeben. 2. Angaben b , c und d sind nur in notwendigen Fällen anzugeben. 3. Die Eintragungslinie ist nur einzutragen, wenn die Angaben b und/oder c notwendig sind.

2. Symbole

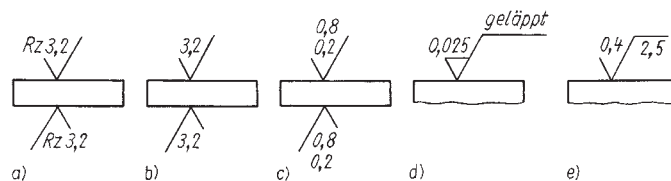
Symbol	Erklärung
✓	Symbol, wenn das Fertigungsverfahren freigestellt ist
✓	Symbol mit Dreieck, wenn die Oberfläche durch Trennen hergestellt werden muss
✓	Symbol mit Kreis, wenn die Oberfläche nicht durch Trennen hergestellt werden darf
✓	Symbol mit Kreis, wenn die Oberfläche im Lieferzustand verbleiben soll
(✓)	Symbol in Klammern, gilt als Hinweis auf Einzelangaben, wenn für die Oberflächenrauheit eine zusammenfassende Angabe (Sammelangabe) eingetragen ist
✓⊙	Symbol mit Ringsumzeichen, wenn die Rauheitsforderung am Umriss gleich ist
z✓	Symbol mit Kennbuchstaben, wenn die Angabe in den technischen Forderungen erklärt wird

3. Angabe der Rillenrichtung

Symbol	Erklärung
	Bearbeitungsspuren parallel zu der Linie, die die gekennzeichnete Oberfläche darstellt
	Bearbeitungsspuren rechtwinklig zu der Linie, die die gekennzeichnete Oberfläche darstellt
	Bearbeitungsspuren gekreuzt und geneigt zu der Linie, die die gekennzeichnete Oberfläche darstellt
	Bearbeitungsspuren in mehreren Richtungen verlaufend
	Bearbeitungsspuren ungefähr kreisförmig verlaufend, bezogen auf die Mitte der gekennzeichneten Oberfläche
	Bearbeitungsspuren ungefähr radial verlaufend, bezogen auf die Mitte der gekennzeichneten Oberfläche
	Bearbeitungsspuren punktförmig (z. B. nach elektroerosiver Metallbearbeitung)

Erläuterungen

Eingetragener Wert in μm gibt größten zulässigen Wert der Rauheitskenngröße an (Bild a). Bei Verwendung des Mittenrauhwerts entfällt Zeichen Ra (b). Wird kleinster zulässiger Wert der Rauheitskenngröße mit vorgeschrieben, ist dieser unter größtem zulässigem Wert einzutragen (c). Ist das Fertigungsverfahren nicht freigestellt, erfolgt zusätzliche Wortangabe (d). Weicht Rauheitsbezugsstrecke von Werten nach Tabelle 3.11 ab, erfolgt deren Angabe in mm (e).



b) Bisherige Oberflächenzeichen nach DIN 3141 (ungültig, Kennzeichnung nach DIN EN ISO 1302 verwenden); s. auch Tabelle 3.14

Oberflächenzeichen	Forderungen an Oberfläche; Richtwerte für größte zulässige gemittelte Rauhtiefe Rz
	größere Gleichmäßigkeit oder besseres Aussehen
	Rillen (Bearbeitungsspuren) dürfen mit bloßem Auge deutlich sichtbar sein; $Rz \approx 160 \mu\text{m}$
	Rillen dürfen mit bloßem Auge sichtbar sein; $Rz \approx 40 \mu\text{m}$
	Rillen dürfen mit bloßem Auge noch sichtbar sein; $Rz \approx 10 \mu\text{m}$
	Rillen dürfen mit bloßem Auge nicht mehr sichtbar sein; $Rz \approx 1 \mu\text{m}$

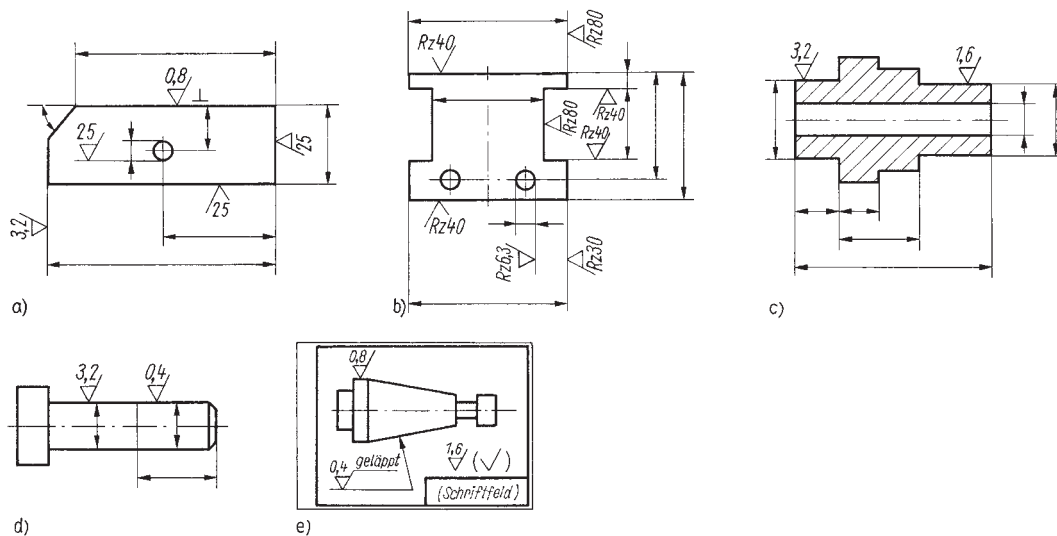


Bild 3.12 Kennzeichnung von Oberflächen (Regeln und Beispiele)

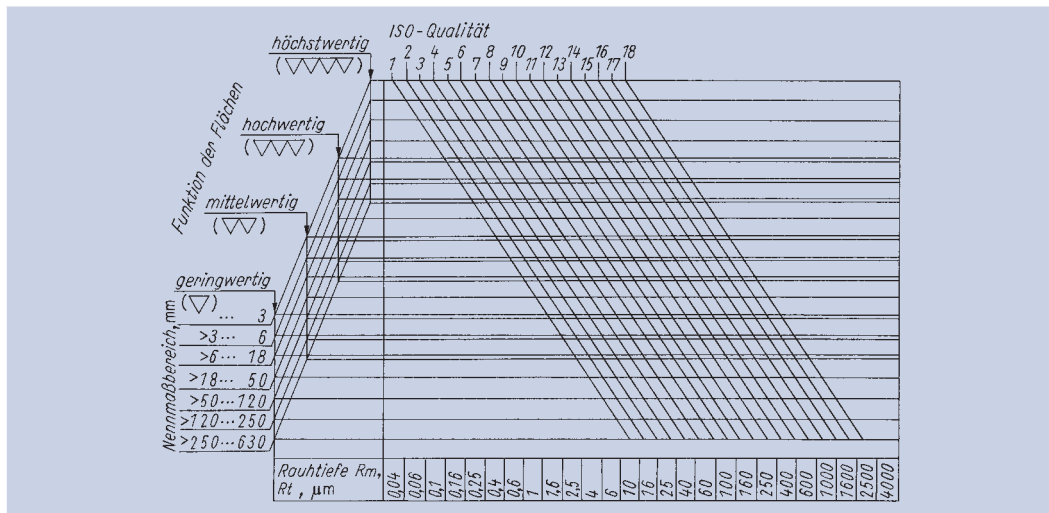
a) für jede zu kennzeichnende Oberfläche ist nur eine Angabe einzutragen; b) bei symmetrischen Teilen mit beiderseits gleichen Forderungen erfolgen Angaben nur an einer Seite; c) bei rotationssymmetrischen Teilen erfolgen Angaben an Mantellinie oder an Maßhilfslinie; d) Teile an Oberflächen sind durch Hilfslinien und Maße zu begrenzen; e) bei überwiegender Anzahl von Flächen mit gleicher Rauheitsforderung erfolgt eine Sammelangabe über Schriftfeld (ergänzt durch Symbol ohne Zahlenwert in Klammern als Hinweis auf eingetragene Einzelangaben)

Die qualitative Angabe der Rauheit durch Oberflächenzeichen nach Tabelle 3.12b und DIN 3141 genügt i. Allg. nicht mehr den gestiegenen Ansprüchen. Deshalb wurden die o.g. international abgestimmten Symbole in Verbindung mit quantitativen Forderungen eingeführt. Da vorhandene Zeichnungen nicht umgestellt werden, sind in Tabelle 3.12b zum Vergleich diese bisherigen Oberflächenzeichen zusätzlich dargestellt. Die Stufung der Zahlenwerte für Rauheitskenngrößen sowie die Abhängigkeit der erreichbaren Rauheit vom Fertigungsverfahren zeigen die **Tabellen 3.13 und 3.14**.

Tabelle 3.13 Stufung der Zahlenwerte für Rauheitskenngrößen sowie erreichbare gemittelte Rauhtiefe R_z und erreichbare Mittenrauhwerte R_a in Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren

Vorzugswerte für Stufung der Zahlenwerte der Rauheitsmeßgrößen in μm		
$N^1)$ R_a 0,006 0,012 0,025 0,05 0,1 0,2 0,4 0,8 1,6 3,2 6,3 12,5 25 50 $R_z, R_m,$ R_h, R_p R_z, R_t 0,05 0,1 0,2 0,4 0,8 1,6 3,2 6,3 12,5 25 50 100 200 400 1000		
Benennung	Erreichbare Werte R_a in μm	Erreichbare Werte R_z in μm
Urformen	Sandformgießen	
	Formmaskengießen	
	Kokillengießen	
	Druckgießen	
	Feingießen	
Umformen	Gesenkschmieden	
	Glattwalzen	
	Tiefziehen von Blechen	
	Fließpressen, Strangpressen	
	Prägen	
	Walzen von Formteilen	
	Schneiden	
	Längsdrehen	
	Plandrehen	
	Einstechdrehen	
Trennen	Hobeln	
	Stoßen	
	Schaben	
	Bohren	
	Aufbohren	
	Senken	
	Reiben	
	Umfangfräsen	
	Stirnfräsen	
	Räumen	
	Feilen	
	Rund-Längsschleifen	
	Rund-Planschleifen	
	Rund-Einstechschleifen	
	Flach-Umfangsschleifen	
	Flach-Stirnschleifen	
	Polierschleifen	
	Langhubhonen	
	Kurzhubhonen	
	Rundläppen	
	Flachläppen	
	Schwingläppen	
	Polierläppen	
	Strahlen	
	Trommeln	
	Brennschneiden	

¹⁾Vorzugsweise sind R_a oder R_z vorzuschreiben, internationale Rauheitsklassen N_1 bis N_{12} sind ebenso wie R_t zu vermeiden

Tabelle 3.14 Zusammenhang zwischen Rauhtiefe (R_m , R_t), Nennmaßgröße, ISO-Qualität und Funktion; nach Rockusch**Erläuterungen:**

Technische Oberflächen sind i. Allg. von der Funktion, die sie zu erfüllen haben, und von der Toleranz des Nennmaßes (ISO-Qualität) abhängig:

$$\text{Rauhtiefe } R_m, R_t = K i^m q^n;$$

K Funktionsabhängigkeit der Rauhtiefe,

i^m Nennmaßabhängigkeit der Rauhtiefe (i Toleranzeinheit),

q^n Toleranzabhängigkeit der Rauhtiefe (q Toleranzeinheitenfaktor, z. B. für IT 6 = 10 i , q = 10).

Die erzielbare Rauhtiefe hängt vom Bearbeitungsverfahren ab, das um so aufwendiger ist, je höher die Oberflächengüte gefordert wird. Man kann deshalb einen Zusammenhang zwischen Nennmaßbereich, Funktion, ISO-Qualität, Rauhtiefe und Bearbeitungsverfahren herstellen. Setzt man in obiger Beziehung $m = 1$, $n = 2/3$ und $K = 4$ für geringwertige Flächen (▽), $K = 1$ für mittelwertige Flächen (▽▽), $K = 0,25$ für hochwertigste Flächen (▽▽▽) und $K = 0,06 \dots$ für höchstwertigste Flächen (▽▽▽▽), so erhält man Zusammenhänge gemäß obigem Bild. Es ist z. B. zu erkennen, dass eine gedrehte Fläche mit Nennmaß 8 mm und hochwertiger Qualität (▽▽▽) bei IT 7 eine Rauhtiefe von $1,6 \mu m$ zulässt und als Bearbeitungsverfahren gemäß Tabelle 3.13 mit $R_m, R_t \approx R_z \approx 10 R_a$ z. B. Feinstdrehen erfordert.

(Zeichen ▽ bis ▽▽▽▽ sind nicht mehr anzuwenden)

3.2.2 Passungen [3.2.1] [3.2.8]

Unter Passungen sind die maßlichen Beziehungen zwischen gepaarten toleranzbehafteten Teilen zu verstehen (z. B. Passung einer Welle mit einer Bohrung). Man unterscheidet drei Passungsarten.

Spieelpassungen ergeben sich durch Paarung von Teilen mit Außenmaßen (z. B. Wellen), die stets kleiner sind als die Innenmaße (z. B. Bohrungen) der zugehörigen Teile. Die Differenz zwischen Innen- und Außenmaß wird Spiel genannt. Die Teile sind in jedem Fall gegeneinander beweglich.

Spielpassungen finden u. a. bei Lagern und Führungen Anwendung. Die Größe des Spiels ist von den funktionellen Forderungen abhängig, wobei die Länge der Passflächen, Umgebungseinflüsse (Temperatur usw.) und z. B. auch die Betriebsbedingungen (Drehzahl, Schmierung) von wesentlichem Einfluss sind.

Übermaßpassungen ergeben sich bei Paarung von Teilen mit Außenmaßen (z. B. Wellen), die vor dem Zusammenfügen immer größer sind als die Innenmaße (z. B. Bohrungen) der zugehörigen Teile. Die Differenz zwischen Innen- und Außenmaß heißt Übermaß. Nach dem Fügen sitzen die Teile mehr oder weniger fest ineinander. Dabei können sowohl elastische als auch plastische Verformungen auftreten. Sie werden auch als **Presspassungen** bezeichnet.

Nach der Art ihrer Erzeugung unterscheidet man *Längspresspassungen* (Ineinanderpressen der Teile, z. B. mittels einer Presse) und *Querpresspassungen* (Ausnutzung der Wärmedehnung, Dehn- oder Schrumpfpassungen).

Übergangspassungen sind die zwischen den Spiel- und Übermaßpassungen liegenden, weniger häufig vorkommenden Passungen. Bei ihnen kann Spiel oder Übermaß vorliegen, je nachdem, ob innerhalb der zugelassenen Toleranzgebiete kleinere Außenmaße mit größeren Innenmaßen oder größere Außenmaße mit kleineren Innenmaßen zusammentreffen. Ihr Fügungscharakter ist also im Gegensatz zu den anderen Passungen von den Istmaßen der gepaarten Teile abhängig. Bedeutung haben Übergangspassungen u. a. für Zentrierungen und Wälzlagerpassungen.

Passsysteme. Im ISO-Passsystem werden die theoretisch vielfältigen Möglichkeiten eingeschränkt und damit die Toleranzfeld-Kombinationen erheblich herabgesetzt. Zum einen sind für Außenmaße nur die Qualitäten (Grundtoleranzgrade) IT 4 bis IT 12 sowie für Innenmaße die Qualitäten IT 5 bis IT 12 zugelassen, und zum anderen muss das Toleranzfeld eines der Teile immer an der Nulllinie liegen. Es entstehen so die beiden Passsysteme **Einheitswelle** EW (mit h4 bis h12 für Wellentoleranzen) und **Einheitsbohrung** EB (mit H5 bis H12 für Bohrungstoleranzen), deren Passungscharakter jeweils durch die Wahl der Gegenstücktoleranzen festlegbar ist und die sinngemäß auch für Flachpassungen gelten (**Bilder 3.13 und 3.14**; s. auch Bild 3.1 und Abschnitt 3.2.2.2).

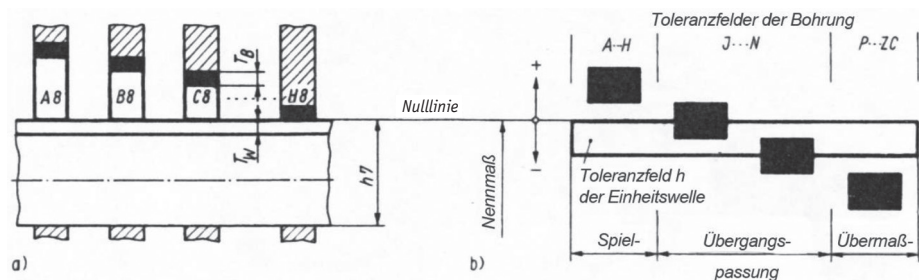
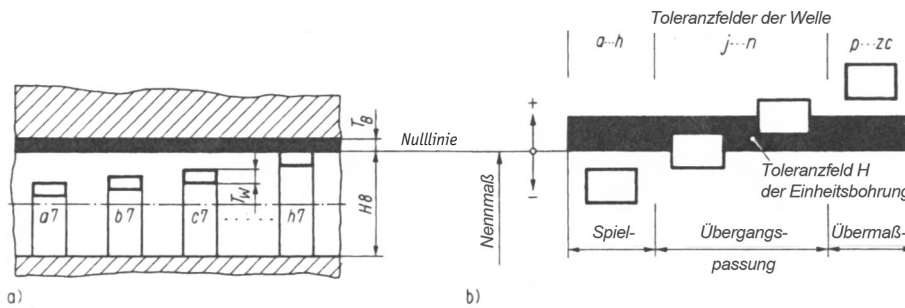


Bild 3.13 Passungsarten im System Einheitswelle

a) ausführliche Darstellung (hier für Spielpassungen); b) schematische Darstellung der Toleranzfelder

**Bild 3.14** Passungsarten im System Einheitsbohrung

a) ausführliche Darstellung (hier für Spielpassungen); b) schematische Darstellung der Toleranzfelder

3.2.2.1 Grundbegriffe

Als Bezeichnungen wurden eingeführt

W Welle G, g Größtmaß ES, es (A_o) oberes Abmaß T Toleranz
 B Bohrung K, k Kleinstmaß EI, ei (A_u) unteres Abmaß T_p Passtoleranz.

Aus **Bild 3.15** (System Einheitsbohrung mit Spiel-, Übergangs- und Übermaßpassungen) lassen sich folgende Beziehungen ableiten (vgl. auch Bild 3.1):

Spiel erhält man, wenn $K_B > G_W$:

$$\text{Größtspiel} \quad S_g = G_B - K_W = ES - ei (= A_{oB} - A_{uW}) \quad (3.2a)$$

$$\text{Kleinstspiel} \quad S_k = K_B - G_W = EI - es (= A_{uB} - A_{oW}) \quad (3.2b)$$

Übermaß liegt vor, wenn $G_B < K_W$:

$$\text{Größtübermaß} \quad U_g = G_W - K_B = es - EI (= A_{oW} - A_{uB}) \quad (3.3a)$$

$$\text{Kleinstübermaß} \quad U_k = K_W - G_B = ei - ES (= A_{uW} - A_{oB}) \quad (3.3b)$$

Für **Übergangspassungen** gilt:

$$\text{Größtspiel} \quad S_g = G_B - K_W = ES - ei (= A_{oB} - A_{uW}) \quad (3.4a)$$

$$\text{Größtübermaß} \quad U_g = G_W - K_B = es - EI (= A_{oW} - A_{uB}) \quad (3.4b)$$

Der Schwankungsbereich zwischen den jeweiligen Extremwerten wird bei allen Passungen **Passtoleranz** T_p genannt.

$$\text{Es gilt bei Spiel} \quad T_p = S_g - S_k \quad (3.5a)$$

$$\text{bei Übermaß} \quad T_p = U_g - U_k \quad (3.5b)$$

$$\text{bei Übergang} \quad T_p = S_g + U_g \quad (3.5c)$$

Für alle Passungsarten gilt außerdem die Kontrollgleichung

$$T_P = T_W + T_B. \quad (3.6)$$

Da die Passtoleranz T_P durch Größe und Lage eindeutig festgelegt ist, lässt sich jeweils ein Passtoleranzfeld angeben (Passtoleranzschaubild mit Bezugslinie $S_k = U_k = 0$, **Bild 3.16**). Der Charakter einer Passung wird im Allgemeinen, insbesondere wenn die zu paarenden Bauteile in großen Stückzahlen zu fertigen sind, durch den arithmetischen Mittelwert aus den Größt- und den Kleinstwerten oder die Differenz der Toleranzmittenmaße C [1.2] gekennzeichnet, wobei gilt:

$$\text{mittleres Spiel} \quad S_m = \frac{S_g + S_k}{2} = C_B - C_W; \quad (3.7)$$

$$\text{mittleres Übermaß} \quad U_m = \frac{U_g + U_k}{2} = C_W - C_B; \quad (3.8)$$

$$\text{für Übergangspassung} \quad S_m = \frac{S_g - U_g}{2} = C_B - C_W; \quad (3.9a)$$

$$U_m = \frac{U_g - S_g}{2} = C_W - C_B. \quad (3.9b)$$

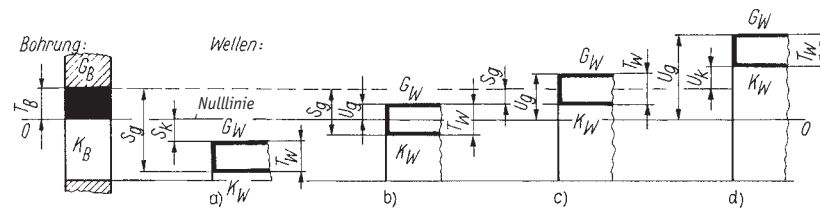


Bild 3.15 Bezeichnungen bei Passungen

a) Spiel; b), c) Übergangs-; d) Übermaßpassungen (bei b) $S_m > 0$; bei c) $U_m > 0$)

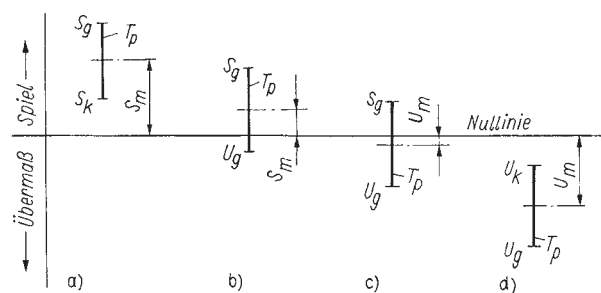


Bild 3.16 Passtoleranzfelder nach DIN EN ISO 286

a) Spiel; b), c) Übergangs-; d) Übermaßpassung (bei b) $S_m > 0$; bei c) $U_m > 0$)

Tabelle 3.15 Empfohlene Passungen und Vorzugspassungen*) (Spiele und Übermaße) nach DIN EN ISO 286 – hier feinere Stufung der Nennmaßbereiche (Auswahl bis 180 mm); *) bisher in DIN 7154 und DIN 7155; Abmaße in μm

Passung →	Übermaßpassungen				Übergangspassungen					
↓ Nennmaßbereich mm	$\frac{H7*}{s6}$	$\frac{H7*}{r6}$	$\frac{H7}{p6}$	$\frac{P7}{h6}$	$\frac{H7*}{n6}$	$\frac{H7*}{k6}$	$\frac{H7*}{j6}$	$\frac{J7}{h6}$	$\frac{K7}{h6}$	$\frac{N7}{h6}$
von 1 bis 3	-4 -20	0 -16	+4 -12	0 -16	+6 -10	+10 -6	+12 -4	+10 -6	+6 -10	+2 -14
über 3 bis 6	-7 -27	-3 -23	0 -20	0 -20	+4 -16	+11 -9	+14 -6	+14 -6	+11 -9	+4 -16
über 6 bis 10	-8 -32	-4 -28	0 -24	0 -24	+5 -19	+14 -10	+17 -7	+17 -7	+14 -10	+5 -19
über 10 bis 14	-10 -39	-5 -34	0 -29	0 -29	+6 -23	+17 -12	+21 -8	+21 -8	+17 -12	+6 -23
über 14 bis 18	-10 -39	-5 -34	0 -29	0 -29	+6 -23	+17 -12	+21 -8	+21 -8	+17 -12	+6 -23
über 18 bis 24	-14 -48	-7 -41	-1 -35	-1 -35	+6 -28	+19 -15	+25 -9	+25 -9	+19 -15	+6 -28
über 24 bis 30	-14 -48	-7 -41	-1 -35	-1 -35	+6 -28	+19 -15	+25 -9	+25 -9	+19 -15	+6 -28
über 30 bis 40	-18 -59	-9 -50	-1 -42	-1 -42	+8 -33	+23 -18	+30 -11	+30 -11	+23 -18	+8 -33
über 40 bis 50	-18 -59	-9 -50	-1 -42	-1 -42	+8 -33	+23 -18	+30 -11	+30 -11	+23 -18	+8 -33
über 50 bis 65	-23 -72	-11 -60	-2 -51	-2 -51	+10 -39	+28 -21	+37 -12	+37 -12	+28 -21	+10 -39
über 65 bis 80	-29 -78	-13 -62	-2 -51	-2 -51	+10 -39	+28 -21	+37 -12	+37 -12	+28 -21	+10 -39
über 80 bis 100	-36 -93	-16 -73	-2 -59	-2 -59	+12 -45	+32 -25	+44 -13	+44 -13	+32 -25	+12 -45
über 100 bis 120	-44 -101	-19 -76	-2 -59	-2 -59	+12 -45	+32 -25	+44 -13	+44 -13	+32 -25	+12 -45
über 120 bis 140	-52 -117	-23 -88	-3 -68	-3 -68	+13 -52	+37 -28	+51 -14	+51 -14	+37 -28	+13 -52
über 140 bis 160	-60 -125	-25 -90	-3 -68	-3 -68	+13 -52	+37 -28	+51 -14	+51 -14	+37 -28	+13 -52
über 160 bis 180	-68 -133	-28 -93	-3 -68	-3 -68	+13 -52	+37 -28	+51 -14	+51 -14	+37 -28	+13 -52

Tabelle 3.15 Empfohlene Passungen und Vorzugspassungen*) (Spiele und Übermaße) nach DIN EN ISO 286 – hier feinere Stufung der Nennmaßbereiche (Auswahl bis 180 mm); *) bisher in DIN 7154 und DIN 7155; Abmaße in μm (Fortsetzung)

	Spielpassungen										
↓ Nennmaßbereich mm	$\frac{H7*)}{h6}$	$\frac{H7*)}{g6}$	$\frac{H7*)}{f7}$	$\frac{F8*)}{h6}$	$\frac{H8*)}{f7}$	$\frac{H8*)}{e8}$	$\frac{F8*)}{h9}$	$\frac{H8*)}{d9}$	$\frac{H9}{d10}$	$\frac{H11*)}{d9}$	$\frac{H11*)}{h11}$
von 1 bis 3	+16 0	+18 +2	+26 +6	+26 +6	+30 +6	+42 +14	+45 +6	+59 +20	+85 +20	+105 +20	+120 0
über 3 bis 6	+20 0	+24 +4	+34 +10	+36 +10	+40 +10	+56 +20	+58 +10	+78 +30	+108 +30	+135 +30	+150 0
über 6 bis 10	+24 0	+29 +5	+43 +13	+44 +13	+50 +13	+69 +25	+71 +13	+98 +40	+134 +40	+166 +40	+180 0
über 10 bis 14	+29 0	+35 +6	+52 +16	+54 +16	+61 +16	+86 +32	+86 +16	+120 +50	+163 +50	+203 +50	+220 0
über 14 bis 18	+29 0	+35 +6	+52 +16	+54 +16	+61 +16	+86 +32	+86 +16	+120 +50	+163 +50	+203 +50	+220 0
über 18 bis 24	+34 0	+41 +7	+62 +20	+66 +20	+74 +20	+106 +40	+105 +20	+150 +65	+201 +65	+247 +65	+260 0
über 24 bis 30	+34 0	+41 +7	+62 +20	+66 +20	+74 +20	+106 +40	+105 +20	+150 +65	+201 +65	+247 +65	+260 0
über 30 bis 40	+41 0	+50 +9	+75 +25	+80 +25	+89 +25	+128 +50	+126 +25	+181 +80	+242 +80	+302 +80	+320 0
über 40 bis 50	+41 0	+50 +9	+75 +25	+80 +25	+89 +25	+128 +50	+126 +25	+181 +80	+242 +80	+302 +80	+320 0
über 50 bis 65	+49 0	+59 +10	+90 +30	+95 +30	+106 +30	+152 +60	+150 +30	+220 +100	+294 +100	+364 +100	+380 0
über 65 bis 80	+49 0	+59 +10	+90 +30	+95 +30	+106 +30	+152 +60	+150 +30	+220 +100	+294 +100	+364 +100	+380 0
über 80 bis 100	+57 0	+69 +12	+106 +36	+112 +36	+125 +36	+180 +72	+177 +36	+261 +120	+347 +120	+427 +120	+440 0
über 100 bis 120	+57 0	+69 +12	+106 +36	+112 +36	+125 +36	+180 +72	+177 +36	+261 +120	+347 +120	+427 +120	+440 0
über 120 bis 140	+65 0	+79 +14	+123 +43	+131 +43	+146 +43	+211 +85	+206 +43	+308 +145	+405 +145	+495 +145	+500 0
über 140 bis 160	+65 0	+79 +14	+123 +43	+131 +43	+146 +43	+211 +85	+206 +43	+308 +145	+405 +145	+495 +145	+500 0
über 160 bis 180	+65 0	+79 +14	+123 +43	+131 +43	+146 +43	+211 +85	+206 +43	+308 +145	+405 +145	+495 +145	+500 0

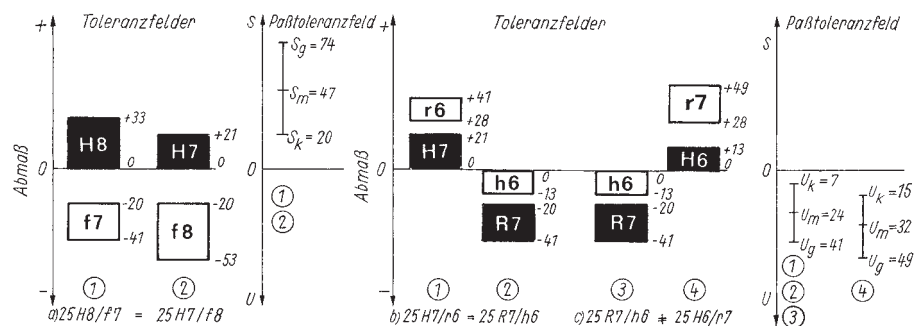


Bild 3.17 Gleichnamige Passungen [3.2.1]

a) Spielpassung ($25\text{ H}8/\text{f}7 = 25\text{ H}7/\text{f}8$); Übermaßpassung ($25\text{ H}7/\text{r}6 = 25\text{ R}7/\text{h}6$); ungleiche Übermaßpassung ($25\text{ R}7/\text{h}6 \neq 25\text{ H}6/\text{r}7$); Abmaße, Spiele S und Übermaße U in μm