

Werner Krause

Mit einem
Anhang
Technisches
Zeichnen

Grundlagen der Konstruktion

Elektronik – Elektrotechnik –
Feinwerktechnik – Mechatronik



10., aktualisierte Auflage

HANSER

Krause

Grundlagen der Konstruktion

Grundlagen der Konstruktion

Elektronik • Elektrotechnik •
Feinwerktechnik • Mechatronik

Herausgegeben von
Werner Krause

10., aktualisierte Auflage
mit 350 Bildern und 67 Tafeln
sowie einem Anhang Technisches Zeichnen

HANSER

Federführung und Gesamtkonzeption:

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

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design der Technischen Universität Dresden

Autoren

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

Prof. Dr.-Ing. Dr. paed. Alfons Holfeld (†)

Prof. Dr.-Ing. Günter Röhrs

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design der Technischen Universität Dresden

unter Mitarbeit von

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Höhne (Abschnitt 1)

Doz. Dr.-Ing. habil. Manfred Meissner (Abschnitt 2.1)

Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion der Technischen Universität Ilmenau

sowie zum Anhang Technisches Zeichnen von

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Thomas Nagel

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

Dipl.-Ing. (FH) Iris Bönisch

Dr.-Ing. Frank Reifegerste

Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design der Technischen Universität Dresden

Dr.-Ing. Gunhild Chilian

Heidi König

Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion der Technischen Universität Ilmenau

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

ISBN 978-3-446-45470-5

E-Book-ISBN 978-3-446-45569-6

© 2018 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Katrin Wulst

Titelillustration: Frank Wohlgemuth, Hamburg

Einbandrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Binden: Hubert&Co, Göttingen

Printed in Germany

Vorwort

Das Erzeugnisspektrum in Elektronik, Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Mechatronik umfaßt Maschinen, Geräte und Anlagen für die Erzeugung, Übertragung und Anwendung von Elektroenergie sowie die informationsübertragenden Baugruppen, Geräte und Anlagen der Nachrichten-, Meß- und Automatisierungstechnik, der Datenverarbeitung und Rechentechnik sowie der Feinmechanik und Optik. Diese Erzeugnisse werden aus mechanischen, elektrischen, elektronischen und optischen Bauelementen und Funktionsgruppen aufgebaut. Das Spektrum reicht von hochkomplizierten Anlagen, vielfach in einmaliger Spezialausführung hergestellt, bis zu Produkten der Konsumgüterindustrie, deren hoher Bedarf meist nur durch Anwendung spezieller und ausgereifter Verfahren der Massenfertigung gedeckt werden kann.

Auf dem Gebiet der Elektrotechnik, z. B. im Elektromaschinenbau, steht dabei vielfach die Leistungsübertragung im Vordergrund, die mit möglichst hohem Wirkungsgrad erfolgen soll. In der Elektronik und Feinwerktechnik dagegen müssen vorwiegend Informationen der verschiedensten Art erfaßt, gespeichert, verarbeitet oder zur Aufnahme durch den Menschen aufbereitet werden, wobei hohe Arbeitsgeschwindigkeiten und zugleich große Genauigkeiten z. B. bei der Einhaltung vorgegebener Übertragungsfunktionen erforderlich sind. Darüber hinaus wird bei allen Erzeugnissen dieser Fachgebiete gesteigerte Leistungsfähigkeit sowie erhöhte Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Umweltfreundlichkeit unter Wahrung wirtschaftlicher Aspekte gefordert. Die Tendenz geht dahin, die informationsverarbeitenden Funktionsgruppen unter Verwendung mikroelektronischer Bausteine zu realisieren und mechanische durch elektronische Prinzipie überall dort abzulösen, wo es funktionell und ökonomisch vorteilhaft ist. An der Geräteperipherie werden dagegen in zunehmendem Maße leistungsfähige mechanische und elektromechanische Baugruppen benötigt.

In der Konstruktion ist man bestrebt, durch eine sichere Beherrschung mechanischer Konstruktionselemente und mit Hilfe neuer konstruktiver Lösungen mit dieser Entwicklung Schritt zu halten. Deshalb müssen sowohl Ingenieure für Technische Kybernetik und Automatisierungstechnik, Elektrotechnik, Informationstechnik, elektronische Bauelemente und Informationsverarbeitung als auch Betriebswirtschaftler, Arbeitswissenschaftler und Berufspädagogen ebenso wie die Konstrukteure und Technologen der Elektronik, Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Mechatronik im Studium eine vertiefte Konstruktionsausbildung erhalten. Sie soll dazu befähigen, Maschinen, Geräte und Anlagen schnell verstehen, mitentwickeln, aufbauen und anwenden zu können.

Seit seinem Erscheinen hat das Lehrbuch in Lehre und Praxis ein weithin positives Echo gefunden, so daß auch die 6. Auflage in kurzer Zeit vergriffen war. Dieser Umstand erklärt sich aus der Tatsache, daß das Buch auf die Grundstudienpläne der Studiengänge Elektrotechnik und Mechatronik zugeschnitten ist und damit den Bedürfnissen der Hoch- und Fachhochschulausbildung vieler Studenten dieser Studiengänge und angrenzender Studienrichtungen unmittelbar entspricht. Es wird an vielen Bildungseinrichtungen im Zusammenhang mit der notwendigen effektiveren Gestaltung von Vorlesungen und Übungen genutzt und ist zugleich zur Intensivierung des Selbststudiums gut geeignet.

Ein weiterer Grund für die anhaltende Nachfrage ist aber sicherlich darin zu suchen, daß die übersichtliche und z. T. katalogartige Aufbereitung des Stoffes sowie die zahlreichen tabellarisch geordneten Fakten auch dem in der Praxis tätigen Ingenieur als Orientierung und Wissensspeicher dienen.

Da für datenintensive und wiederkehrende Routinearbeiten verstärkt Rechentechnik zum Einsatz kommt, wurde bereits in der 6. Auflage ein Abschnitt zum rechnerunterstützten Konstruieren (CAD) aufgenommen und außerdem das automatisierungsgerechte Gestalten von Konstruktionselementen berücksichtigt. Weitere Erkenntnisse zur Systematisierung dieser Elemente zwangen dazu, die Gebiete der mechanischen Verbindungselemente und -verfahren sowie der Lager neu und damit eindeutiger als bisher zu ordnen.

In der 7. Auflage fanden zudem jüngste Ergebnisse der internationalen Normung z. B. auf dem Gebiet der Toleranzen und Passungen sowie Fortschritte bei der Dimensionierung und Tragfähigkeitsberechnung von mechanischen Verbindungen und Funktionselementen, u. a. von Zahnrädern, Berücksichtigung. Die Literaturangaben wurden generell erneuert; dank vielfältiger Lehrer Erfahrungen gelang es, eine Reihe von Ergänzungen und methodisch verbesserten Darstellungen einzuarbeiten, so daß die Ausführungen dem neuesten Stand der Technik und den Erfordernissen einer modernen Ausbildung entsprechen.

Diese 7. Auflage trug vor allem aber auch 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. In der 2002 erschienenen 8. Auflage erfolgten einige inhaltliche Erweiterungen, so unter anderem zum rechnerunterstützten Konstruieren und Simultaneous Engineering, zur Outsert-Technik, zu Federlagern und zu Zahnriemengetrieben. Sie war nun ebenfalls vergriffen, so daß sich Verlag und Herausgeber im Jahr 2012 zu einer vollständig überarbeiteten 9. Auflage entschlossen hatten. Dabei wurden das Kapitel zum konstruktiven Entwicklungsprozeß neu bearbeitet und alle weiteren Gebiete unter Beachtung der europäischen EN-Normen aktualisiert. Dies führte bei den Werkstoffangaben, bei Löt- und Klebverbindungen sowie bei Federn, Gleitlagern und Zahnrädern zu wesentlichen inhaltlichen Veränderungen. Aber auch die Ausführungen zu einer ganzen Reihe von Verbindungselementen und zu Zahnriemengetrieben waren an diese Normen anzupassen. Darüber hinaus gelang es, dank vielfältiger Erfahrungen beim Einsatz des Buches in Lehre und Praxis sowie unter Beachtung neuer VDI/VDE-Richtlinien inhaltliche Ergänzungen zur Berechnung und Gestaltung von Konstruktionselementen einzuarbeiten. Zudem wurde das Literaturverzeichnis auf den aktuellen Stand gebracht.

Hochschullehrer regten außerdem an, den Untertitel auf die Mechatronik auszudehnen, da das Buch auch von Studenten dieser Ausbildungsrichtung gern genutzt wird, und einen Anhang zum Grundwissen des Technischen Zeichnens beizufügen mit dem Hinweis darauf, daß dieses Gebiet leider kaum noch in den Lehrplänen zu finden ist.

In der nunmehr vorliegenden 10., aktualisierten Auflage erfolgten inhaltliche Ergänzungen, wobei neue oder überarbeitete Normen und Richtlinien Berücksichtigung fanden, so unter anderem bei der Kennzeichnung der Oberflächenrauheit und der Beschriftung elektronischer Bauelemente. Leider wurden aber inzwischen auch seit Langem in der Feinwerktechnik geltende DIN-Normen zu Toleranzen und Passungen sowie zu Stirnradgetrieben der Feinwerktechnik zurückgezogen, ohne daß es Nachfolgedokumente gibt. Es war deshalb erforderlich, die zugehörigen Abschnitte diesen Änderungen anzupassen. Außerdem wurden eine Reihe von Bildern gemäß aktueller Regeln zum Technischen Zeichnen korrigiert sowie auch die Literaturangaben am Ende des Buches bezüglich neuer Auflagen bzw. neu erschienener Bücher nochmals überarbeitet.

Allen Autoren danke ich für die bewährte kollegiale Zusammenarbeit bei der Vorbereitung dieser 10. Auflage. Ihre schnelle Herausgabe konnte im Ergebnis vielfältiger Bemühungen des Carl Hanser Verlages erfolgen, dem mein besonderer Dank gilt.

Inhaltsverzeichnis

1	Der konstruktive Entwicklungsprozeß	13
1.1	Stellung der Konstruktion im Produktlebenszyklus	13
1.2	Ablauf und Methoden des Konstruierens	14
1.3	Rechnerunterstütztes Konstruieren – CAD	19
2	Grundlagen der Konstruktionsarbeit	23
2.1	Gestalten von Bauteilen	23
2.1.1	Gestaltungsgrundsätze	23
2.1.2	Festlegen der Bauteilgestalt	24
2.1.2.1	Bauteilform	24
2.1.2.2	Werkstoff und Herstellung	26
2.1.2.3	Bauteilzustand	26
2.1.3	Regeln, Prinzipien und Einflüsse	26
2.1.4	Arbeitsschritte beim Gestalten	30
2.2	Normzahlen und Normmaße	31
2.3	Toleranzen und Passungen	32
2.3.1	Toleranzen	32
2.3.2	Passungen	41
2.3.3	Maß- und Toleranzketten	46
2.3.3.1	Maximum-Minimum-Methode	47
2.3.3.2	Wahrscheinlichkeitstheoretische Methode	49
2.3.4	Toleranz- und passungsgerechtes Gestalten	50
2.4	Werkstoffwahl	51
2.5	Aufgaben und Lösungen zu Abschnitt 2	55
3	Statik und Festigkeitslehre	60
3.1	Einführung	60
3.2	Statik	60
3.2.1	Kräfte an starren Körpern	61
3.2.2	Ebenes zentrales Kraftsystem	63
3.2.3	Ebenes allgemeines Kraftsystem	64
3.2.4	Kräftepaar und Moment	65
3.2.5	Gleichgewichtsbedingungen	66
3.2.6	Standsicherheit	66
3.2.7	Bestimmung der Auflagergrößen (Auflagerreaktionen)	67
3.2.8	Schnittreaktionen	69
3.3	Festigkeitslehre	71
3.3.1	Grundbegriffe	71

3.3.2	Ermittlung der Nennspannungen	74
3.3.2.1	Beanspruchung durch Kräfte	74
3.3.2.2	Beanspruchung durch Momente	78
3.3.2.3	Zusammengesetzte Beanspruchung	83
3.3.3	Ermittlung der zulässigen Spannungen	84
3.3.3.1	Werkstoffkenngrößen	84
3.3.3.2	Festigkeitsnachweis	86
3.4	Aufgaben und Lösungen zu Abschnitt 3	87
4	Mechanische Verbindungselemente und -verfahren	91
4.1	Stoffschlüssige Verbindungen	91
4.1.1	Schweißverbindungen	91
4.1.2	Lötverbindungen	97
4.1.3	Klebverbindungen	101
4.1.4	Kittverbindungen	102
4.2	Formschlüssige Verbindungen	103
4.2.1	Nietverbindungen	103
4.2.2	Stift- und Keilverbindungen	106
4.2.3	Feder- und Profilwellenverbindungen	109
4.2.4	Verbindungen durch Bördeln, Sicken, Falzen, Einrollen, Lappen, Schränken und Blechsteppen	111
4.2.5	Spreizverbindungen	113
4.2.6	Einbettverbindungen	114
4.3	Kraftschlüssige Verbindungen	115
4.3.1	Preßverbindungen (Preßverbände)	115
4.3.2	Schraubenverbindungen	119
4.3.3	Klemmverbindungen	130
5	Elektrische Leitungsverbindungen	132
5.1	Funktion und Aufbau	132
5.2	Leitungselemente	132
5.3	Verbindungselemente und -verfahren	135
5.3.1	Stoffschlüssige Verbindungen	135
5.3.2	Kraftschlüssige Verbindungen	135
5.4	Verdrahtungen	137
5.4.1	Klassifikation	137
5.4.2	Kabelverdrahtung	137
5.4.3	Flachverdrahtung	138
5.4.4	Freiverdrahtung	139
5.5	Aufgaben und Lösungen zu den Abschnitten 4 und 5	143
6	Federn	147
6.1	Grundbegriffe, Federkennlinien	147
6.2	Federwerkstoffe	149
6.3	Berechnung der Einzelfeder	149
6.3.1	Grundlagen	149

6.3.2	Biegefedern	150
6.3.3	Torsionsfedern	154
6.4	Federsysteme	156
6.4.1	Reihenschaltung von Federn	156
6.4.2	Parallelschaltung von Federn	157
6.5	Tellerfedern	157
6.6	Gummifedern	158
6.7	Bimetallfedern (Thermobimetalle)	159
6.8	Aufgaben und Lösungen zu Abschnitt 6	161
7	Achsen und Wellen	163
7.1	Beanspruchungen	163
7.2	Entwurfsberechnung	163
7.2.1	Überschlägliche Bestimmung des Achsendurchmessers	163
7.2.2	Überschlägliche Bestimmung des Wellendurchmessers	164
7.3	Nachrechnung	164
7.3.1	Nachrechnung der vorhandenen Spannungen	165
7.3.2	Nachrechnung der Verformung	167
7.3.3	Schwingungsberechnung	168
7.4	Werkstoffwahl und konstruktive Gestaltung	170
7.5	Aufgaben und Lösungen zu Abschnitt 7	170
8	Lager	173
8.1	Gleitlager	174
8.1.1	Gleitreibung	174
8.1.2	Berechnung und Konstruktion der Gleitlager	176
8.1.2.1	Verschleißlager	176
8.1.2.2	Hydrodynamische Gleitlager	178
8.1.3	Werkstoffwahl	182
8.1.4	Schmierung	185
8.1.5	Sinterlager	187
8.1.6	Steinlager	188
8.1.7	Spitzenlager	188
8.1.8	Stoßsicherungen	190
8.2	Wälzlager	191
8.2.1	Rollreibung	191
8.2.2	Aufbau und Eigenschaften der Wälzlager	191
8.2.3	Ausführungsformen der Wälzlager und ihre Anwendung	194
8.2.4	Miniaturwälzlager	195
8.2.5	Berechnung der Wälzlager	196
8.2.6	Einbau von Wälzlagern	199
8.2.7	Schneidenlager	201
8.3	Federlager	203

9	Geradführungen	204
9.1	Gleitführungen	204
9.2	Wälzführungen	206
9.3	Federführungen	207
9.4	Aufgaben und Lösungen zu den Abschnitten 8 und 9	208
10	Kupplungen	211
10.1	Feste Kupplungen	211
10.2	Ausgleichskupplungen	212
10.3	Schaltkupplungen	217
10.3.1	Schaltbare Kupplungen	217
10.3.2	Selbstschaltende Kupplungen	221
10.4	Aufgaben und Lösungen zu Abschnitt 10	223
11	Zahnrad- und Zugmittelgetriebe	225
11.1	Einteilung der Getriebearten	225
11.2	Zahnradgetriebe – Übersicht	227
11.2.1	Einteilung nach der Gestellanordnung der Räder	227
11.2.2	Einteilung nach der Anzahl der Übersetzungsstufen	227
11.2.3	Einteilung nach Lage der Achsen und geometrischer Grundform der Radkörper	228
11.3	Zahnräder	229
11.3.1	Grundgesetze der Verzahnung	229
11.3.2	Bezeichnungen und Bestimmungsgrößen an Zahnrädern	229
11.3.3	Profilformen	231
11.3.4	Stirnräder mit Evolventengeradverzahnung	231
11.3.4.1	Die Evolvente	231
11.3.4.2	Bezugsprofil und Verzahnungsgrößen	232
11.3.4.3	Eingriffsverhältnisse und Profilüberdeckung	233
11.3.4.4	Herstellung der Zahnräder	234
11.3.4.5	Unterschnitt und Grenzzähnezahl	235
11.3.4.6	Profilverschiebung	235
11.3.4.7	Verzahnungstoleranzen, Getriebepassungen	238
11.3.5	Stirnräder mit Evolventenschrägverzahnung	239
11.3.6	Tragfähigkeitsberechnung	241
11.3.6.1	Zahnkräfte	242
11.3.6.2	Entwurfsberechnung	242
11.3.6.3	Nachrechnung der Zahnfußtragfähigkeit	243
11.3.6.4	Nachrechnung der Zahnflankentragfähigkeit	245
11.3.6.5	Berechnung von Kunststoffzahnrädern	247
11.3.7	Werkstoffwahl	248
11.3.8	Konstruktive Gestaltung und Schmierung	249
11.4	Bauformen der Zahnradgetriebe	252
11.4.1	Stirnradgetriebe	252
11.4.2	Kegelradgetriebe	254

11.4.3	Schneckengetriebe	255
11.4.4	Schraubenstirnradgetriebe	255
11.5	Zugmittelgetriebe	256
11.5.1	Zugmittelgetriebe mit Kraftpaarung (Schnur-, Band-, Flachriemen- und Keilriemengetriebe)	257
11.5.2	Zugmittelgetriebe mit Formpaarung (Zahnriemen- und Kettengertriebe)	260
11.6	Aufgaben und Lösungen zu Abschnitt 11	263
A	Anhang Technisches Zeichnen	267
A1	Aufbau und Bestandteile eines Zeichnungssatzes	269
A2	Projektionsarten und Anordnung von Ansichten	273
A3	Darstellung von Schnitten	275
A4	Allgemeine Richtlinien für die Bemaßung	280
A5	Bemaßung von Konstruktions- und Formelementen	287
A6	Stromlaufpläne	304
A7	Beschriftung elektronischer Bauelemente	309
A8	E-Reihen	315
	Literaturverzeichnis	316
	Sachwörterverzeichnis	322

1 Der konstruktive Entwicklungsprozeß

Zu den Grundlagen der Konstruktion gehören neben dem Wissen über den Aufbau und die Wirkungsweise technischer Produkte Kenntnisse zum methodischen Vorgehen beim Konstruieren einschließlich des Einsatzes effektiver Hilfsmittel.

Die Bearbeitung von Konstruktionsaufgaben ist ein gedanklicher Prozeß, der in Abhängigkeit von der Komplexität des zu entwickelnden Produktes eine disziplinübergreifende Zusammenarbeit von Fachleuten der Feinwerktechnik, Mechatronik, Optik, Werkstofftechnik, Betriebswirtschaft u. a. erfordert. Der konstruktive Entwicklungsprozeß kann durch eine zweckmäßige Gliederung in Arbeitsschritte, Verwendung bewährter Vorschriften und Regeln sowie durch Einsatz der Rechentechnik rationell gestaltet werden. Der fachlichen Ausrichtung des Buches folgend, beschreibt dieser Abschnitt konstruktionswissenschaftliche Grundlagen sowie ausgewählte Methoden und gibt Hinweise zur rechnerunterstützten Konstruktion, bezogen auf mechanische Funktionselemente.

1.1 Stellung der Konstruktion im Produktlebenszyklus

Der Lebenszyklus (Lebenslauf, Lebensweg) eines Produktes (engl.: Product Life Cycle) umfaßt alle Phasen der Existenz des Produktes (**Bild 1.1**), beginnend mit der ersten Idee in der Planungsphase bis zu seiner Verwertung durch Recycling oder Entsorgung [1.1].

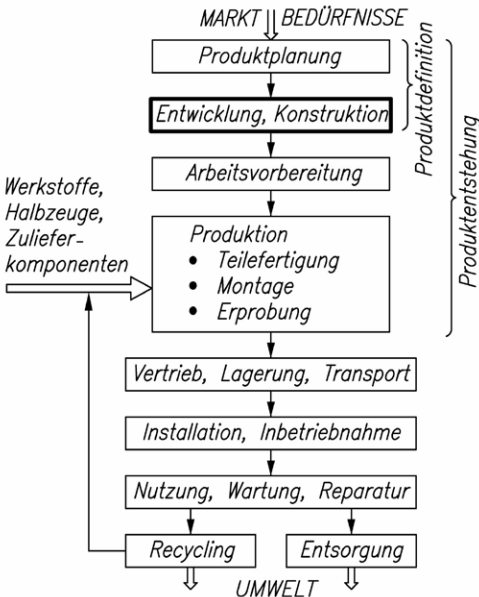


Bild 1.1 Der Lebenszyklus eines technischen Produktes

Konstruktionsaufgaben entspringen gesellschaftlichen Bedürfnissen, die sich am Markt zeigen. Produktplanung, Entwicklung und Konstruktion legen alle entscheidenden Eigenschaften des zukünftigen Produktes fest (Produktdefinition). Sie liefern die notwendigen Unterlagen bzw. Daten für die Vorbereitung und Durchführung der Produktion und alle nachfolgenden Phasen in seinem Lebenszyklus.

In dieser Schlüsselstellung bestimmt der Konstrukteur mit seinem Ergebnis den Gebrauchswert des Erzeugnisses und legt 75 % der Gesamtkosten fest. Nur in dem Maße, wie es ihm gelingt, die vielfältigen und z. T. widersprüchlichen Forderungen aus allen Lebensphasen des gewünschten Produktes technisch umzusetzen, wird das angestrebte Ziel erreicht.

1.2 Ablauf und Methoden des Konstruierens

[3] [12] [1.1] bis [1.13]

Das Ergebnis des Konstruierens ist die Konstruktionsdokumentation. Sie umfaßt technische Zeichnungen, Stücklisten, Anleitungen für Montage, Justierung, Prüfung, Inbetriebnahme u. a. (s. auch Anhang „Technisches Zeichnen“). Diese erzeugt man heute meist in elektronischer Form. Das Vorgehen beim Konstruieren wird maßgeblich von den Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes selbst bestimmt. Die schrittweise Analyse eines Produktes liefert somit die Informationen, die beim Konstruieren in geeigneter Reihenfolge zu erarbeiten sind (**Tafel 1.1**). Die beschriebene Justiereinrichtung gestattet eine feinfühligke ebene Bewegung der Marke M auf zwei Kreisbahnen. Das Erkennen dieser Funktion wird erleichtert, wenn man in der technischen Zeichnung die Koppelstellen zur Umgebung (Gestell, Hand des Bediener, Lichtbündel zur Beleuchtung der Marke – in der Seitenansicht erkennbar) mit darstellt und danach die starren Verbindungen sowie Hilfselemente, wie die zur Lagesicherung dienenden Zugschrauben, eliminiert. Aus der so auf funktionsentscheidende Bestandteile vereinfachten Grobgestalt folgt im nächsten Abstraktionsschritt das symbolisch dargestellte technische Prinzip mit den Bewegungs- und Gestaltparametern, die die Funktion bestimmen. Die Funktionsstruktur faßt Elementegruppen zu Funktionselementen zusammen. Sie zeigt eine Reihenschaltung der beiden unabhängig voneinander zu betätigenden Bewegungseinheiten, wodurch sich die Schraube 2 und der übersetzende Hebel r/b bei Betätigung von Schraube 1 um das gestellfeste Festkörpergelenk mitbewegen. Die durch Zusammenfassen der Teilfunktionen gefundene Gesamtfunktion beschreibt die Übertragung der Bewegungen S_{E1} und S_{E2} am Umfang der Stellknöpfe in die Zweikoordinaten-Positionierbewegung S_{Aa}, S_{Ab} .

Verallgemeinert man diese Systemanalyse, so folgen daraus die im **Bild 1.2** zusammengestellten Produkteigenschaften. Unabhängig davon, ob ein komplexes Gerät oder ein Einzelteil zu entwickeln sind, muß der Konstrukteur für jedes Produkt sowohl die Einsatzumgebung als auch die Funktion und die Gestalt eindeutig und vollständig bestimmen.

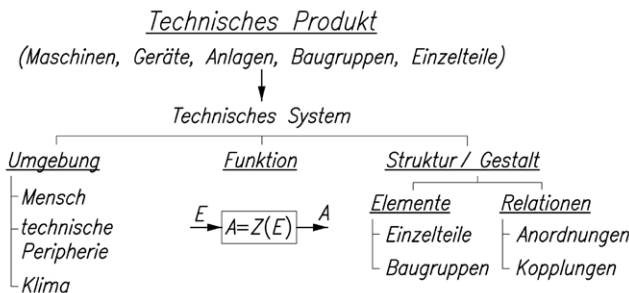
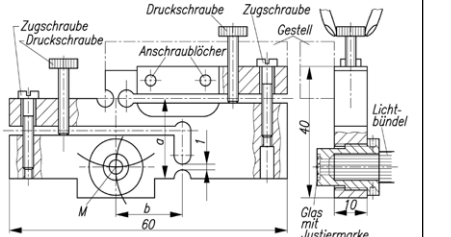
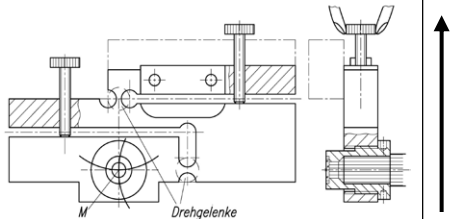
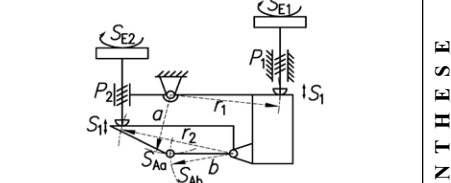
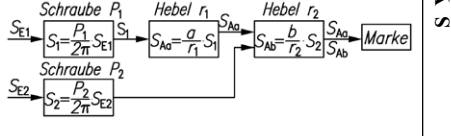
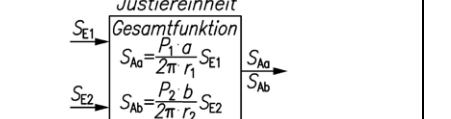


Bild 1.2 Systemeigenschaften technischer Produkte

Eine Konstruktionsaufgabe enthält Forderungen über den Zweck, das Einsatzgebiet, die Leistung u. ä., die in ihrem Kern die *Funktion* des technischen Gebildes festlegen. Gesucht ist die *Struktur*, letztlich die *Gestalt*, die in der Lage ist, in einer definierten *Umgebung*, d. h. in Wechselwirkung mit dem Nutzer, mit anderen technischen Einrichtungen und der umgebenden Atmosphäre die Funktion sicher zu erfüllen. Der in Tafel 1.1 beschriebene Analyseablauf kehrt sich dann um. Die Aufgabe des Konstrukteurs besteht demnach in der Synthese einer Struktur. Dieser Vorgang beim Lösen einer Konstruktionsaufgabe ist *mehrdeutig* und *unbestimmt*, ein typisches Kennzeichen schöpferischer Prozesse. Für die Erfüllung einer technischen Funktion sind mehrere unterschiedliche Strukturen einsetzbar (Mehrdeutigkeit), und das Bestimmen dieser Lösungsmenge ist mit Unsicherheit behaftet (es gibt keinen determinierten Lösungsweg). Deshalb sollte man beim Konstruieren stets systematisch vorgehen.

Tafel 1.1 Abstraktionsstufen der Produktbeschreibung

	Abstraktionsstufe	Darstellungsmittel	Inhalt	Beispiel Justiereinrichtung
ANALYSE	Technischer Entwurf	Technische Zeichnung	vollständige, maßstäbliche Beschreibung der Gestalt des Produktes	
	Grobentwurf	Technische Zeichnung	funktionswichtige Gestalt	
	Technisches Prinzip (Wirkprinzip, Arbeitsprinzip)	Prinzipskizze (funktionsorientierte Symbole)	Prinzip-elemente und deren Relationen (Anordnung, Kopplungen)	
	Funktionsstruktur	Blockbild	Funktions-elemente (Teilfunktionen), Kopplungen	
	Gesamtfunktion	Blockbild, Gleichung, Diagramm	Ein- und Ausgangsgrößen sowie deren Beziehungen	

SYNTHESE

Bild 1.3 beschreibt als „top-down“-Ablauf die methodischen Arbeitsschritte. Die horizontale Aufspaltung am Ende der Prinzipphase berücksichtigt physikalisch heterogene technische Lösungen, die für mechatronische und feinmechanisch-optische Produkte charakteristisch sind und die eine Teamarbeit entsprechender Spezialisten erfordert. Der Inhalt dieses Buches konzentriert sich auf das Entwerfen und Gestalten mechanischer Elemente und Baugruppen.

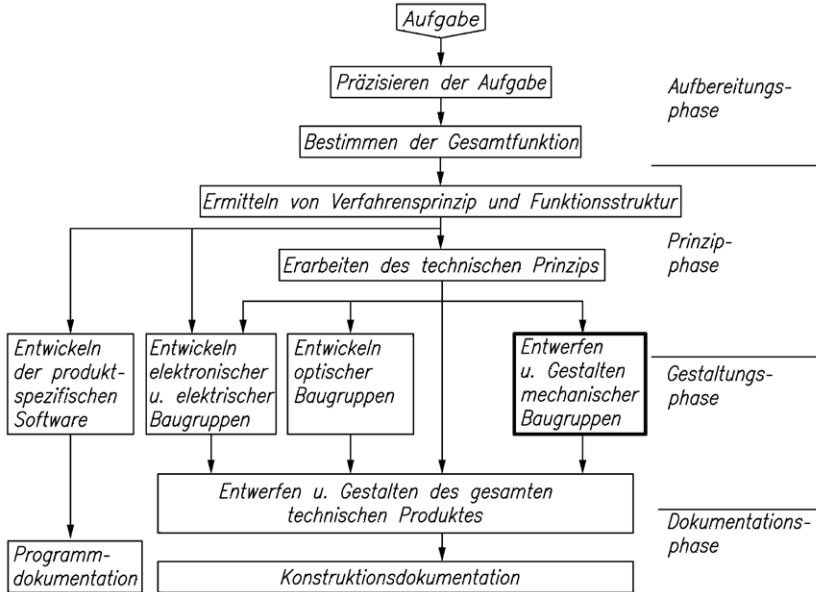


Bild 1.3 Konstruktiver Entwicklungsprozess für Produkte der Feinwerktechnik und Mechatronik (nach VDI-Richtlinie 2221) [1.13]

Das Entwerfen einer Baugruppe nach dem Ablauf im Bild 1.3 und die dabei mögliche Lösungsvielfalt auf allen Entwicklungsebenen zeigt **Bild 1.4**. Das mit der Energie W_{e1} elektrisch angetriebene Positioniersystem soll ein Prüfobjekt in der Koordinatenrichtung x um $s_x(t)$ verschieben. Diese Gesamtfunktion ist beim Präzisieren der Aufgabe durch weitere Forderungen zu ergänzen (Spezifikation der Ein- und Ausgangsgrößen, Bauraum, Kosten u. a.). Davon ausgehend bestimmt man nun Funktionsstrukturen durch Zerlegen der Gesamtfunktion in Teilfunktionen, beginnend mit der geforderten Ausgangsgröße $s_x(t)$.

Zur Realisierung dieser Linearbewegung und als Träger für das Objekt ist eine Geradföhrung (s. Abschn. 9) am Ende der Funktionskette erforderlich. Für das Erzeugen der Bewegung $s_x(t)$ eignen sich sowohl ein rotatorischer Motor (Funktionsstruktur 1), der über eine Kupplung mit dem Umsetzer $\varphi \rightarrow s_x(t)$ verbunden ist, als auch ein Linearmotor (Funktionsstruktur 2).

Da sich jede Teilfunktion durch unterschiedliche Konstruktionselemente realisieren lässt, entstehen unter Nutzung von Katalogen, Konstruktionsdatenbanken [1.8] sowie geeigneten Übersichten (**Tafel 1.2**) mittels **Kombination** [3] [12] [1.2] für jede Funktionsstruktur mehrere Prinzipvarianten (Prinzipie 1.1 bis 2.2). Die optimale Variante findet man durch Bewertung nach funktionellen, ergonomischen, fertigungstechnischen, ökonomischen und anderen Kriterien der Entwicklungsaufgabe. Der Entwurf 1.1.1 im Bild 1.4 ist aus Elementen konfiguriert, die Herstellerkatalogen entnommen sind. Er ist noch durch das Gestell mit Hilfe der Regeln in Abschn. 2 zu einem Gesamtentwurf zu vervollständigen. Die durch die Federföhrung spielfreie Piezo-Positioniereinheit (Entwurf 2.1.1) realisiert Verstellwege im μm -Bereich.

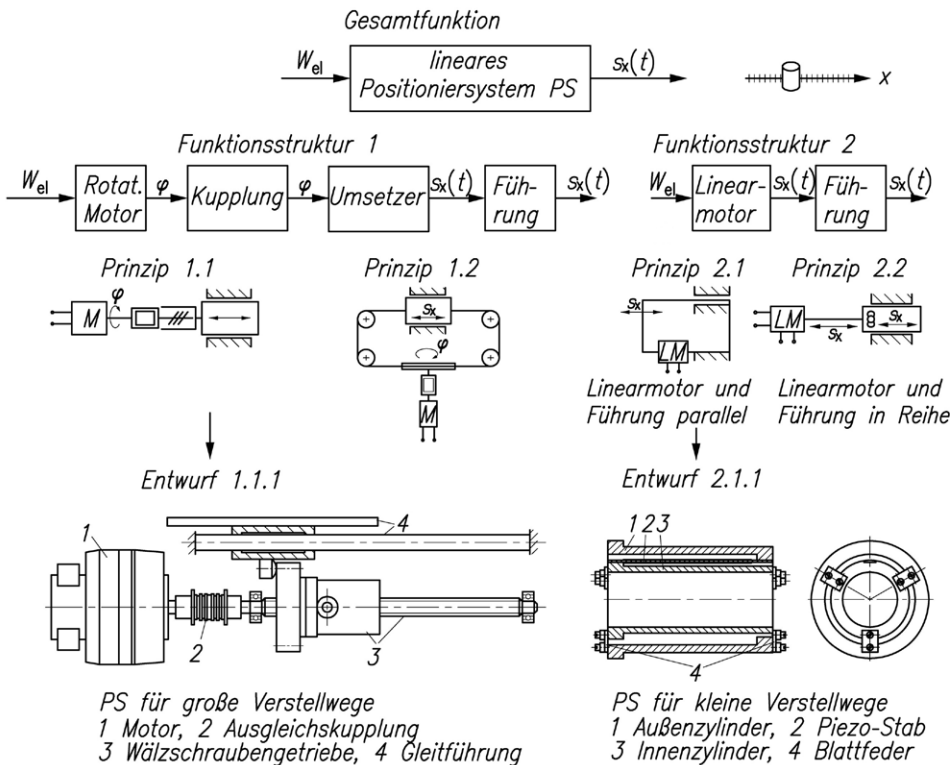
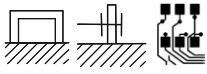
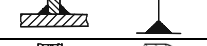
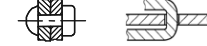



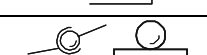
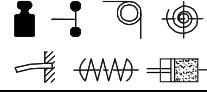
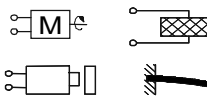
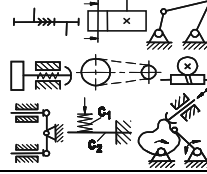
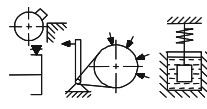
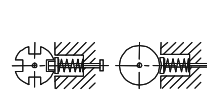
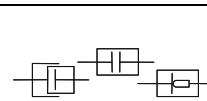
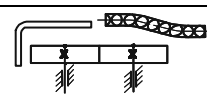
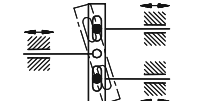


Bild 1.4 Systematischer Entwurf eines linearen Positioniersystems PS (Auswahl von zwei Konzepten)

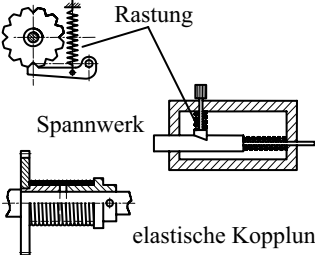
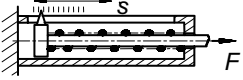
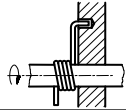
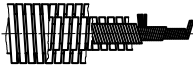
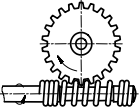

Nach Tafel 1.2 sind mechanische Elemente grundsätzlich als Stützelemente für die statische Anordnung von Bauteilen sowie für das Bereitstellen, Anpassen und Übertragen mechanischer Energie in Bewegungssystemen einsetzbar. Gestelle, Gehäuse sowie andere Träger- und Verbindungselemente sind beim Aufbau aller Produkte unverzichtbar, da sie die nichtmechanischen Funktionselemente (optische, elektrische, elektronische) in ihrer für die Funktion notwendigen Lage sichern und oft auch ihrem Schutz dienen. In Produkten der Präzisionstechnik müssen sie häufig Aufgaben der Feinpositionierung und Justierung übernehmen. Hierfür entwickelt man durch Integration von Sensor- bzw. Aktorelementen mechatronische Komponenten (letzte Spalte in Tafel 1.2), die sich in geräteinterne Steuerungen und Regelungen einbinden lassen [1.7].

Ebenso wie für eine technische Funktion mehrere Elemente einsetzbar sind, kann ein Bauelement unterschiedliche Funktionen einzeln oder gleichzeitig auch mehrere erfüllen, was man durch **Variation** seiner Umgebung und Gestalt erreicht [3]. Die Schraubenfeder in **Tafel 1.3** ist je nach Einsatzumgebung und entsprechender Formgebung der Federenden für vielfältige Zwecke nutzbar. In der elastischen Lampenfassung erfüllt die Feder ebenso wie das in Bild 8.56 dargestellte Spannband (s. Abschn. 8.3) gleichzeitig drei Funktionen. Diese *Funktionenintegration* [12] nutzt man für die Miniaturisierung von Produkten sowie für die Kompaktbauweise mechatronischer Systeme. Die Anzahl der einem Bauteil übertragbaren Funktionen entspricht der Anzahl seiner technisch nutzbaren physikalischen Eigenschaften.

Tafel 1.2 Systematik mechanischer Elemente

Zweck	Funktion	Funktions- elemente	Konstruktions- elemente	Skizze	Mechatronische Elemente
1. Anordnung von Elementen	Stützen	Stütz- elemente	Gestell, Gehäuse, Fassung, Balken, Stativ, Leiterplatte		Piezostab
		fest	stoffschlüssig		Memory- Verbindung, sensitive Schrauben
			formschlüssig		
			kraftschlüssig		
		beweg- lich	Lagerung		Magnetlager, feldgeführtes Element
			Führung		
			Gelenk mit $f > 1$		
2. Bereitstellen mech. Energie	Speichern	Speicher	Massestück, Schwungmasse, Pendel, Feder, Luftfeder		Schwingquarz, quartzesteuertes Schrittwerk
	Wandeln	Wandler	elektromechanisches Element, Motor, Elektro- magnet, Bimetall		elektrochemischer, magnetostruktiver, Memory-Aktor, Ultraschallmotor, Piezotranslator
3. Anpassen mechanischer Energie	Umsetzen	Getriebe	Zahnrad-, Reibrad-, Zugmittel-, Schrauben-, Koppel-, Kurven-, Hebel-, Feder- getriebe		gekoppelte Elektromotoren, elektrisch gesteuertes Getriebe
	Verstärken				
	Reduzieren	Aufhalter	Anschlag, Brems-, Dämpfung		Wirbelstrombremse, elektr. einstellbare Dämpfer und Bremsen, Verschleißdetektion
	Sperren	Festhalter	Gesperre, Gehemme		Piezoklemmung, elektrostat. Fest- haltung, Memory- klemme, Magnet- Rastung
	Schalten				
4. Übertragen mechan. Energie	Koppeln	Kupplungen	Schaltkupplung, Ausgleichs- und starre Kupplung		elektromagn., elek- trostat. Kupplung, Kuppl. mit Piezo- steller, Verschleißdetektion
	Leiten	Leiter (mechanisch)	Achse, Welle, Rohr, Getriebe ($i = 1$)		„elektrische“, „magnetische“ Welle
	Vereinigen, Verzweigen	Verteiler	Differenz- und Summengetriebe		gekoppelte Aktoren, kaskadierte Antriebe

Tafel 1.3 Verwendungsmöglichkeiten einer Feder durch Variation seiner Umgebung

Zweck/Aufgabe	Konstruktionsvarianten (Auswahl)	Funktionen der Feder
Erzeugen der Rastkraft Erzeugen einer beschleunigten Bewegung Vermeiden von Stößen	 <p>Rastung Spannwerk elastische Kopplung</p>	Speichern mechanischer Energie
Kraftmessung	 <p>Federwaage F s</p>	Wandeln ($F \rightarrow s$)
Verhindern der Drehung einer Welle in einer Richtung	 <p>Schlingfeder</p>	Sperren
Variable Übertragung einer Drehbewegung	 <p>biegsame Welle</p>	Leiten mechanischer Energie
Übersetzen einer Drehbewegung ins Langsame	 <p>Schneckengetriebe (Feder als Schnecke)</p>	Verstärken/Reduzieren, Richtungsänderung der Drehbewegung
Elastische Halterung einer Glühlampe	 <p>Lampenfassung</p>	Positionieren, Speichern (mechanische Energie), Leiten (elektrische Energie)

1.3 Rechnerunterstütztes Konstruieren – CAD

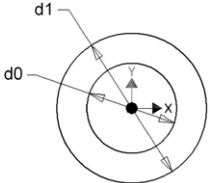
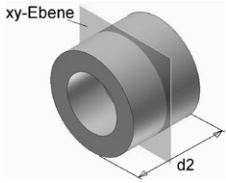
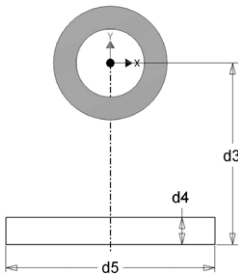
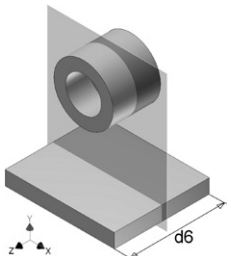
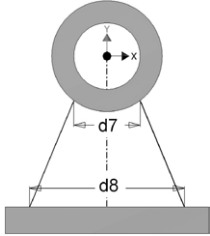
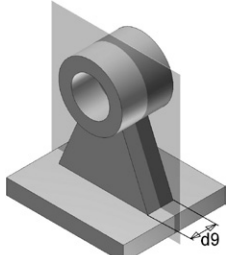
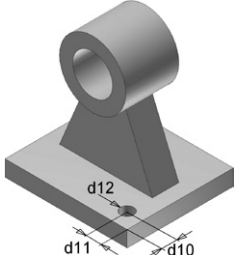
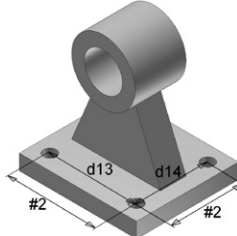
In Elektronik, Elektrotechnik, Feinwerktechnik und Mechatronik ist die Rechentechnik zu einem unverzichtbaren Hilfsmittel für alle Prozesse des Produktlebenszyklus geworden. Man spricht von CAX-Systemen (CA für „Computer-Aided“, x für den jeweiligen Einsatzfall) [1.5] [1.6] [1.10]. In der Erzeugnisentwicklung, Arbeitsvorbereitung und Produktion verwirklichen durchgängige CAD/CAM-Systeme (CAD: Computer Aided Design, CAM: Computer Aided Manufacturing) im Dialog mit dem Menschen alle informationellen Prozesse. 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 und der nachfolgenden Prozesse durch rationelle Datenspeicherung und -bereitstellung, automatisches Zeichnen, maschinelle Dokumentation der Ergebnisse, Wiederverwendung und Anpassung bewährter Konstruktionen, rationellen Änderungsdienst, direkten Datenaustausch mit anderen Betriebsbereichen.

In der Praxis dominieren 3D-CAD-Systeme beim Entwurf technischer Produkte, die rechnerintern ein vollständiges dreidimensionales geometrisches Modell des Objektes generieren. Der Nutzer kann mittels Skizzenmodus im Dialog schrittweise aus einer zweidimensionalen Darstellung einer Kontur durch Verschieben (Ziehen, Extrudieren) oder Drehen

um eine geeignete Achse einen Körper entwerfen (**Tafel 1.4**). Komplexere geometrische Formen lassen sich durch die Booleschen Operationen Vereinigung, Subtraktion/Differenz oder Durchschnitt/Verschneidung einfacher Elemente erzeugen.

Tafel 1.4 Ablauf der parametrischen 3D-CAD-Modellierung des Lagerbocks aus Bild 2.8b in Abschn. 2

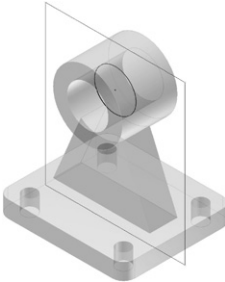
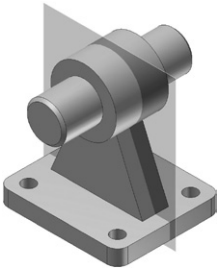
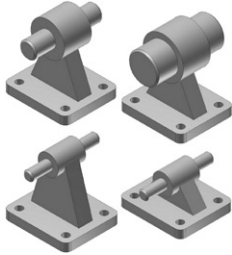
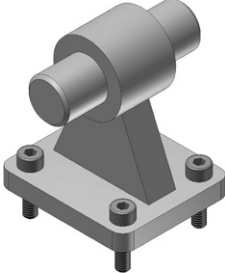
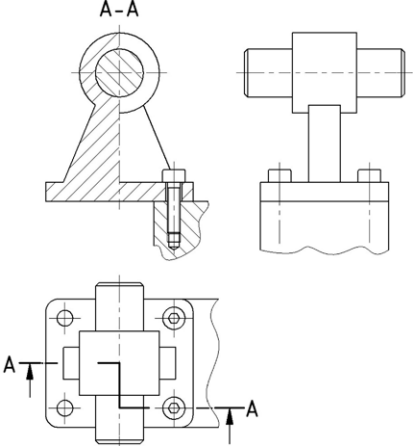
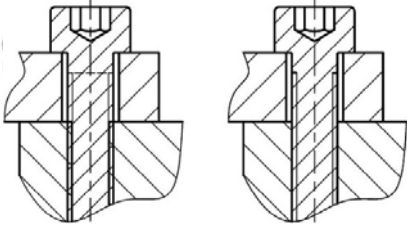
<p>1.</p>  <p>Parametrische 2D-Skizze in der xy-Ebene (Abhängigkeiten: Kreise koinzident zum Ursprung)</p>	<p>2.</p>  <p>xy-Ebene</p> <p>Extrusion (Austragen, Block) symmetrisch zur xy-Ebene</p>	<p>3.</p>  <p>Skizze in der xy-Ebene (Abhängigkeiten: horizontal, vertikal, symmetrisch)</p>	<p>4.</p>  <p>Extrusion symmetrisch zur xy-Ebene</p>
<p>5.</p>  <p>Skizze in der xy-Ebene, Nutzung projizierter Körperkanten (symmetrische Abhängigkeit)</p>	<p>6.</p>  <p>Extrusion symmetrisch zur xy-Ebene</p>	<p>7.</p>  <p>Feature: Bohrung</p>	<p>8.</p>  <p>Feature: rechteckförmige Anordnung der Bohrungen</p>

Häufig benutzte Formelemente können die Entwurfsarbeit als sog. Features [1.13] unterstützen, indem man Formelementen einen Verwendungszweck (Gestaltelement, Funktion, Fertigung, Montagehilfe o. ä.) und damit eine Semantik zuordnet. So ist ein zylindrisches Loch z. B. als Bohrung (wie in Tafel 1.4, Arbeitsschritt 7), als Lagerstelle, als Einfügestelle für einen Paßstift oder als Öffnung für ein Lichtbündel beim Entwerfen modellierbar.

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 u. ä.) Beziehungen verknüpfen. Sie ermöglichen Änderungen des Entwurfs unter Beibehaltung des Zusammenhangs, in dem die Bauteile stehen. Die *assoziative* Verknüpfung unterstützt den Entwurf zusammenhängender Elemente (**Tafel 1.5**) und das Erzeugen von Maßvarianten für eine entworfene Grundgestalt (Variantenkonstruktion auf Basis eines Mastermodells). Norm- und Wiederholteile können aus

Bibliotheken des CAD-Systems oder von Herstellern effektiv eingefügt werden. Verbunden damit ist das Eintragen in eine Stückliste, die das System beim Entwerfen automatisch erzeugt.

Tafel 1.5 Parametrisch-assoziative Modellierung beim Zusammenbau

<p>Skizze für Welle:</p>  <p>neues Bauteil Welle, Skizze: Innendurchmesser der Lagerbohrung = Wellendurchmesser, Welle ist assoziativ zum Lagerbock</p>	<p>Extrusion:</p>  <p>symmetrisch zur xy-Ebene und Feature „Fase“ am Wellenende, axiale Lage durch zusätzliche Beziehung (fluchtende Ebenen) bestimmbar</p>	<p>Varianten:</p>  <p>Welle paßt sich den Änderungen des Lagerbocks an</p>	<p>Normteile:</p>  <p>Platzierung der Schrauben mit parametrischen Abhängigkeiten, Ergebnis: 3D-Geometriemodell</p>
<p>Im CAD-System erzeugte technische Zeichnung:</p> 	<p>Einzelheit: Schraubenverbindung (wenn der Gewindebolzen ausnahmsweise geschnitten dargestellt werden muß, um innen liegende Details, z. B. den Innensechskant zu zeigen)</p>  <p>links: fehlerhafte Gewindedarstellung (übereinander liegende Schraffuren, Körperkanten der Bohrung liegen in der Schraube) rechts: normgerechte Zeichnung (DIN EN ISO 4762 - M4 x 16)</p>		

CAD-Systeme gestatten, aus dem 3D-Modell technische Zeichnungen mit den erforderlichen Ansichten, Schnitten und Einzelheiten maßstäblich zu erzeugen (Tafel 1.5 unten). Diese Zeichnungen sind jedoch oft nicht normgerecht. Um eine verbindliche (justitiable) Zeichnungsdokumentation (s. Anhang „Technisches Zeichnen“) zu erhalten, ist eine Nachbereitung erforderlich, wie die Korrektur von Linienbreiten, Schraffuren, unsichtbaren Kanten, Ergänzen von Kommentaren u. ä.

Voraussetzung für die effektive Nutzung dieser Werkzeuge ist eine räumliche Vorstellung von dem zu entwerfenden Objekt auf der Grundlage von Formelementen, wie sie in den Bildern 2.3,

2.4, 2.5 und 2.8 in Abschn. 2 dargestellt sind, was man zweckmäßig durch entsprechende Handskizzen unterstützt. Auch beim Bildschirmdialog ist das Vorgehen von „innen“ nach „außen“ (beginnend mit den funktionswichtigen Formelementen) angezeigt, wie es die Folge der Arbeitsschritte in Tafel 1.4 verdeutlicht.

Die sehr anschaulichen dreidimensionalen Geometriemodelle lassen sich auch als „virtuelle Prototypen“ zur Überprüfung vielfältiger Eigenschaften des entworfenen Produktes wie Funktion, Festigkeit, Fertigung, Montage, Bedienung u. a. mittels Rechnersimulation [1.9] [1.10] nutzen. Eine Simulation der Montage im **Bild 1.5** zeigt die erforderlichen Fügerichtungen und erlaubt bei Verwendung eines Zeitmaßstabs für die Ausführung der Operationen auch die Optimierung der Montagefolge.

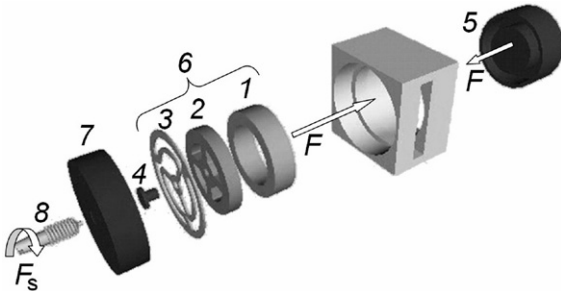


Bild 1.5
Montagesimulation eines Magnetventils
1 bis 8 Montagefolge
F Fügerichtungen, F_s Schraubbewegung

Auf Grundlage eines 3D-Modells sind Deformationen und Spannungen mechanischer Elemente unter Belastung durch Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) effektiv überprüfbar (**Bild 1.6**).

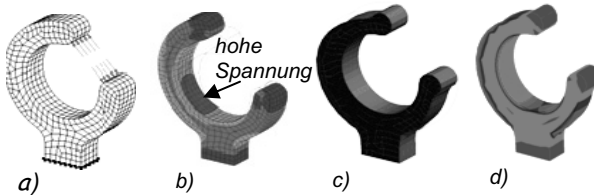


Bild 1.6
FEM-Simulation einer Halterung
a) Gestaltentwurf mit FEM-Netz und Kräften;
b) Spannungsberechnung mittels FEM;
c) verbesserter Entwurf;
d) Nachweis der zulässigen Beanspruchung

Zum rechnerunterstützten Konstruieren gehört auch die Dimensionierung. Für alle mechanischen Bauelemente ist dazu spezielle Software verfügbar [1.10] [1.11] [1.12]. Standardberechnungen sind effektiv mit Berechnungsmodulen unmittelbar in CAD-Systemen möglich. Ihre Anwendung zur Auslegung, Nachrechnung und Optimierung 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 Fall erfolgen sollte, stellen die Abschnitte 3 bis 11 des Buches die notwendigen Grundlagen für mechanische Elemente bereit.

2 Grundlagen der Konstruktionsarbeit

Bei der konstruktiven Entwicklung technischer Erzeugnisse nimmt das *Gestalten* von Bauelementen und Baugruppen einen wesentlichen Raum ein. Der Nutzer erwartet neben einer zweckmäßigen, formschönen und fertigungstechnisch günstigen Gestalt der Elemente und der aus ihnen zusammengefügt Baugruppen und Geräte möglichst geringe Anschaffungs- und Betriebskosten, einen sparsamen Energieverbrauch sowie die ökonomische Verwendung von Werkstoffen. In erster Linie ist jedoch die *Funktion* zuverlässig zu erfüllen und ein hoher *Gebrauchswert* zu sichern. Dabei ist stets die Gesamtheit aller Anforderungen zu beachten. Auf wichtige Regeln und Einflüsse wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

Um einen gesicherten Austauschbau und vor allem auch eine wirtschaftliche Fertigung zu ermöglichen, muß die Vielzahl möglicher Ausführungsformen und geometrischer Abmessungen von Bauelementen, von Werkstoffen und deren Anlieferungsformen, von technischen Parametern usw. sinnvoll eingengt werden. Das erfolgt durch Normen, bei denen nach dem Geltungsbereich zwischen internationalen, nationalen, Fachbereich- und Werknormen unterschieden wird.

Beispiele sind die internationalen ISO-Normen, die Normen der Bundesrepublik Deutschland (DIN) und die europäischen EN-Normen. 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 auf dem letzten Stand gehalten werden, sind alle gültigen Normen angeführt (z. B. DIN-Katalog für technische Regeln Bd. 1 und 2).

Zu den wichtigsten genormten Arbeitsunterlagen bei der konstruktiven Entwicklung von Erzeugnissen gehören Normzahlen und Normmaße, Toleranzen und Passungen sowie die verfügbaren Werkstoffe. Ihre Anwendung ist ebenfalls in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt. Außerdem ist eine Vielzahl von Konstruktionselementen in Form, Abmessungen und Werkstoff genormt. Auf die Arbeit mit diesen Unterlagen wird in den entsprechenden Hauptabschnitten eingegangen.

2.1 Gestalten von Bauteilen

[3] [4] [5] [8] [12]

Konstruktionselemente als mechanische Bauteile von Baugruppen und Geräten sind Träger technischer Wirkungen und meist Bauteile, deren wesentliche Funktion die Nutzung bestimmter physikalischer Zusammenhänge ist. Für ihren Entwurf und die Gestaltung existiert oft keine eigene Aufgabenstellung, da sie sich vielfach aus der übergeordneten, z. B. aus der für das Gesamtgerät, ableitet bzw. als integrierter Bestandteil dieser zu bearbeiten ist.

2.1.1 Gestaltungsgrundsätze

Bauteile haben bestimmte *Teilfunktionen* zu erfüllen. Daneben müssen eine möglichst einfache und billige Herstellung sowie die ökonomische Nutzung und die Erfüllung ästhetischer Ansprüche gewährleistet sein. Aus diesen Grundforderungen ergeben sich alle weiteren Forderungen, die allgemein an technische Gebilde zu stellen sind. In allen Fällen gilt die Grundregel:

- Technische Gebilde sind **eindeutig, einfach** und **sicher** zu gestalten.

Die **eindeutige** Realisierung eines gewählten Wirkprinzips erfordert z. B. die geordnete, d. h. nicht überbestimmte, Sicherstellung des Kraft-, Stoff- und Signalflusses. Verstöße gegen dieses Prinzip führen u. a. zu ungewollten Zwangszuständen mit erhöhten Kräften und Verformungen. Doppelpassungen (s. Tafel 2.14/5.), mehr als eine Festlageranordnung bei der Lagerung von Wellen (s. Abschn. 8, Bild 8.42) sowie bei Führungen (s. Abschn. 9, Bild 9.8) oder unterschiedliche Wärmedehnungen an Bauteilen (z. B. Glasdurchführungen) können solche Zwangszustände bewirken und stellen somit überbestimmte (mehrdeutige) Lösungen dar [12]. **Bild 2.1** zeigt die Gestaltung der eindeutigen Einbaulage an einem Leistungstransistor.

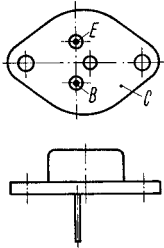


Bild 2.1 Eindeutige Einbaulage der Anschlüsse an einem Leistungstransistor durch unsymmetrische Anordnung

Die **einfache** Gestaltung wird u. a. durch die Wahl einer einfachen Form des technischen Gebildes (s. Abschn. 2.1.2), eines geeigneten Werkstoffs und des Aufbaus der Erzeugnisse aus möglichst wenigen Einzelteilen erreicht. Dadurch sind wirtschaftliche Fertigung und Montage möglich [3] [4] [5].

Die **sichere** Gestaltung umfaßt die konsequente Erfüllung der Tragfähigkeitsanforderungen, die Zuverlässigkeit, den Arbeitsschutz (z. B. Berührungsschutz), den Umweltschutz, die Wartung, die Montage usw.

2.1.2 Festlegen der Bauteilgestalt

Bauteile sind aus *Formelementen* aufgebaut (s. Bild 2.3). Häufig verwendete Grundformen sind Würfel, Quader, Pyramide, Zylinder, Kegel und Kugel bzw. Teile dieser. Durch sie wird die *Form* der Bauteile bestimmt, die aus Gründen einer *wirtschaftlichen Fertigung* möglichst einfach sein soll.

2.1.2.1 Bauteilform

Entsprechend der Arbeitsweise der Werkzeugmaschinen sind für die die Formelemente begrenzenden Oberflächen ebenflächige (durch Hobeln, Fräsen und Schleifen) oder zylindrische Grundformen (durch Drehen und Bohren) zu bevorzugen. Ebene (Quadrat, Rechteck, Rhombus, Kreis und Kombinationen) und zylindrische geometrische Grundformen bilden in den meisten Fällen auch die funktionsbestimmenden bzw. funktionswichtigen Flächen, die *Wirkflächen* der Bauteile.

Zylinderförmige Bauteile werden je nach dem Verhältnis Durchmesser/Länge als Stäbe, Achsen, Rollen oder Ronden bezeichnet. Ein Quader kann je nach den Verhältnissen seiner Abmessungen als Stange, Platte, Blech oder Folie ausgeführt sein. Solche Formen haben oft **Halbzeuge**, die vorgefertigt mit genormten Querschnitten und Abmessungen vorliegen (**Bild 2.2**).

1	Gewalzte und gezogene Stahlprofile	
2	Stahlleichtprofile	

Bild 2.2 Genormte Stahlprofile

Die meisten technischen Gebilde lassen sich durch Kombination aus den verschiedensten *Grundformen* zusammensetzen. Der im **Bild 2.3** dargestellte Kontaktfedergrundkörper ist aus quaderförmigen Grundformen aufgebaut. Verknüpfungs- und Anschlußflächen sind Rechtecke, die Zusatzelemente dagegen Drehteile mit Zylindern und Kugeln als Grundkörper und Kreisen als Verknüpfungsflächen. Die Rechteckfläche 5.1 ist eine Wirkfläche, die das Befestigen der Feder ermöglichen soll, während die Fläche 5.2 das Bauteil nach außen abschließt (berandet) und somit nur eine Nebenfunktion zu erfüllen hat.

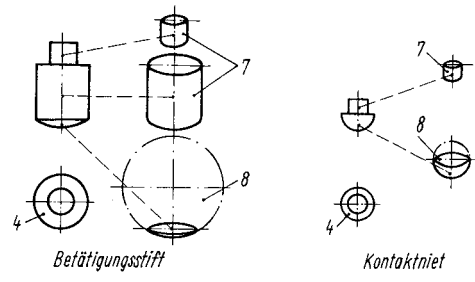
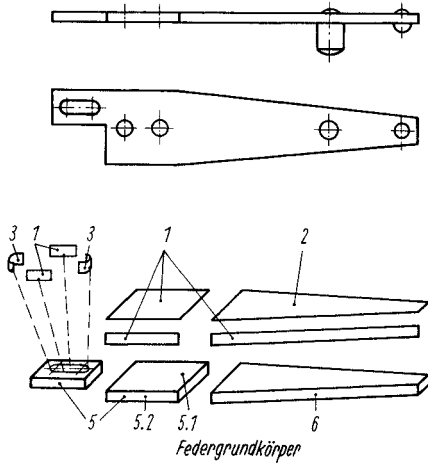


Bild 2.3 Formelemente an einer trapezförmigen Kontaktblattfeder
 Flächen: 1 Rechteck; 2 Trapez; 3 Zylindermantel;
 4 Kreis; 5.1 Wirkfläche;
 5.2 untergeordnete Fläche (Nebenfläche)
 Körper: 5 Quader; 6 Prisma; 7 Zylinder; 8 Kugel

Die Auswahl der Formelemente nur nach funktionellen Gesichtspunkten führt zur sogenannten *Zweckform* (**Bild 2.4a**). Die Gestalt von Bauteilen läßt sich aber bei funktionellen und fertigungstechnischen Zusatzforderungen durch Hinzufügen weiterer einfacher Grundformen zur *Ausführungsform* verändern und in den meisten Fällen fertigungstechnisch verbessern (**Bild 2.4b**) [5].

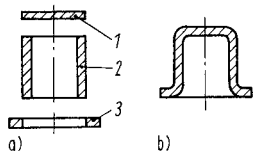


Bild 2.4 Gestaltung einer Gehäusekappe mit Formelementen
 a) aus geometrischen Grundformen 1, 2 und 3 – Zweckform;
 b) Tiefziehteil – fertigungstechnische Ausführungsform

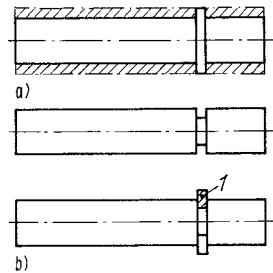


Bild 2.5 Gestaltung eines Drehteils
 a) nach Zweckform, großer Materialabfall;
 b) besser durch Verwendung von gezogenem Halbzeug und Normteil / (Sicherungs Scheibe nach DIN 6799)

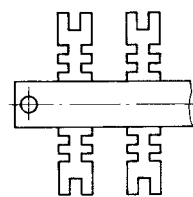


Bild 2.6 Lötahnnestaltung rechteckige Grundform wird von Kerben zur Verminderung des Wärmeabflusses zum Lötahnnest durchbrochen

Fertigungstechnische Erwägungen führen z. B. zu der im **Bild 2.5** gezeigten Veränderung der die Funktion erfüllenden Grundform (a) in eine einfachere Form (b), die durch Verwendung genormter Bauteile eine Materialeinsparung ermöglicht.

In bestimmten Fällen sind auch kompliziertere Formen notwendig. Für die Lötahnnestform (**Bild 2.6**) wäre eine Rechteckform bereits funktionserfüllend. Die gewählte Form soll jedoch einen Wärmestau bewirken und den Wärmeabfluß zum Lötahnnest verringern.

2.1.2.2 Werkstoff und Herstellung

Zur Realisierung der Form eines Bauteils ist *Werkstoff* erforderlich. Bei seiner Auswahl (s. Abschn. 2.4) sind sowohl die Forderungen aus der *Nutzung* des Bauteils (Festigkeit, Verformung, Verschleiß, Korrosion usw.) als auch die für die *Herstellung* (u. a. Spanbarkeit, Umformbarkeit, Lötbarkeit und Gießbarkeit) sowie die *Ökonomie* (Masse, Kosten, Lieferbedingungen usw.) zu beachten.

Einige Beispiele zeigen die Bilder 2.4 bis 2.6. Ausführliche Darlegungen zum fertigungsgerechten Gestalten von Bauteilen sind in [4] [5] enthalten.

2.1.2.3 Bauteilzustand

Für die Erfüllung der Funktion ist oft auch ein bestimmter *Bauteilzustand* wichtig, der aus Werkstoffeigenschaften (z. B. Härte, thermische und magnetische Eigenschaften, Eigenspannungen), aber auch aus konstruktiven Forderungen (Einbauverhältnisse, Vorspannung usw.) resultieren kann. Solche Zustandseigenschaften sind vom Konstrukteur festzulegen und in den Zeichnungsunterlagen anzugeben, da sie durch die Gestalt nicht zum Ausdruck kommen.

2.1.3 Regeln, Prinzipien und Einflüsse

Aus dem Streben nach optimaler Erfüllung der Funktion, der Herstellbarkeit, der Ökonomie und Ästhetik ergeben sich zahlreiche Forderungen an die Gestalt technischer Gebilde, die in der Formulierung verschiedener Gerechtheiten (**Tafel 2.1**) ihren Niederschlag gefunden haben und aus denen sich zahlreiche Regeln, Richtlinien und Methoden ableiten lassen [3] [12] [1.3]. Nicht für jede technische Lösung sind die angegebenen Regeln und Prinzipien gleich wichtig. Vielmehr hängt es von den speziellen Forderungen der Aufgabenstellung ab, welche den Vorrang erhalten.

Im Hinblick auf den späteren Zusammenbau der Bauteile zu Baugruppen und Geräten kommt dem Gestalten von *Bauelemente-Koppelstellen* besondere Bedeutung zu. Für einen wirtschaftlichen Austauschbau sind neben der Einschränkung der Vielzahl möglicher Konstruktionsmaße durch Anwenden von Normmaßen aus Auswahlreihen (s. Abschn. 2.2) auch die vorrangige Verwendung genormter Bauelemente und die Paßmaßübereinstimmung notwendig. Für jedes Funktionsmaß sind die *Toleranzen* gemäß Abschn. 2.3 nach dem Grundsatz festzulegen:

- Toleriere so grob wie möglich und nur so fein wie erforderlich.

Um das oftmalige Auswechseln zueinander passender Teile zu gewährleisten und die Montage zu erleichtern, muß weiterhin eine genaue *Lagefixierung* und *-sicherung* erfolgen. Bei Drehteilen wird die Lage in radialer Richtung meist durch einen Zentrierbund und in axialer Richtung durch einen Anlagebund gesichert (**Bild 2.7**). Zentrierbunde sollten eine ausreichende Breite ($b \geq 4 \text{ mm}$) haben. Mit Hilfe von Gewinden kann eine Zentrierung nicht erreicht werden. Bei Verschraubungen ist deshalb stets eine zusätzliche Lagesicherung, z. B. durch Stifte (s. Abschn. 4.2.2), erforderlich.

Die verstärkte Anwendung automatisierter Verfahren und von Robotern bei der Herstellung und Montage von Bauteilen [3] [12] [2.3] [2.5] beeinflusst in erheblichem Maße die Ein-

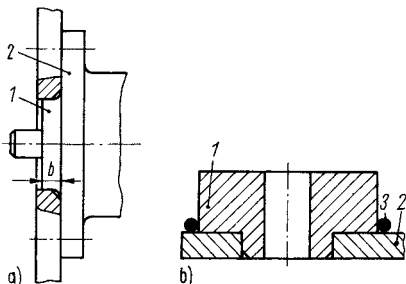


Bild 2.7 Zentrierung und Lagesicherung

a) Motorbefestigung

1 Zentrierbund; 2 Anlagebund des Motors

b) Lötverbindung; Lagesicherung von Buchse 1, Hebel 2 und Lot 3 beim Schutzgaslöten

zelteilgestaltung, indem Forderungen nach einer *automatisierungs-* bzw. *robotermontagegerechten* Gestaltung erhoben werden. Es sind deshalb z. B. Vorkehrungen zu treffen, um platzsparende Stapelbarkeit ohne Gefahr des Verhakens oder Ineinanderschachtelns der Teile zu erreichen. Für das sichere Ergreifen, automatische Zuführen und Montieren durch Roboter sind einfache und möglichst an verschieden geformten Bauteilen gleichartige Greifflächen vorzusehen. Die Bauteile müssen sich mit einfachen Mitteln vereinzeln lassen und eindeutige Erkennungs- und Unterscheidungsmerkmale für die eingesetzten unterschiedlichen Sensoren besitzen. Auf die vielfältigen hierbei zu beachtenden Regeln wird an Hand zahlreicher Beispiele in [3] [12] [2.5] ausführlich eingegangen. Einige Richtlinien und Beispiele enthält **Tafel 2.2**.

An den Berührungsstellen der Bauteile kann bei Einwirken von Feuchte und aggressiven Gasen *Korrosion* auftreten. Korrosionserscheinungen lassen sich oft nicht vermeiden, sondern nur

Tafel 2.1 Gestaltungsregeln und -prinzipien, Vorgehensweise

a) Forderungen

Gegenstand	Forderungen
Funktion	funktionsgerecht, toleranzgerecht, Erfüllen der gestellten Aufgabe und der sich daraus ableitenden Teilaufgaben
Werkstoff und Dimensionierung	werkstoffgerecht, beanspruchungsgerecht, formänderungsgerecht, verschleißgerecht, korrosionsgerecht
Herstellung	fertigungsgerecht, verarbeitungsgerecht, montagegerecht, automatisierungsgerecht, stückzahlgerecht, justiergerecht, normgerecht
Ergonomie (Beziehung Mensch – Gerät)	gebrauchsgerecht, formgerecht, bediengerecht, handhabungsgerecht
Kontrolle	kontroll- bzw. prüfgerecht
Gebrauch und Instandhaltung	gebrauchsgerecht, instandhaltungsgerecht, wartungsgerecht, transportgerecht
Recycling	wiederverwendungsgerecht (ausführliche Darstellung s. [4])
Kosten	kostengerecht

b) Gestaltungsprinzipien, Auswahl nach [12]

Gestaltungsprinzip	Beispiele, Erläuterungen
● Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung	Kräfte sind auf kürzesten Wegen in die Auflagerstellen zu leiten. Schroffe Kraftumlenkungen und Störungen des Kraftflusses (z. B. Kerben) vermeiden (s. Bild 7.7). Kraftleitende Teile so anordnen, daß in ihnen bevorzugt Zug bzw. Druck entsteht. Biegung vermeiden!
● Prinzip der abgestimmten Verformung	s. Klebverbindung in Bild 4.13b und e
● Prinzipien der Aufgabenteilung	Funktionentrennung, Funktionenintegration (z. B. Spannbandlagerung von Meßspulen, s. Bild 8.54), Strukturtrennung (Gehäuseteilung zwecks Montage), Strukturintegration (Leiterplatte, s. Bild 5.6)
● Prinzip Funktionswerkstoff an Funktionsstelle	Gleitlagerbuchse in Gehäusewand, s. Bilder 8.12 und 8.26
● Prinzip des Vermeidens von Überbestimmtheiten	Überbestimmtheiten führen zu Zwängen, zu erhöhten Bauteilbeanspruchungen und Verformungen sowie Verschleiß (Beispiele s. Tafel 2.14/5.)
● Prinzipien der fehlerarmen Anordnungen	Wahl einer Struktur mit minimierten Fehlern (Fehlerminimierung, innozente bzw. invariante Anordnungen, Fehlerkompensation, z. B. Bilder 10.6e und 10.7c)

Tafel 2.1 Fortsetzung

c) Vorgehensweise beim Gestalten (Beispiel)

1. Aufgabe:

Gegeben: Lage der Bohrungen
A, B, C (Wirklflächen)

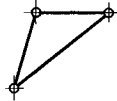


Gesucht: Feste Verbindung der
Bohrungen (Hebel)

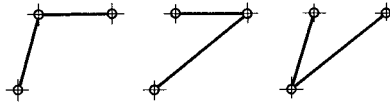


2. Grundform (Variation der Verbindung):

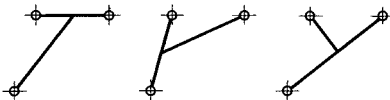
2.1 geschlossen



2.2 offen
(2.2.1, 2.2.2, 2.2.3)



2.3 verzweigt
(2.3.1, 2.3.2, 2.3.3)



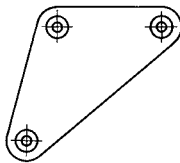
3. Fertigung und Werkstoff:

- 3.1 aus einem Stück:
 - 3.1.1 Metallformteil (Guß)
 - 3.1.2 Kunststoffformteil
 - 3.1.3 Biege- und Stanzteil

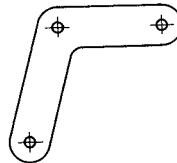
- 3.2 zusammengesetzt unter Anwendung von
 - 3.2.1 Stoffschluß
 - 3.2.2 Formschluß
 - 3.2.3 Kraftschluß

4. Darstellung (Beispiele):

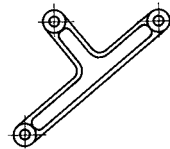
Ergebnisse durch Kombination von
2.1 und 3.2.1



2.2.1 und 3.1.3



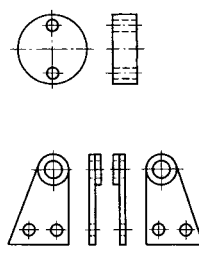
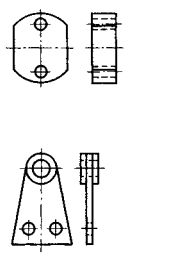
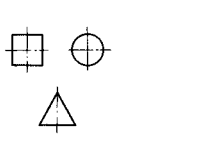
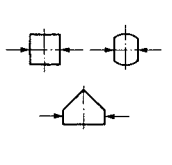
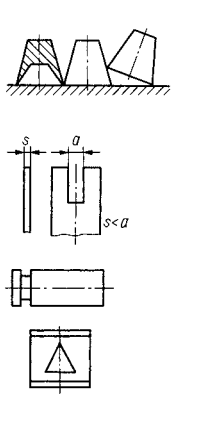
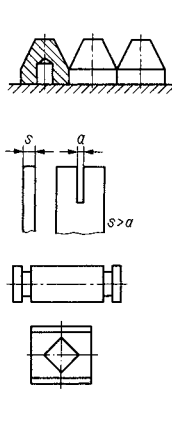
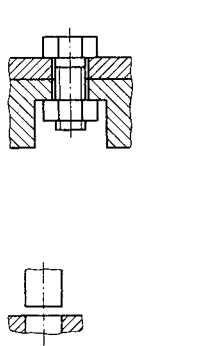
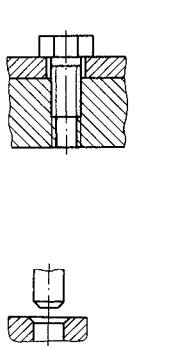
2.3.3 und 3.1.1



mindern, weil die Ursachen nicht zu beseitigen sind. Bei Kontaktbauelementen hat die Korrosion Einfluß auf den Übergangswiderstand. Deshalb sind meist entsprechende Schutzschichten notwendig. Saure oder basische Anteile in Flußmitteln für Lote z. B. fördern die Korrosion (s. Abschn. 4.1.2). Der Konstrukteur muß durch zweckmäßige Werkstoffwahl und Bauteilgestaltung der Korrosion entgegenwirken. Die zu wählenden Maßnahmen hängen von der Art der zu erwartenden Korrosion ab.

Das Beachten weiterer Einflüsse, wie Kosten (**Bild 2.8a**), Stückzahl, betriebliche Bedingungen, volkswirtschaftliche Bedeutung usw. führt zu unterschiedlichen Ergebnissen, da es nicht möglich ist, allen Regeln vollständig zu genügen.

Tafel 2.2 Gestaltungsrichtlinien für automatisierte Montage und Demontage
Auswahl nach [12]

Ungünstige Lösung	Forderungen, Maßnahmen, Regeln	Günstige Lösung
	<p>Erkennbarkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> – Sorge für lagegerechtes Erkennen des Bauteils, z. B. durch eindeutige Asymmetrie! – Vermeide Bauteile, die sich zwar voneinander unterscheiden, aber gleiche Hauptabmessungen besitzen! – Strebe großen Wiederholteilgrad an und gestalte ähnliche Teile zu konstruktiv gleichen um! 	
	<p>Greifbarkeit</p> <ul style="list-style-type: none"> – Vermeide labile, flexible und oberflächenempfindliche Bauteile! – Strebe einheitliche Greifflächen und zusammenhängende, ausgeprägte Begrenzungsflächen an! 	
	<p>Handhabbarkeit, Transport, Zuführung</p> <ul style="list-style-type: none"> – Wähle Bauteilgestalt so, daß sie Handhabung und Speicherung ermöglicht und begünstigt (Stapel- und Schüttfähigkeit, Roll-, Gleit- oder Hängefähigkeit), aber Verschachteln, Verklemmen und Verhaken vermeidet! – Wähle zusammenhängende Begrenzungsflächen! – Strebe Symmetrie um möglichst viele Achsen und gleiche Symmetrieachsen für die Innen- und Außenform an! – Behalte die bei der Fertigung einmal erreichte Ordnung der Bauteile bei! 	
	<p>Fügbarekeit</p> <ul style="list-style-type: none"> – Wähle Baugruppen- bzw. Geräteaufbau und entsprechende Bauteilgestalt so, daß nur eine Montagerichtung erforderlich ist! – Minimiere Zahl der Bauteile je Baugruppe bzw. Gerät! – Wähle einfache Fügevorgänge, nutze Elastizität der Bauteile (Schnappverbindungen)! – Vermeide Halteoperationen und beachte Zugänglichkeit für Werkzeug, Greifer bzw. Teilezuführung! – Ermöglice gegenseitiges Zentrieren nachfolgend zu montierender Bauteile und treffe Vorkehrungen für eine Selbstpositionierung! – Nutze Schwerkraft als Fügehilfe! 	

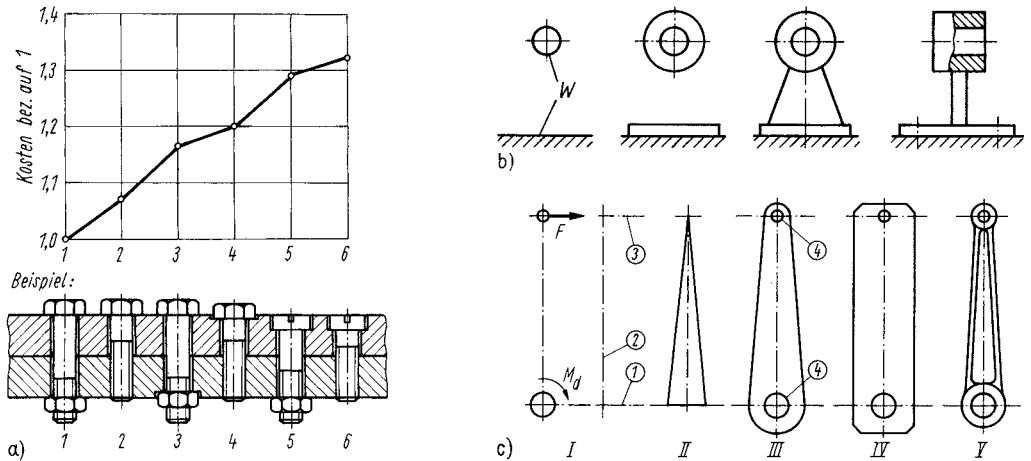


Bild 2.8 Gestaltungsbeispiele

a) Beeinflussung der Kosten bei der Gestaltung von Schraubverbindungen; b) Gestalten eines Lagerbocks durch Verwenden einfacher Formelemente, Vorgehensweise von „innen“ nach „außen“ (W Wirkflächen); c) Vorgehensweise beim Gestalten einer Kurbel

① Welle; ② Kurbelarm; ③ Griff; ④ Koppelstellen

I) Aufgabenstellung

II) Erfüllung der Funktion nach Festigkeitsbedingungen ohne Berücksichtigung der Koppelstellen

III) Gestaltung des Kurbelarms von den Koppelstellen ausgehend von „innen“ nach „außen“ (Grundform)

IV) Gestaltung des Kurbelarms als Blechteil (Einzelfertigung; nicht beanspruchungsgerecht)

V) Gestaltung des Kurbelarms als Gußteil (für größere Stückzahlen)

2.1.4 Arbeitsschritte beim Gestalten

Das Gestalten technischer Gebilde ist unter Berücksichtigung aller in diesem Abschnitt und darüber hinaus der in der Literatur angegebenen Gestaltungsregeln und -hinweise (s. Tafeln 2.1 und 2.2) vorzunehmen. Das Primat kommt der Erfüllung der Funktion zu. Deshalb ist grundsätzlich mit dem Gestalten der Bauteile zu beginnen, die die geforderte *Hauptfunktion* realisieren und danach mit den Teilen, die *Nebenfunktionen* erfüllen, fortzufahren. Bei Einzelteilen sind das die Wirkflächen bzw. Koppelstellen mit anderen Bauteilen, in Baugruppen und Geräten die funktionsbestimmenden Bauteile. Es gilt der Grundsatz:

- Vom Wichtigem zum weniger Wichtigem.

Beim Strukturieren von Baugruppen und Geräten gilt auch der Grundsatz:

- Von „innen“ nach „außen“.

Eine umgekehrte Vorgehensweise birgt die Gefahr in sich, nach dem Gestalten außen liegender Teile nicht genügend Raum für die innen anzuordnenden zu haben. Das trifft besonders für nach außen abgeschlossene Baugruppen (Schalter, Getriebe, Meßgeräte usw.) zu. Einfache Beispiele zeigen die Bilder 2.8 b und c sowie Tafel 2.1 c. Beim Gestalten der Kurbel im Bild 2.8 c gelangt man unter Erfüllung der Festigkeitsbedingungen und der Funktion zunächst zu der unter II dargestellten Form des Kurbelarms. Die Berücksichtigung der Koppelstellen (Befestigen auf einer Welle und Anbringen eines Griffes) führt beim Gestalten von „innen“ nach „außen“ zu der unter III dargestellten Grundform. Fertigungstechnische Gesichtspunkte ergeben dann in Abhängigkeit von der erforderlichen Stückzahl die unter IV und V skizzierten Ausführungsvarianten.

In der Literatur [12] [1.3] werden Vorgehensweisen empfohlen, die die Arbeitsschritte als Algorithmus formulieren oder allgemeine Leitlinien für das Gestalten angeben. Ziel jeder konstruktiven Arbeit sollte es sein, durch gewichtetes Anwenden der zahlreichen Regeln bei Beachten der vielfältigen Einflüsse eine optimale technische Lösung zu erhalten.

2.2 Normzahlen und Normmaße [3]

Bei der Festlegung physikalischer, technischer und ökonomischer Größen (z. B. geometrische Abmessungen, elektrische Spannungen, Leistungen, Drücke, Übersetzungen) sind aus Gründen der Wirtschaftlichkeit Einschränkungen erforderlich. Diese werden über Normzahlen und Normmaße geregelt, die eine logarithmisch aufgebaute Zahlenauswahl darstellen.

Normzahlen. Diese Zahlen sind geringfügig 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 genormt. Für den Stufensprung q und die zugehörigen Reihen gilt $q_r = \sqrt[r]{10}$ mit $r = 5, 10, 20$ und 40 (*Grundreihen R 5 bis R 40*). Die für den normalen Gebrauch vorgesehenen Hauptwerte dieser Grundreihen (**Tafel 2.3**) sind geringfügig gerundet. Durch Benutzung jedes p -ten Gliedes einer Grundreihe entstehen *abgeleitete Reihen*. So kann man aus der Reihe $R 20$ durch Auswahl jedes dritten Gliedes die abgeleitete Reihe $R 20/3$ bilden. r stellt in obiger Beziehung die Stufenzahl dar.

Tafel 2.3 Normzahlen nach DIN 323 (Auszug)

Grundreihen Hauptwerte				Rundwertreihen Rundwerte			Grundreihen Hauptwerte				Rundwertreihen Rundwerte		
R 5	R 10	R 20	R 40	R' 10	R' 20	R' 40	R 5	R 10	R 20	R 40	R' 10	R' 20	R' 40
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		3,15	3,15	3,15	3,2	3,2	3,2
			1,06			1,05				3,35			3,4
			1,12		1,1	1,1			3,55	3,55		3,6	3,6
			1,18			1,2				3,75			3,8
	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
			1,32			1,3				4,25			4,2
		1,4	1,4		1,4	1,4			4,5	4,5		4,5	4,5
			1,5			1,5				4,75			4,8
1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
			1,7			1,7				5,3			5,3
		1,8	1,8		1,8	1,8			5,6	5,6		5,6	5,6
			1,9			1,9				6,0			6,0
	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
			2,12			2,1				6,7			6,7
		2,24	2,24		2,2	2,2			7,1	7,1		7,1	7,1
			2,36			2,4				7,5			7,5
2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5		8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
			2,65			2,6				8,5			8,5
		2,8	2,8		2,8	2,8			9,0	9,0		9,0	9,0
			3,0			3,0				9,5			9,5
							10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

Die Reihen können durch Multiplizieren mit den ganzzahligen Zehnerpotenzen ... 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 ... beliebig nach unten oder oben erweitert werden. Die Reihen R' gelten auch als Normmaße in mm.

Bereitet die Anwendung der Hauptwerte Schwierigkeiten oder sind handelsübliche Größen zu berücksichtigen, können die Normzahlen stark gerundet werden (z. B. bei $R 10$ statt 6,3 Wert 6). Aus den Rundwerten ergeben sich die für die praktische Anwendung wichtigen *Rundwertreihen R' und R''*, wobei die Reihe R'' die größte Rundung aufweist und möglichst zu vermeiden ist. Eine der bekanntesten Rundwertreihen mit den Werten 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 usw. findet für die Stufung von Geld, Wägestücken usw. Anwendung.

Normmaße. Die Werte der Reihen R' dienen entsprechend DIN 323 (s. Tafel 2.3) als Normmaße. Sie werden als Vorzugswerte für Längenmaße usw. verwendet.

- Für die meisten konstruktiven Probleme stellt die Reihe $R' 20$ die zweckmäßigste Zahlenauswahl dar.

Die Nennwerte elektrischer Bauelemente (Widerstände, Kondensatoren usw.) sind dagegen nach einer anderen geometrischen Reihe, der *Internationalen E-Reihe*, gestuft, bei der $q_r = \sqrt[r]{10}$ mit $r = 6, 12, 24, 48$ usw. festgelegt ist (Reihen *E 6, E 12* usw., s. **Anhang**, Abschn. A8).

Die Stufung von Zahlenwerten nach arithmetischen Reihen, bei denen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Werten eine konstante Differenz besteht, sind zu vermeiden, da sich eine sehr ungleichmäßige Stufung ergibt (s. Aufgabe 2.1 im Abschn. 2.5).

2.3 Toleranzen und Passungen

[3]

Alle zu fertigenden Werkstücke weichen von den geforderten Maßen ab. Diese Abmaße sind abhängig von den zur Produktion verwendeten Maschinen und Werkzeugen, der Temperaturdifferenz zwischen Bearbeitung und Anwendung, von Spannungen im Werkstück, seinen elastischen Eigenschaften usw. Aufgabe des Konstrukteurs ist es, die Abmaße 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 gezogen werden. Um eine rationelle Fertigung und vor allem einen gesicherten Austauschbau zu ermöglichen, sind genormte Richtlinien geschaffen worden. 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*).

2.3.1 Toleranzen

In der Technik werden geometrische Toleranzen und Toleranzen physikalischer, chemischer u. a. 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 (Höhe, 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 demgemäß

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

Für spezielle Konstruktionselemente gibt es darüber hinaus Sondertoleranzen, z. B. für Zahnräder (s. Abschn. 11.3.4.7) oder für Gewinde.

Grundbegriffe. Gepaarte Teile berühren sich an den Paßflächen. Man unterscheidet dabei i. allg. 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 .

Am Beispiel einer Bohrung und einer Welle (**Bild 2.9**) sind in **Tafel 2.4** die wichtigsten Bezeichnungen bei tolerierten Maßen nach DIN EN ISO 286 zusammengestellt.

Sie gelten sinngemäß auch für flache Teile.

Für die Tolerierung von Maßen und deren Angabe in Zeichnungen hat man grundsätzlich drei Möglichkeiten (**Bild 2.10**), s. auch **Anhang**, Abschn. A4.4.