

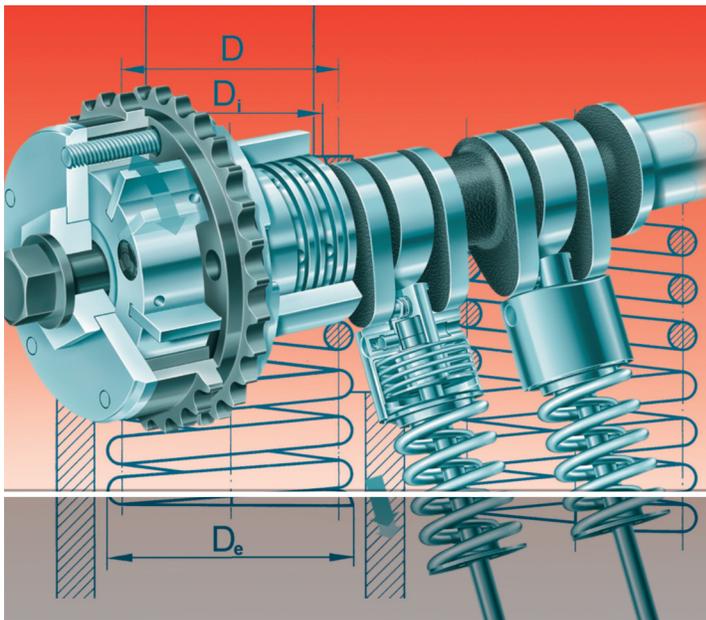
Decker

Bonusmaterial

- MDESIGN Student
- Arbeitsblätter
- Videos u. v. a.

Maschinen- elemente

Funktion, Gestaltung und Berechnung



19., aktualisierte Auflage

HANSER

Das fängt ja gut an!

MDESIGN HERUNTERLADEN UND ERFOLGREICH NUTZEN



MDESIGN 20|14

STUDENT EDITION

BERECHNUNG

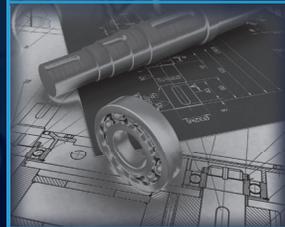
INFORMATION

DOKUMENTATION



Kostenfreier Download der MDESIGN STUDENT EDITION
unter www.mdesign.info/decker

Die MDESIGN STUDENT EDITION darf nicht für gewerbliche Zwecke genutzt werden.



MDESIGN ist die führende Auslegungs- und Berechnungssoftware für Maschinenelemente in Konstruktion, Entwicklung und Technik.

Doch MDESIGN leistet noch mehr. MDESIGN bietet eine ausführliche Sammlung an Formeln und Normenübersichten, einen schnellen Zugang zu Bauteilkatalogen und zahlreichen Zuliefererinformationen. In der industriellen Anwendung vereinheitlicht MDESIGN seit Jahren die Konstruktionsprozesse und dient an vielen tausend Arbeitsplätzen als unverzichtbares Werkzeug für Optimierung, Nachweis und Dokumentation von Bauteilen.

MDESIGN

Vertriebsgesellschaft mbH

Königsallee 45
44789 Bochum

Tel.: +49 234 30703-60

Fax: +49 234 30703-69

www.mdesign.de

G Grundlagen	15
1 Konstruktionstechnik	15
2 Maße, Toleranzen und Passungen.....	69
3 Gestaltabweichungen der Oberflächen	83
N Nichtlösbare Verbindungen	91
4 Schmelzschweißverbindungen.....	91
5 Pressschweißverbindungen.....	122
6 Lötverbindungen	138
7 Klebverbindungen	148
8 Nietverbindungen.....	161
L Lösbare Verbindungen	177
9 Reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	177
10 Befestigungsschrauben	207
11 Bewegungsschrauben	251
12 Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	259
13 Stift- und Bolzenverbindungen.....	275
14 Federn	284
D Drehbewegungselemente	334
15 Achsen und Wellen.....	334
16 Tribologie: Reibung, Schmierung und Verschleiß	391
17 Gleitlager	409
18 Wälzlager	462
19 Lager- und Wellendichtungen	488
20 Wellenkupplungen und -bremsen.....	498
Z Zahnräder	557
21 Grundlagen für Zahnräder und Getriebe	557
22 Abmessungen und Geometrie der Stirn- und Kegelräder	571
23 Gestaltung und Tragfähigkeit der Stirn- und Kegelräder.....	599
24 Zahnradpaare mit sich kreuzenden Achsen.....	645
H Hülltriebe.....	667
25 Kettentriebe	667
26 Flachriementriebe	684
27 Keilriementriebe.....	706
28 Synchron- oder Zahnriementriebe	720
F Führungselemente für Flüssigkeiten und Gase.....	729
29 Rohrleitungen.....	729
30 Armaturen.....	754

Decker

Maschinenelemente

Funktion, Gestaltung und Berechnung

Decker

Maschinenelemente

Funktion, Gestaltung und Berechnung

Bearbeitet von Frank Rieg, Frank Weidermann,
Gerhard Engelken und Reinhard Hackenschmidt

19., aktualisierte Auflage

Mit 871 Bildern, 164 Berechnungsbeispielen
und einem Tabellenband mit 334 Tabellen
und Diagrammen

HANSER

Autoren:

Studiendirektor i. R. Karl-Heinz Decker (†), Berlin

Studiendirektor i. R. Dipl.-Ing. Karlheinz Kabus (†), Berlin

Bearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg, Universität Bayreuth, Federführender Bearbeiter
(Kapitel 1.6, 14 bis 17, 19, 20)

Prof. Dr.-Ing. Frank Weidermann, Hochschule Mittweida
(Kapitel 1.2, 1.4, 1.5, 4, 23, 24)

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Engelken, Hochschule RheinMain, CIM-Zentrum Rüsselsheim
(Kapitel 1.1, 2, 3, 18, 21, 22, 25 bis 30)

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Reinhard Hackenschmidt, Universität Bayreuth
(Kapitel 1.3, 5 bis 13)

Autoren der Berechnungssoftware

Studiendirektor Dipl.-Ing. Bernd Kretschmer, Staatliche Technikerschule Berlin

Studienrätin Dipl.-Ing. Bettina Baumgart, Staatliche Technikerschule Berlin

Studienrat Dr.-Ing. Peter Möhler, Staatliche Technikerschule Berlin

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg, Universität Bayreuth

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

ISBN 978-3-446-43856-9

E-Book-ISBN 978-3-446-43739-5

Einbandbild: Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG Herzogenaurach

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Bilder wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grunde ist das im vorliegenden Buch enthaltene Programm-Material mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

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 Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2014 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Projektleitung: Jochen Horn, Ute Eckardt

Herstellung: Katrin Wulst

Satz: Beltz Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza

Druck und Bindung: Friedrich Pustet KG, Regensburg

Printed in Germany

**»Der Weltuntergang steht bevor,
aber nicht so, wie Sie denken.
Dieser Krieg jagt nicht alles in die Luft,
sondern schaltet alles ab.«**



Tom DeMarco
Als auf der Welt das Licht ausging

ca. 560 Seiten. Hardcover
ca. € 19,99 [D] / € 20,60 [A] / sFr 28,90
ISBN 978-3-446-43960-3
Erscheint im November 2014

**Hier klicken zur
Leseprobe**

Sie möchten mehr über Tom DeMarco und seine Bücher erfahren.
Einfach reinklicken unter www.hanser-fachbuch.de/special/demarco

Vorwort

Von dem nun in der 19. Auflage vorliegenden Lehrbuch **Decker Maschinenelemente** wurde die 1. Auflage 1963 von Karl-Heinz Decker verfasst und hat seitdem Generationen von Ingenieuren und Technikern während des Studiums und im Berufsleben begleitet. Es ist für den Unterrichts- und Vorlesungsgebrauch an Fachschulen, Fachhochschulen und Universitäten gedacht, aber auch für das Selbststudium und für die Konstruktionspraxis geeignet. Die wichtigsten Maschinenelemente sind in einer knappen und übersichtlichen Form dargestellt. Dabei ist jede Maschinenelementgruppe in sich geschlossen behandelt, damit der Lehrstoff wahlweise und von anderen Elementen unabhängig durchgearbeitet werden kann.

Das Fachgebiet Maschinenelemente ist sehr umfangreich und erweitert sich durch neue Entwicklungen und Forschungsergebnisse ständig. Davon können im Rahmen der Ausbildung zum Ingenieur oder Techniker nur die wesentlichen Hauptgebiete behandelt werden. Die Vertiefung dieser Kenntnisse muss sich dann durch die Beschäftigung mit Konstruktionsproblemen in der Praxis ergeben.

Zum besseren Verständnis sind weit über hundert Berechnungsbeispiele jeweils im Anschluss an den behandelten Stoff eingefügt und zur Unterscheidung vom übrigen Inhalt farbig unterlegt. Auf die Herleitung der Berechnungsgleichungen wurde besonderer Wert gelegt; trägt dies doch zum tieferen Verständnis bei. Mit den zahlreichen Tabellen und Diagrammen, die im beiliegenden Tabellenband zusammengefasst wurden, werden dem Leser die Unterlagen in die Hand gegeben, die er zum Berechnen der Maschinenelemente braucht. Im Lehrbuch sind nur die tabellarisch geordneten Angaben und Diagramme vorhanden, die zum Verständnis des Textes notwendig sind. Der Tabellenband kann auch unabhängig vom Lehrbuch benutzt werden, vorzugsweise in Verbindung mit der Formelsammlung **Decker Maschinenelemente – Formeln**.

Die in den letzten Jahren erfolgte Herausgabe neuer Normen machte eine Überarbeitung bzw. Neubearbeitung mehrerer Kapitel erforderlich. Dabei wurden auch die neuen umfangreichen Berechnungsverfahren berücksichtigt.

Ab dieser 19. Auflage ist dem Lehrbuch keine CD/DVD mehr beigelegt, sondern alle Daten (Excel-Arbeitsblätter, Aufgaben, Beispiele, Berechnungstools) sind nunmehr online unter www.hanser-fachbuch.de/decker verfügbar, hinzu kommt jetzt auch das Programmpaket BayMP (Bayreuther Maschinenelemente-Programme). Die unter www.baymp.de erhältlichen Programme ermöglichen die Auslegung wichtiger Maschinenelemente (Wellen, Lager, Federn, Getriebe, Kupplungen usw.) entweder online, computergestützt unter Windows-, Linux- oder Mac-OS, auf verschiedenen wissenschaftlichen Taschenrechnern oder unter Android für mobile Geräte wie Smartphones, Mobiltelefone, Netbooks und Tablet-Computer.

Ein Link für die Nutzung der Berechnungssoftware **MDESIGN Student** ermöglicht es Studenten und Auszubildenden, als zukünftige Mitarbeiter in Konstruktion und Entwicklung professionelle Werkzeuge für die Auslegung und Berechnung von Maschinenelementen kennenzulernen und zu nutzen.

Mit diesen Hilfen kann man eine Vielzahl von Aufgaben aus dem im gleichen Verlag erschienenen zugehörigen Aufgabenbuch **Decker Maschinenelemente – Aufgaben** vollständig oder teilweise lösen. Dessen 14. Auflage ist umfassend auf die vorliegende 19. Auflage dieses Lehrbuches abgestimmt.

Allen Kolleginnen und Kollegen von Fach- und Hochschulen und aus der Industrie, die durch Kritik und Anregungen zur Verbesserung und Erweiterung des Buches beigetragen haben, sei herzlich gedankt, ebenso den vielen Firmen, die Unterlagen zur Verfügung stellten, sowie Herrn Prof. h.c. Dr.-Ing. *Willi Gründer*, Geschäftsführer der Fa. TEDATA Gesellschaft für technische Informationssysteme mbH Bochum, für die Bereitstellung des Programms MDESIGN. Verlag und Bearbeiter hoffen, dass dieses Buch wie bisher den Ingenieuren und Technikern während des Studiums und in der Praxis ein nützlicher Helfer sein wird.

*Frank Rieg, Frank Weidermann,
Gerhard Engelken, Reinhard Hackenschmidt*

Jetzt neu: Die interaktive Website zum Buch

www.hanser-fachbuch.de/decker



Hier finden Sie

- ⚙ Maschinenelemente-Bildergalerien
- ⚙ Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen
- ⚙ Professionelle Berechnungssoftware MDESIGN zum Testen
- ⚙ Berechnungsprogramme verschiedener Maschinenelemente
- ⚙ Themenbezogene Videos
- ⚙ Formeln
- ⚙ Zusatzmaterialien für Dozenten
- ⚙ Buchtipps
- ⚙ und vieles mehr...

Einfach mal reinklicken!

Hinweise zur Benutzung des Buches

Bei der Berechnung von Maschinenelementen werden zahlreiche Gesetze und Rechenverfahren der Technischen Mechanik und der Festigkeitslehre angewendet. Deshalb sind Grundkenntnisse auf diesem Fachgebiet erforderlich. Hierfür wird das Buch *Mechanik und Festigkeitslehre* von Karlheinz Kabus empfohlen, erschienen im Carl Hanser Verlag München 2013. Beide Bücher sind weitgehend aufeinander abgestimmt.

Die Bilder, Tabellen, Diagramme und Formeln sind kapitelweise nummeriert. Alle Tabellen befinden sich im beiliegenden Tabellenband, ebenso die für Berechnungen benötigten Diagramme.

Wegen der zur Zeit auf vielen Gebieten der Technik stattfindenden Übernahme internationaler und europäischer Normen in das deutsche Normenwerk als DIN ISO- und DIN EN-Normen ist es sehr schwierig, den gerade aktuellen Stand zu erfassen. Bei den Werkstoffen mit inzwischen geänderten Bezeichnungen sind die neuen Kurzzeichen angegeben worden.

Der Inhalt von DIN-Normen wird mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Die Festigkeits- und Tragfähigkeitsberechnungen sind überwiegend so aufgebaut, dass Bauteile mit vorgegebenen Abmessungen und Werkstoffen nachgerechnet werden können, wie dies auch in der Konstruktionspraxis üblich ist. Den Berechnungsgleichungen ist jeweils ihre Bedeutung in Kursivschrift vorangestellt. Nach der Formel folgt eine ausführliche Legende mit den zu bevorzugenden SI-Einheiten oder abgeleiteten SI-Einheiten und mit der Bedeutung der einzelnen Größen sowie entsprechenden Hinweisen. Es wurden fast ausschließlich Größengleichungen verwendet, Zahlenwertgleichungen nur in seltenen Ausnahmefällen.

Die Bilder zu den Beispielen sind Berechnungsskizzen, bei denen die Normen für technische Zeichnungen weitgehend angewendet wurden. Innerhalb der Berechnungen in den Beispielen ist jeweils mit den angegebenen Zwischenergebnissen weitergerechnet worden, d. h., diese Werte wurden in den Rechner wieder neu eingegeben. Beim Weiterrechnen mit dem vom Rechner angezeigten ungerundeten Werten ergeben sich teilweise geringfügig abweichende Endergebnisse.

Das Arbeiten nach diesem Lehrbuch in der Praxis erfolgt grundsätzlich auf eigene Verantwortung, eine Gewähr kann nicht übernommen werden. Es sind stets die letzten Ausgaben der Normen und technischen Regeln sowie der Firmendruckschriften zu beachten.

Bei den *Formelzeichen* ist dieses Werk weitgehend an die Vorgaben in den DIN-Normen angelehnt. Es wurde aber bewusst davon abgewichen, wenn sich Widersprüche ergeben, z. B. bei der Verwendung unterschiedlicher Formelzeichen für denselben physikalischen Sachverhalt in verschiedenen Normen und Druckschriften. Dies trifft u. a. – wie allgemein üblich – für den Reibwert (die Reibungszahl) μ und für die Querkontraktionszahl ν zu. In diesen Fällen folgt das Lehrbuch der Darstellung, wie sie in den meisten Lehrbüchern üblich ist.

Bei den *Maßeinheiten* werden die Einheiten bevorzugt benutzt, mit denen in der Praxis üblicherweise gearbeitet wird. Die Drehzahl wird i. Allg. in min^{-1} angegeben. Für mechanische Spannungen und Drücke wird konsequent N/mm^2 angegeben.

Alle zusätzlichen Arbeitsmaterialien in Form von Berechnungsprogrammen, Excel-Arbeitsblättern und Programme zur Berechnung von ausgewählten Maschinenelementen sind nunmehr online verfügbar unter www.hanser-fachbuch.de/decker. Die kostenfreie Nutzung der Auslegungs- und Berechnungssoftware MDESIGN Student ist unter www.mdesign.info/decker möglich.

Inhaltsverzeichnis

G Grundlagen

1 Konstruktionstechnik	15
1.1 Normen und Richtlinien	15
1.2 Methodisches Konstruieren	16
1.3 Datenverarbeitung in der Konstruktion	19
1.4 Festigkeitsberechnung	23
1.5 Betriebsfestigkeit nach der FKM-Richtlinie 183	37
1.6 Einführung in die Finite-Elemente-Analyse	56
1.7 Literatur	67
2 Maße, Toleranzen und Passungen	69
2.1 Normzahlen und Normmaße	69
2.2 Geometrische Produktspezifikation	70
2.3 Maße, Abmaße und Toleranzen	72
2.4 ISO-Toleranzsystem	73
2.5 Passungsarten und Passungssysteme	75
2.6 Passungsauswahl	78
2.7 Tolerierungsgrundsätze	80
2.8 Literatur	81
3 Gestaltabweichungen der Oberflächen	83
3.1 Form- und Lagetoleranzen	84
3.2 Anwendung der Maximum-Material-Bedingung	85
3.3 Hinweise für die Praxis	86
3.4 Rauheit der Oberflächen	87
3.5 Literatur	90

N Nichtlösbare Verbindungen

4 Schmelzschweißverbindungen	91
4.1 Verfahren	91
4.2 Werkstoffe, Schweißzusätze, Schweißpositionen	94
4.3 Nahtarten und -formen, Gütesicherung	97
4.4 Gestaltung	102
4.5 Berechnung der Spannungen in Schweißnähten	104
4.6 Schweißverbindungen im Maschinen- und Gerätebau	115
4.7 Literatur	120
5 Pressschweißverbindungen	122
5.1 Verfahren, Werkstoffe	122
5.2 Punktschweißverbindungen	126
5.3 Buckelschweißverbindungen	131
5.4 Abbrenn-Stumpfschweißverbindungen	133
5.5 Schweißen von Kunststoffen	134
5.6 Literatur	137
6 Lötverbindungen	138
6.1 Verfahren, Lote	138
6.2 Gestaltung von Lötverbindungen	143
6.3 Berechnung von Lötverbindungen	145
6.4 Literatur	147
7 Klebverbindungen	148
7.1 Wirkmechanismen	148

7.2	Klebstoffe	150
7.3	Gestaltung und Festigkeit der Klebverbindungen	152
7.4	Berechnung von Klebverbindungen	155
7.5	Literatur	159
8	Nietverbindungen	161
8.1	Nietformen, Werkstoffe, Herstellung der Verbindungen	161
8.2	Berechnung von Nietverbindungen	163
8.3	Nietverbindungen im Maschinen- und Gerätebau	167
8.4	Nietverbindungen im Leichtmetallbau	170
8.5	Stanznieten	174
8.6	Hybridfügen – Stanznietkleben	176
8.7	Literatur	176
L	Lösbare Verbindungen	
9	Reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	177
9.1	Fügevorgang und Gestaltung	177
9.2	Grundlagen der Berechnung zylindrischer Pressverbände	179
9.3	Berechnung bei rein elastischer Beanspruchung	183
9.4	Berechnung bei elastisch-plastischer Beanspruchung	192
9.5	Einpresskraft und Fügetemperaturen	195
9.6	Spannelementverbindungen	196
9.7	Klemmverbindungen	203
9.8	Literatur	206
10	Befestigungsschrauben	207
10.1	Gewinde	207
10.2	Ausführung von Schrauben und Muttern	209
10.3	Werkstoffe	214
10.4	Korrosionsschutz	217
10.5	Herstellung der Schrauben und Muttern	218
10.6	Sichern von Schraubenverbindungen	218
10.7	Berechnung: Grundlagen und Verbindungsarten	221
10.8	Berechnung: Vordimensionierung und Überschlag	222
10.9	Berechnung: Kraftfluss, Kerbwirkungen, Gestaltung	223
10.10	Anziehverfahren	226
10.11	Berechnung: Schraubenanziehmoment, Schraubenbeanspruchung beim Anziehen, Anziehfaktor	227
10.12	Berechnung: Nachgiebigkeit von Schraube und Bauteilen	231
10.13	Berechnung: Bleibende Verformung durch Setzen	233
10.14	Wirkungen in vorgespannten Schraubenverbindungen durch eine Betriebslängskraft	235
10.15	Berechnung: Haltbarkeit der Schraubenverbindungen	240
10.16	Systematische Berechnung längsbeanspruchter Schraubenverbindungen	242
10.17	Gestaltung und Berechnung querbeanspruchter Schraubenverbindungen	245
10.18	Spezialschrauben	248
10.19	Literatur	249
11	Bewegungsschrauben	251
11.1	Bauformen	251
11.2	Gewinde, Werkstoffe	251
11.3	Kräfte, Reibung, Wirkungsgrad, Selbsthemmung	252
11.4	Berechnung der Haltbarkeit und der Stabilität	255
11.5	Kugelgewindetrieb	256
11.6	Literatur	258
12	Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	259
12.1	Längskeilverbindungen	259
12.2	Passfederverbindungen	262
12.3	Keilwellenverbindungen	265
12.4	Zahnwellenverbindungen	267
12.5	Polygonwellenverbindungen	268

12.6	Kegelverbindungen	270
12.7	Stirnzahnverbindungen	272
12.8	Literatur	274
13	Stift- und Bolzenverbindungen	275
13.1	Stifte	275
13.2	Bolzen	277
13.3	Festigkeitsberechnung	278
13.4	Literatur	283
14	Federn	284
14.1	Kennlinien, Federarbeit	284
14.2	Schwingverhalten	285
14.3	Zusammenwirken mehrerer Federn	286
14.4	Werkstoffe, Halbzeuge	288
14.5	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten oder Stäben	288
14.6	Tellerfedern als Druckfedern	300
14.7	Gewundene Schenkelfedern als Drehfedern	309
14.8	Stabfedern als Drehfedern	315
14.9	Spiralfedern als Drehfedern	318
14.10	Blattfedern als Biegefedern	320
14.11	Ringfedern als Druckfeder	322
14.12	Lufffedern	325
14.13	Weitere Metallfedern	327
14.14	Gummifedern	330
14.15	Literatur	332
D	Drehbewegungselemente	
15	Achsen und Wellen	334
15.1	Werkstoffe, Gestaltung	335
15.2	Biegemomente, Längskräfte und Torsionsmomente	336
15.3	Überschlagsberechnung auf Torsion und Biegung	340
15.4	Achsen und Wellen gleicher Biegebeanspruchung	341
15.5	Berechnung auf Gestaltfestigkeit (Dauerhaltbarkeit)	342
15.6	Durchbiegung	350
15.7	Verdrehwinkel	374
15.8	Kritische Drehzahlen	375
15.9	Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen nach DIN 743	378
15.10	Literatur	389
16	Tribologie: Reibung, Schmierung und Verschleiß	391
16.1	Reibung	391
16.2	Verschleiß	393
16.3	Schmierstoffe (Übersicht)	395
16.4	Schmieröle	396
16.5	Schmierfette	404
16.6	Schmierpasten	405
16.7	Schmierwaxse	405
16.8	Festschmierstoffe	406
16.9	Gleitlacke	406
16.10	Literatur	407
17	Gleitlager	409
17.1	Hydrostatisch und hydrodynamisch geschmierte Gleitlager, Mehrflächenlager, Grenzschichtschmierung	409
17.2	Schmierstoffzufuhr, Schmiersysteme	413
17.3	Abweichungen von der Lagergeometrie	418
17.4	Gleitwerkstoffe	419
17.5	Wärmewirkungen, Kühlung	428
17.6	Gestaltung der Radiallager	429
17.7	Berechnung der hydrodynamisch geschmierten Radiallager	433

17.8	Gestaltung der Axiallager	451
17.9	Berechnung der Axiallager	454
17.10	Wartungsfreie Gleitlager	459
17.11	Literatur	460
18	Wälzlager	462
18.1	Aufbau, Kennzeichen	462
18.2	Belastungsmöglichkeiten, Einbaurichtlinien	466
18.3	Besondere Ausführungen von Wälzlagern	472
18.4	Tragfähigkeit und Lebensdauer	474
18.5	Belastung von Kegelrollen- und Schrägkugellagern	478
18.6	Besondere Belastungsfälle	482
18.7	Grenzdrehzahl	482
18.8	Schmierung der Wälzlager	483
18.9	Literatur	486
19	Lager- und Wellendichtungen	488
19.1	Schleifende Dichtungen	488
19.2	Berührungsfreie Dichtungen	494
19.3	Literatur	497
20	Wellenkupplungen und -bremsen	498
20.1	Einteilung der Wellenkupplungen	498
20.2	Starre Kupplungen	498
20.3	Drehsteife Ausgleichkupplungen	499
20.4	Formschlüssig nachgiebige, drehelastische Wellenkupplungen	505
20.5	Kraftschlüssig drehnachgiebige Kupplungen	518
20.6	Formschlüssige Schaltkupplungen	520
20.7	Reibkupplungen als kraftschlüssige Schaltkupplungen	522
20.8	Flichkraftkupplungen als drehzahlbetätigte Kupplungen	536
20.9	Momentbetätigte Kupplungen als Sicherheitskupplungen	537
20.10	Richtungsbetätigte Kupplungen als Freilaufkupplungen	540
20.11	Bremsen	545
20.12	Mehrmassen-Torsionsschwinger	550
20.13	Literatur	556
 Z Zahnräder		
21	Grundlagen für Zahnräder und Getriebe	557
21.1	Rad- und Getriebearten	557
21.2	Verzahnungsgesetz	560
21.3	Zykloidenverzahnung	564
21.4	Evolventenverzahnung	566
21.5	Literatur	570
22	Abmessungen und Geometrie der Stirn- und Kegelräder	571
22.1	Null-Außenverzahnung	571
22.2	Planverzahnung, Bezugsprofil	573
22.3	Null-Innenverzahnung	573
22.4	Null-Schrägverzahnung	575
22.5	Profilverschiebung	578
22.6	Geometrische Grenzen	583
22.7	Profilüberdeckung	586
22.8	Geradverzahnte Kegelräder	588
22.9	Schräg- und bogenverzahnte Kegelräder	594
22.10	Literatur	597
23	Gestaltung und Tragfähigkeit der Stirn- und Kegelräder	599
23.1	Zahnkräfte an Stirnrädern	599
23.2	Zahnkräfte an Kegelrädern	601
23.3	Reibung, Wirkungsgrad, Übersetzung	605
23.4	Gestaltung der Räder aus Stahl und aus Gusseisen	607

23.5	Gestaltung der Räder aus Kunststoffen	612
23.6	Verzahnpasssysteme, Verzahnungsqualität	614
23.7	Schmierung, Schmierstoffe	617
23.8	Begriffe der Tragfähigkeit	619
23.9	Allgemeine Einflussfaktoren	621
23.10	Zahnfußtragfähigkeit der Stirnräder	626
23.11	Flanken- bzw. Grübchentragfähigkeit der Stirnräder	628
23.12	Zahnfußtragfähigkeit der Kegelräder	631
23.13	Flanken- bzw. Grübchentragfähigkeit der Kegelräder	633
23.14	Berechnung der Räder aus thermoplastischen Kunststoffen auf Tragfähigkeit und Verformung	635
23.15	Laufgeräusche, Ausführung von Getrieben	640
23.16	Literatur	643
24	Zahnradpaare mit sich kreuzenden Achsen	645
24.1	Eingriffsverhältnisse von Schraub-Stirnradpaaren	645
24.2	Zahnkräfte und Wirkungsgrad an Schraub-Stirnradpaaren	646
24.3	Tragfähigkeit von Schraub-Stirnradpaaren, Schmierung	649
24.4	Hyperboloid- und Hypoid-Schraubradpaare	650
24.5	Geometrie der Schneckenradsätze	651
24.6	Zahnkräfte und Wirkungsgrad an Schneckenradsätzen	657
24.7	Gestaltung der Schnecken und Schneckenräder	659
24.8	Schmierung und Verzahnungsqualität von Schneckenradsätzen	661
24.9	Tragfähigkeit von Schneckenradsätzen	663
24.10	Ausführung von Schneckengetrieben	664
24.11	Literatur	665
H Hülltriebe		
25	Kettentriebe	667
25.1	Anordnung von Kettentrieben	667
25.2	Kettenarten, Endverbindung	669
25.3	Kettenräder	672
25.4	Spann- und Führungseinrichtungen	675
25.5	Auswahl von Rollenketten und deren Berechnung	677
25.6	Schmierung der Kettentriebe	681
25.7	Literatur	682
26	Flachriementriebe	684
26.1	Theoretische Grundlage für Riementriebe	684
26.2	Vorspannmöglichkeiten, Triebarten	687
26.3	Riemenwerkstoffe, Endverbindung	689
26.4	Riemenscheiben	690
26.5	Geometrie der Flachriementriebe	693
26.6	Übersetzung, Riemengeschwindigkeit, Biegefrequenz	695
26.7	Berechnung der Antriebe mit Leder- und Geweberiemen	696
26.8	Berechnung von Antrieben mit Mehrschichtriemen	700
26.9	Spannrollentrieb	704
26.10	Literatur	705
27	Keilriementriebe	706
27.1	Wirkungsweise, Ausführung genormter Keilriemen	706
27.2	Keilriemenscheiben	709
27.3	Berechnung der Antriebe mit Keilriemen und Keilrippenriemen	711
27.4	Weitere Ausführungen von Keilriemen und Keilriementrieben	717
27.5	Literatur	718
28	Synchron- oder Zahnriementriebe	720
28.1	Ausführung der Synchron- oder Zahnriemen und -scheiben	721
28.2	Übersetzung und Geometrie der Synchronriementriebe	723
28.3	Berechnung von Antrieben mit Synchron- oder Zahnriemen	724
28.4	Literatur	728

F Führungselemente für Flüssigkeiten und Gase

29 Rohrleitungen	729
29.1 Grundlagen	729
29.2 Rohrarten	731
29.3 Rohrformstücke	733
29.4 Rohrverbindungen	735
29.5 Dehnungsausgleicher	740
29.6 Rohrhalterungen	742
29.7 Darstellung von Rohrleitungen	745
29.8 Berechnung von Rohrleitungen	745
29.9 Literatur	752
30 Armaturen	754
30.1 Allgemeines	754
30.2 Ventile	755
30.3 Schieber	757
30.4 Hähne	759
30.5 Klappen	759
30.6 Armaturenantriebe	760
30.7 Literatur	761
Sachwortverzeichnis	762

Grundlagen

1 Konstruktionstechnik

1.1 Normen und Richtlinien

Beim rationellen Konstruieren von Produkten haben Normen und andere allgemein anerkannte Richtlinien der Technik eine besondere Bedeutung. Sie sind das Ergebnis der Gemeinschaftsarbeit erfahrener Fachleute, die in den Gremien der deutschen Normungsorganisation, dem DIN Deutsches Institut für Normung e. V., und anderer Fachverbände überwiegend ehrenamtlich zusammenwirken. Die von diesen Institutionen herausgegebenen Veröffentlichungen können als Regeln der Technik von jedermann angewendet werden. Sie gelten als Empfehlungen, befreien den Anwender aber nicht von der eigenen Verantwortung.

Das **DIN Deutsches Institut für Normung e. V.** (kurz DIN genannt) ist ein gemeinnütziger Verein mit Sitz in Berlin und durch einen mit der Bundesrepublik Deutschland geschlossenen Vertrag die deutsche *Nationale Normungsorganisation*. Sie hat die Aufgabe, Normen zu erarbeiten und diese der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Die fachliche Arbeit wird in Normenausschüssen durchgeführt, die in Arbeitsausschüsse untergliedert sind. Die Ergebnisse der Normungsarbeit im DIN werden als **DIN-Normen** herausgegeben und bilden das *Deutsche Normenwerk*. In den Normen der Reihe DIN 820 sind die Grundsätze und Verfahrensregeln festgelegt, nach denen im DIN die Normen erstellt und herausgegeben werden.

Als Mitglied der europäischen und internationalen Normungsorganisationen vertritt das DIN dort die deutschen Interessen. Auf internationaler Ebene wird die Normung weltweit von der **ISO** (International Organization for Standardization) und der Internationalen Elektrotechnischen Kommission **IEC** (International Electrotechnical Commission) betrieben. Sie bilden gemeinsam das *System Internationale Normung* mit Sitz in Genf. Die für Europa zuständige Normungsorganisation ist die in Brüssel ansässige *Gemeinsame Europäische Normungsinstitution* **CEN/CENELEC**. Sie ist ein Zusammenschluss des Europäischen Komitees für Normung (CEN) und des Europäischen Komitees für Elektrotechnische Normung (CENELEC). Internationale Normen werden als **DIN-ISO-Normen** und europäische Normen als **DIN-EN-Normen** in das Deutsche Normenwerk übernommen.

Normen sind ein Ordnungsmittel für das sinnvolle Zusammenwirken aller gesellschaftlichen Gruppen in Wirtschaft und Verwaltung sowie auf technisch-wissenschaftlichen Gebieten. Sie enthalten u. a. Angaben, Empfehlungen und Anforderungen für

- die Beschaffenheit und Prüfung technischer Erzeugnisse,
- die Herstellung, Instandhaltung und Handhabung von Gegenständen und Anlagen,
- die Gestaltung und den organisatorischen Ablauf von Verfahren und Dienstleistungen,
- die Sicherheit, Gesundheit und den Umweltschutz,
- die Qualitätssicherung und -verbesserung.

Durch Festlegungen z. B. für einheitliche Bezeichnungen, Abmessungen, Toleranzen, Baureihen, Berechnungsverfahren usw. begünstigen technische Normen die Rationalisierung in Konstruktion, Fertigung, Montage und Instandhaltung. Obwohl die Anwendung von Normen freigestellt ist, kann sich aus Rechts- und Verwaltungsvorschriften, aus Verträgen oder anderen Rechtsgrundlagen eine Anwendungspflicht ergeben.

Außer den vom DIN-Institut herausgegebenen Normen gibt es weitere Vorschriften und Richtlinien, die von verschiedenen technischen Fachverbänden erarbeitet und veröffentlicht

werden. Dazu gehören z. B. die **VDI-Richtlinien** des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), einem technisch-wissenschaftlichen Mitgliederverein, die **FKM-Richtlinien** des Forschungsinstitut für Maschinenbau e. V., die **VDE-Bestimmungen** des Verbandes Deutscher Elektrotechniker e. V. (VDE), die **AD-Merkblätter** der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter, herausgegeben vom Verband der Technischen Überwachungs-Vereine (TÜV), die **VDG-Merkblätter** des Vereins Deutscher Gießereifachleute, die **DVS-Merkblätter** des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik, die **DASt-Richtlinien** des Deutschen Ausschusses für Stahlbau. Auf weitere technische Regeln wird in den entsprechenden Kapiteln hingewiesen.

Auf einigen Gebieten werden vom DIN und den Fachverbänden gemeinsam technische Regeln herausgegeben. So ist eine DIN-VDE-Norm zugleich eine Deutsche Norm und eine VDE-Bestimmung. Die VDI/VDE-Richtlinien sind ein Gemeinschaftswerk von Fachgliederungen des VDI und des VDE. Oftmals sind Merkblätter und Richtlinien der Fachverbände die Vorläufer von DIN-Normen, oder sie enthalten für bestimmte Fachgebiete Festlegungen, die über die DIN-Normen hinausgehen bzw. diese ergänzen.

Die Normen sind in der Regel für ein weites Anwendungsgebiet vorgesehen. Sie enthalten vielfach Angaben, die in ihrem Umfang nicht jeder Betrieb benötigt. Aus diesem Grunde werden zur Erleichterung und Rationalisierung der Organisation, der Konstruktion und der Produktion innerbetriebliche Normen, **Werknormen**, erarbeitet. Deren Inhalte können firmenspezifische Auszüge aus DIN-Normen sein oder Richtlinien für die Berechnung und Konstruktion, Anweisungen für die Nummerierung von Zeichnungen und die Gliederung der Zeichnungsätze, Vorschriften für die Fertigung und die Qualitätskontrolle sowie andere betriebsinterne Regelungen. Die innerbetriebliche Normungsarbeit sowie das Verwalten aller Normen und Richtlinien obliegt der *Normenabteilung* eines Betriebes, die zwecks Unabhängigkeit der Geschäftsleitung direkt unterstellt sein sollte.

Eine bedeutende Rolle beim Konstruieren und in der Fertigung spielen u. a. die **Werkstoffnormen**. Sie helfen einerseits dem Konstrukteur den für das zu entwerfende Produkt geeigneten Werkstoff auszuwählen und stellen andererseits durch die verbindlich festgelegte Werkstoffbezeichnung sicher, dass dieser Werkstoff in der Fertigung auch angewendet wird. In den vergangenen Jahren wurden mehrere DIN-Normen für Werkstoffe auf die europäischen EN-Normen umgestellt (siehe auch die *Hinweise zur Benutzung des Buches*). Diese Umstellung ist noch nicht abgeschlossen.

In vielen Normen, in Firmenunterlagen, in Fachbüchern und anderweitig sind jedoch noch die alten Bezeichnungen enthalten. Deshalb wurden zur Arbeiterleichterung in Tab. 1.1 die alten und die neuen Kurznamen für einige wichtige Stähle gegenübergestellt. In Tab. 1.2 sind Festigkeitswerte der Stahlsorten nach DIN EN 10025 für warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen angegeben. Die Tab. 1.3 enthält eine Gegenüberstellung der Bezeichnungen von Gusseisen und Temporguss und die Tab. 1.4 von Leichtmetallwerkstoffen für Gussstücke und für Halbzeuge nach den zurückgezogenen DIN-Normen und den neuen DIN EN-Normen. In den Tabn. 1.5, 1.6 und 1.7 ist die für Festigkeitsberechnungen oft benötigte Streckgrenze bzw. 0,2 %-Dehngrenze verschiedener Werkstoffe enthalten.

1.2 Methodisches Konstruieren

Maschinenelemente sind Bauteile an Maschinen und Geräten, die jeweils gleiche Aufgaben erfüllen und deshalb gleiche Merkmale aufweisen. Viele bewährte Maschinenelemente sind genormt, um unabhängig vom Hersteller ihre Austauschbarkeit und Haltbarkeit zu gewährleisten. Für diese Elemente ist keine Konstruktionsarbeit notwendig. Es sind lediglich Berechnungen erforderlich, um die richtige Auswahl zu treffen. Anders verhält es sich bei den Maschinenelementen, die für den jeweiligen Bedarfsfall in Anlehnung an ausgeführte Konstruktionen oder vollkommen neu konstruiert werden müssen.

Unter Konstruieren versteht man das Erarbeiten optimaler Lösungen für die Ausführung von technischen Geräten oder Maschinen. Heute konstruiert man vorzugsweise methodisch und

überlässt die Lösungsfindung nicht nur dem Zufall. Trotzdem erfordert auch diese Methode Intuition und eine gehörige Portion gründlicher Fachkenntnisse und Erfahrungen.

Vor Konstruktionsbeginn wird zweckmässig eine *Anforderungsliste* angelegt, in die zur Klärung der anzustrebenden Eigenschaften die Hauptmerkmale des zu entwerfenden Produktes eingetragen werden, beispielsweise nach Pahl/Beitz [1.1]:

Kräfte: aufzunehmende Kräfte bzw. Lasten und deren Häufigkeit.

Energiebedarf: Leistung, Erwärmung, Kühlung, erstrebenswerter Wirkungsgrad.

Abmessungen: zulässige Höhe, Breite, Länge.

Bewegungsart: Richtung, Geschwindigkeit, Beschleunigung.

Werkstoffe: erforderliche Eigenschaften wie Festigkeit, Elastizität, tropenfest, korrosionsbeständig.

Sicherheit: Schutz vor Bruch bzw. dessen Folgen, Arbeitssicherheit, Umweltschutz, Beleuchtung.

Bedienung: Bedienungsart, Formgestaltung der Bedienteile.

Fertigung: Fertigungsverfahren, Toleranzen, Oberflächengüten.

Kontrolle: Mess- und Prüfmöglichkeiten.

Montage: Zusammenbau, Einbau, Fundamente, Baustellenmontage.

Transport: Hebezeuge, Bahn, Transportwege nach Größe und Gewicht, Versandart.

Instandhaltung: Wartungsfreiheit oder Anzahl und Zeitbedarf der Wartungen, Säuberung.

Gebrauch: Anwendung und Absatzgebiete, Laufgeräusche, Verschleiß.

Kosten: zulässige Herstellkosten, Werkzeugkosten, Investitionen und Amortisationen.

Termine: Zwischen- und Endtermine für Entwicklung, Erprobung und Lieferung.

Die Erfahrung lehrt, dass man bei der Weiterentwicklung einer Konstruktion bis zur ausgereiften Form nur schrittweise vorankommt und versuchen muss, sich dem Optimum zu nähern. Außerdem treibt die Konkurrenz zur Weiterentwicklung eines Produkts. Deshalb sind stets die Konstruktionen der Konkurrenz im Auge zu behalten und diese zu analysieren, um ein besseres Erzeugnis auf den Markt bringen zu können. Oftmals bieten sich mehrere Lösungsmöglichkeiten an, und es ist schwierig, sich für eine der Varianten zu entscheiden. Als Beispiel zeigt Bild 1.1 die Variationstechnik an einer Reibscheibenkupplung.

Die Auswahl wird dann nach einer Bewertung und Gegenüberstellung der einzelnen Lösungsmöglichkeiten vorgenommen. Durch Überschlagsberechnungen hinsichtlich des Aufwandes und des Raumbedarfs ist meistens eine engere Wahl möglich. Für diese Auswahl sind wichtig:

Kritische Punkte: Könnten Schwierigkeiten bei der Fertigung, beim Zusammenbau, bei der Bedienung auftreten?

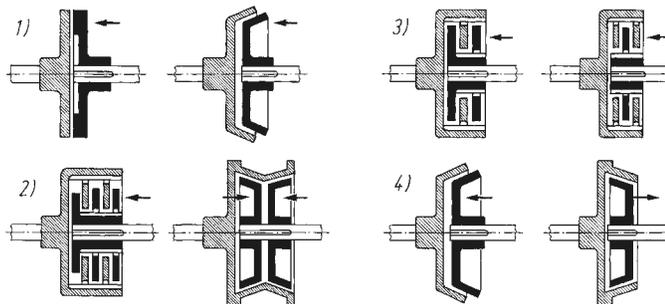


Bild 1.1 Varianten einer Reibscheiben-Kupplung (schematisch) als Beispiel für die Variationstechnik (nach Niemann [1.14]).

1. Variante: Scheiben-, Kegel-Kupplung, 2. Variante: Vervielfachung und Kraftausgleich, 3. Variante: Innen oder außen mehr Scheiben, 4. Variante: Zug- oder Druck-Anordnung

Hält die Konstruktion den Beanspruchungen stand? Den Kraftfluss überprüfen, gefährdete Querschnitte auf Haltbarkeit nachrechnen.

Bleibt der Verschleiß in erträglichen Grenzen? Die Werkstoffpaarung gleitender Teile, deren Schmierung, Abdichtung und Nachstellmöglichkeiten überprüfen.

Fertigungsgerechte Gestaltung

bei Gussteilen: modellformgerecht, gießgerecht, bearbeitungsgerecht. Einfache Formen, ungeteilte, kernlose Modelle bevorzugen, Aushebeschrägen vorsehen, keine Hinterschneidungen. Wanddicken in zulässigen Grenzen halten, Teilfugen so anordnen, dass ein gewisser Gussversatz nicht stört. Ausreichende Bearbeitungszugaben und einen entspr. Werkzeugauslauf vorsehen. Spannungsmöglichkeiten des Gussteiles auf der Bearbeitungsmaschine beachten.

bei Gesenkschmiedeteilen und Pressteilen: werkzeuggerechte, schmiedegerechte, fließgerechte und bearbeitungsgerechte Gestaltung notwendig. Keine Unterschneidungen! Aushebeschrägen erforderlich. Keine zu dünnen Böden, keine zu schlanken Rippen, keine zu kleinen Hohlkehlen oder Löcher. Rotationssymmetrische Teile anstreben.

bei Umformung zu topfartigen Hohlkörpern: Blechdicke im Vergleich zur Tiefe und dem Topfdurchmesser sowie Ziehkantenrundungen beachten. Zylindrische Napfformen sind zweckmäßig. Unterschnittene oder ausgebauchte Ziehteile sind besonders teuer. Bei Biegeumformung unbedingt auf den Biegeradius achten.

bei spanabhebender Bearbeitung (Drehen, Fräsen, Bohren): werkzeug- und spangerecht, einfache Formmeißel anstreben. Auf Werkzeugauslauf achten! Nuten und enge Toleranzen bei Innenbearbeitung möglichst vermeiden, durchgehende Bohrungen anstreben, gerade Bearbeitungsflächen möglichst in gleicher Höhe. Sacklöcher vermeiden oder solche mit Bohrspitze vorsehen. Für Scheibenfräser auslaufende Nuten erforderlich.

bei Schleifbearbeitung: Schleifscheibenauslauf vorsehen, Bundbegrenzungen möglichst vermeiden, gleiche Rundungsradien und Neigungen an einem Werkstück anstreben.

bei Schweißteilen: siehe hierzu Abschnitt 4.3 (Nahtarten und -formen, Gütesicherung) und 4.4 (Gestaltung).

Das Berechnen von Maschinen und deren Teilen (Elementen) setzt Kenntnisse der Mechanik, Festigkeitslehre, Wärmelehre, Fertigungstechnik, Werkstoffkunde u. a. voraus. Die **Abmessungen** werden im allgemeinen nach folgenden Gesichtspunkten festgelegt:

durch Ähnlichkeitsbeziehungen zu bereits aufgeführten, bewährten Bauteilen.

durch Annahme von Abmessungen nach empirischen Formeln oder nach Erfahrungen mit Wanddicken, Niet-, Schrauben- oder Schweißpunktdicken und -abständen.

durch Kontrolle mit Werten für zulässige Beanspruchungen gefährdeter Querschnitte, für zulässige Verformungen, Erwärmungen, Ausdehnungen und für zulässigen Verschleiß.

nach vorgegebenen Gesichts- bzw. Massen- oder Raumgrößen oder nach Einflussgrößen wie Geschwindigkeit, Beschleunigung, Trägheit, Fliehkraft.

durch Überprüfen der Lärmerzeugung (unzulässige Geräusche).

durch Wahl der Werkstoffe nach Korrosionsfestigkeit bzw. Oberflächenschutz.

nach möglichen Einsparungen: Wo lässt sich an Raum, Werkstoff, Feinheit der Passungen und Oberflächengüten sparen?

Viele Fehlentwürfe und Beanstandungen beruhen auf einer ungenügenden Vorklärung der Aufgabenstellung. Der Konstrukteur muss darüber informiert werden, ob die Qualität oder der Preis für ein Produkt vorrangig ist, und in welcher Stückzahl es hergestellt werden soll. Hierfür ist eine Marktanalyse von entscheidender Bedeutung.

Für eine erfolgreiche systematische Konstruktionsarbeit können neben einschlägigen Fachbüchern (z. B. [1.1], [1.2], [1.3]) auch einige VDI-Richtlinien sehr hilfreich sein, so zum Beispiel die Richtlinien VDI 2221 *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, VDI 2222 *Konstruktionsmethodik*, Blatt 1 *Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*, Blatt 2 *Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. In der Richtlinie VDI 2221 wird der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in Arbeitsabschnitte untergliedert, die das Vorgehen überschaubar, rationell und branchenunabhängig machen.

Der Gesamttablauf ist in *Arbeitsschritte* eingeteilt, aus denen für die darin angegebenen Aufgaben die *Arbeitsergebnisse* hervorgehen. Als erster Arbeitsschritt ist das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung vorgesehen mit dem Arbeitsergebnis *Anforderungsliste*. In dieser Liste werden die qualitativen und quantitativen Solleigenschaften des zu entwickelnden Produktes sowie die verbindlichen *Forderungen* und die *Wünsche* schriftlich formuliert mit Angaben, die für die Konstruktionsarbeit zutreffend sind.

Mehrere Arbeitsschritte werden in der Praxis oft zu Entwicklungs- und Konstruktionsphasen zusammengefasst, und zwar in die *Phasen* Produktplanung mit Aufgabenstellung, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten (siehe auch VDI 2222). Die wesentlichen Inhalte der einzelnen Phasen sind nach Pahl/Beitz [1.1] folgende:

Produktplanung mit Aufgabenstellung: Marktanalyse, Klären der Patentlage, Angaben über die zu fertigende Stückzahl, Zusammenstellen der Anforderungen ohne Festlegung einer bestimmten Lösung, Ausarbeiten der Anforderungsliste.

Konzipieren: Erkennen der wesentlichen Probleme, Auflösen der Gesamtfunktion in Teilfunktionen, Suchen von Wirkprinzipien zum Erfüllen der Teilfunktionen, Kombinieren und Auswählen geeigneter Wirkprinzipien, Ausarbeiten von Lösungsvarianten mit technisch-wirtschaftlicher Bewertung, Entscheiden für ein Lösungskonzept.

Entwerfen: Anfertigen eines ersten maßstäblichen Entwurfs mit Grobgestaltung der Hauptfunktionselemente, Bewerten des Entwurfs, Verbessern und erneutes Bewerten, Feingestalten der Haupt- und Nebenfunktions-Elemente, Optimieren und Fehlersuche, Festlegen des endgültigen Entwurfs.

Ausarbeiten: Detaillieren und Gestalten der Einzelteile, Anfertigen von Einzelteil-, Baugruppen- und Gesamtzeichnungen sowie Stücklisten, Ausarbeiten von Fertigungs- und Montageanweisungen, Zeichnungskontrolle in der Normenabteilung, Fertigungsfreigabe.

Der vorstehend in vereinfachter Form beschriebene Ablauf ist nur eine von mehreren bekannten Konstruktionsmethoden, die beispielsweise in folgenden VDI-Richtlinien erläutert werden: Entwurf VDI 2223 *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*, VDI 2225 *Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren*, Blatt 1 *Vereinfachte Kostenermittlung*, Blatt 2 *Tabellenwerk*, Blatt 3 *Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, Blatt 4 *Bemessungslehre*, VDI 2242 *Konstruieren ergonomiegerechter Erzeugnisse*, Blatt 1 *Grundlagen und Vorgehen*, Blatt 2 *Arbeitshilfen und Literaturzugang*, VDI 2243 *Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte*, Blatt 1 *Grundlagen und Gestaltungsregeln*, VDI 2244 *Konstruieren sicherheitsgerechter Erzeugnisse*, VDI 2246 *Konstruieren instandhaltungsgerechter technischer Erzeugnisse*, Blatt 1 *Grundlagen*, Blatt 2 *Anforderungskatalog*. In diesen Richtlinien werden Empfehlungen gegeben für zweckmäßiges Vorgehen beim Konstruktionsprozess und für Bewertungsverfahren von Entwürfen für Lösungsvarianten. Außerdem enthalten sie ausführliche Literaturangaben.

Durch rechnerunterstütztes Konstruieren kann der Konstruktionsprozess wesentlich beschleunigt und effektiver durchgeführt werden, worauf im Abschnitt 1.3 eingegangen wird.

1.3 Datenverarbeitung in der Konstruktion

Die Konstruktionsarbeit wird heute maßgeblich vom Einsatz der *elektronischen Datenverarbeitung* (EDV) bestimmt. Die komplette **Prozesskette** vom Design über Konstruktion, Berechnung, Fertigungsvorbereitung, Fertigung bis hin zum Recycling kann in Form eines zunächst virtuell realisierten Prozessablaufs im Rechner solange optimiert werden, bis der reale Produktionsprozess auf der Basis dieser Ergebnisse relativ einfach umgesetzt werden kann. Durch den heute in der Regel hohen Grad der *Vernetzung* ist ein weltweites simultan-sukzessives Arbeiten im Entwicklungsprozess an gleichen Projekten möglich. Diese Formen der Teamarbeit erfordern stabile Hardware- und Softwareplattformen mit möglichst genormten Schnittstellen, um prozesskettenübergreifende Produktentwicklungen realisieren zu können.

Hierbei wird eine Reihe von *Software-Werkzeugen* eingesetzt.

1. Im Bereich **Konstruktion** kommen 3D-CAD(Computer Aided Design)-Programme wie Creo Parametric, CATIA V5, Siemens NX, Inventor, SolidWorks, Solid Edge usw. zum Einsatz. Diese Programme zeichnen sich durch einen enormen, stetig wachsenden Funktionsumfang aus. Volumetrische Bauteilerstellung, Baugruppengenerierung, parametrische Konstruktion, weitgehend automatische Zeichnungsableitung usw. sind Pflicht, Module zur Bewegungssimulation, photorealistischen Darstellung von noch nicht existenten Produkten durch Photorendering sind im Kommen (Bild 1.2).

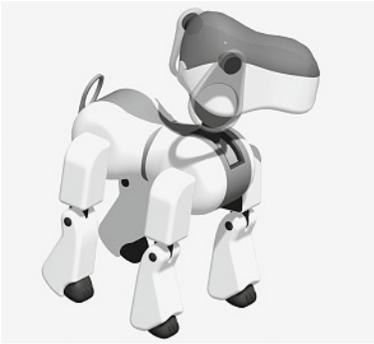


Bild 1.2 3D-CAD-Modell eines Roboterhundes (Pro/E Studentenarbeit Universität Bayreuth 2006)

2. Im Bereich der **Modellierung von Flächen** können diese entweder durch *Drahtgeometrien* (Punkte, Linien, Kurven, Stützkurven wie Non-Uniforme-Rationale-B-Splines – NURBS –, Projektionskurven usw.), *direkte Flächen* (Auszüge – Extrude –, Rotationen, Offsets, Füllfunktionen, Verbundflächen, Übergänge – Blends – usw.) oder *Operationen* (Join, Disassemble, Trim, Verlängern, Ableiten, Transformieren usw.) erzeugt werden. In der Automobil-Karosserieentwicklung kommt z. B. hierfür oft eines der Flächenmodule von CATIA (z. B. Generative Shape Design) zum Einsatz (Bild 1.3). Im Bereich **Design** bieten modernste Modellierungs-, Beleuchtungs-, Rendering- und Animationstechniken von Programmen wie Rhinocerus, Softimage, Maya oder 3ds-Max die Möglichkeit, qualitativ hochstehende Projekte im wissenschaftlichen und industriellen Gebiet zu realisieren.

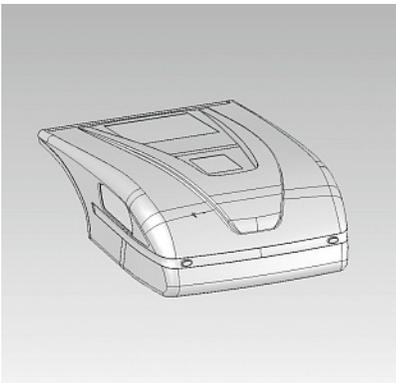


Bild 1.3 Flächenmodellierung mit CATIA V5. Reisemobil Alkoven (Werkbild Frankia)

3. Berechnungen zur **Festigkeit** und Aussagen zu den **Produkteigenschaften** unter Last können durch Programme zur Belastungssimulation selbst für komplexe Bauteile sicher ge-

troffen werden. Voraussetzung ist hier in der Regel das Vorliegen des *3D-CAD-Modells*, eines entsprechenden mathematischen *Materialmodells* und eines *Finite-Elemente-Netzes*. Bei neuen Materialklassen wie Metallverbänden, Gradientenwerkstoffen, Composites oder nanotube/nanopartikel-verstärkten Kunststoffen und Keramiken müssen die für die Simulation notwendigen Materialgesetze mit Hilfe von Versuchen neu ermittelt werden, da bisher gültige Wirkmechanismen und Ansätze nicht mehr oder nur noch zum Teil gültig sind.

Als mit Programmunterstützung lösbare Lastfälle seien genannt: statisch bei linearen Materialien (z. B. Creo Simulate, Z88 Aurora[®], SolidWorks Simulation), dynamisch/thermisch bei nichtlinearen Materialien (ANSYS, MSC.MARC, ADINA, ABAQUS, usw.), Crash-Belastung (bspw. PAM-CRASH), Mehrkörpersimulation (z. B. MSC.ADAMS).

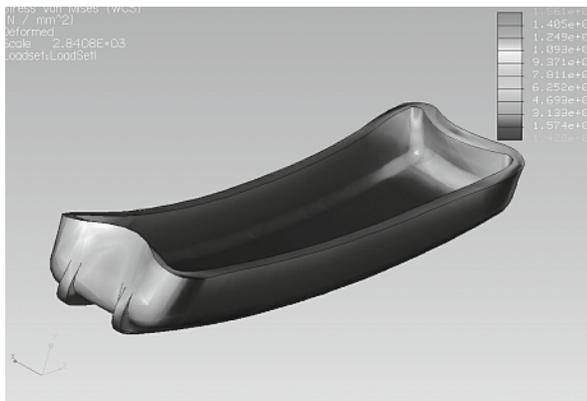


Bild 1.4 Spannungsanalyse an einem Gussbauteil mit FEM

4. **Fertigungsverfahren** werden durch spezielle, teilweise direkt integrierte *Programm-Module* unterstützt. Anwendungen sind z. B. klassische Bearbeitungsverfahren-Simulationen wie Fräsen und Drehen (z. B. Pro/NC), Umformtechnik (z. B. PAM-STAMP 2G), Blechbearbeitung (z. B. CATIA Sheet Metal Design, Creo NC Sheetmetal) oder Gussimulationen (z. B. Moldex3D oder Moldflow für Kunststoff, MAGMA für Metallguss).

Beispiel Hydroformen: Bei diesem Umformverfahren besteht die Aufgabe der Simulation darin, eine generelle Durchführbarkeitsstudie zum Umformverhalten des Halbzeuges bzw. der Werkzeuge durchzuführen. In dieser Studie soll neben der Vorhersage von möglichen *Versagensarten* (Knicken, Bersten, Reißen) auch eine *Sensitivitätsanalyse* der Einflussparameter (z. B. Werkstoffe, Umformdrücke und Niederhalterkraft) erfolgen. Zusätzlich kann bereits im virtuellen Prototyping mit der Optimierung des Prozesses durch die gezielte Variation der wichtigen Prozesseinflussparameter begonnen werden. Eine weitere wesentliche Aufgabe der *Fertigungssimulation* ist es, frühzeitig Aussagen über die sich einstellenden Produkteigenschaften (Wandstärkenverhalten, Kaltverfestigung, Dehnungs- bzw. Spannungsverteilung) zu gewinnen. Dazu ist die Betrachtung des zeitlichen Verlaufes der Umformung von entscheidender Bedeutung. Die Berechnung des Einflusses der elastischen Formänderungen auf das Rückfederverhalten der durch Hydroformen (IHU/AHU) umgeformten Bauteile ist hinsichtlich der einzuhaltenden Form- und Maßtoleranzen zur Beherrschung des Gesamtprozesses notwendig.

Durch den Einsatz der FE-Machbarkeitssimulation können eine Reduzierung der Werkzeugkosten und eine Verminderung der Zahl der Versuchswerkzeuge erreicht werden. Dies führt i. d. R. zu einer Reduzierung der Entwicklungszeit und erhöht die Fertigungssicherheit für die Serienproduktion.

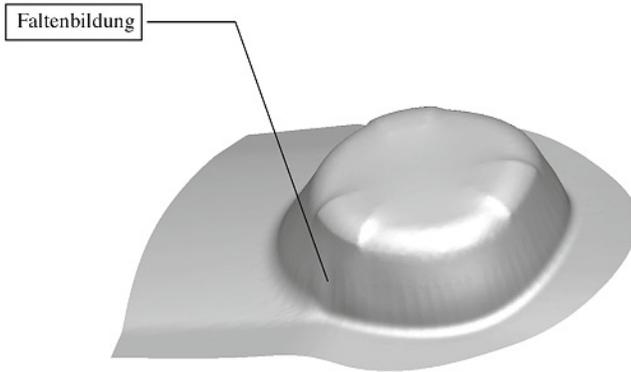


Bild 1.5 Ergebnis der hydromechanischen Tiefziehsimulation eines 1,5 mm dicken, höchstfesten Dualphasen-Stahls zur Verwendung in der Automobilkarosserie. $R_m = 840 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2} = 610 \text{ N/mm}^2$ (Quelle Universität Bayreuth)

5. Weitere Programme unterstützen die *virtuelle Entwicklung* von Produkten. Dazu gehören u. a. Programme zur automatischen bzw. optimierten Rohr- und Leitungsverlegung, Strömungssimulation, Geräuschsimulation (z. B. von Abgasanlagen in Kraftfahrzeugen), aber auch Fabrikanlagenplanung und Qualitätssicherung. Im Prinzip lässt sich heute weitgehend alles simulieren.
6. Zusätzlich kommen verstärkt Produktentwicklungen in **Virtual-Reality-Umgebungen** zum Einsatz. Hierbei werden durch spezielle Hardware (Rechner, Beamer, Projektionsleinwände usw.) virtuelle Umgebungen geschaffen, in denen mit Hilfe von Sicht- und Manipulationsgeräten (Shutterbrillen, Datenhandschuhe oder Head-Mounted Displays) ein virtuelles Begehen und physische Aktionen (z. B. Greifen) realisiert werden können. Beispielsweise werden hierdurch im Digital Mock-up vorab Zusammen- und Einbaubauuntersuchungen ebenso möglich wie Montage- und Demontagevorgänge.
7. Ergänzende Entwicklungen treffen den Wunsch nach einer möglichst schnellen, kundenorientierten Produktentwicklung aus bestehenden Modulen. Hier ist durch den Einsatz von 3D-CAD-gekoppelten, vollparametrisierbaren **Produktkonfiguratoren** ein automatisiertes Entwickeln von Endprodukten inkl. Zeichnungsableitung, Stücklistenerstellung usw. möglich. Auch das Abrufen von einbaufertigen Norm- und Kaufteil-CAD-Modellen aus dem Internet oder von einer Hersteller-DVD beschleunigt den Konstruktionsprozess erheblich, da das arbeitsintensive eigene Erstellen der Teile entfällt. Über entsprechende Gestaltung der Systeme werden hier oft Kopplungen zu materialwirtschafts- und kaufmännischen Standardsystemen wie SAP realisiert.

Der verstärkte EDV-Einsatz in der Konstruktion birgt erfahrungsgemäß eine Reihe von Problemen. Da unterschiedlichste Softwareanbieter tätig sind, spielt die **Schnittstellenproblematik** trotz genormter Schnittstellen (IGES, STEP, VDA usw.) entlang der Prozesskette eine wichtige Rolle. Ebenso führen unterschiedlichste Programmversionen, Releasestände, Wochenversionen, Firmenspezifika, Sprach- und Toleranzeinstellungen usw. besonders beim Vorliegen eines heute üblichen weltweiten, komplexen Lieferanten-Untertieranten-Geflechts zu babylonischen Verhältnissen. Hier helfen nur Organisation, Disziplin und Übung.

Durch den notwendigen und sinnvollen massiven Einsatz unterschiedlicher Programme, z. B. bei der Entwicklung von Produkten aus High-End-Materialien oder mit besonderen Verfahren, stellt sich zudem immer mehr die Frage nach der richtigen Verknüpfung der Einzelprogramme (wann muss welches Programm an welchem Zeitpunkt der Prozesskette eingesetzt werden?). Diese Frage ist umso wichtiger, da gegenseitige Abhängigkeiten bestehen, die bei Nichtbeachtung zu suboptimalen Produkten führen. Neuere Ansätze wie **ICROS** (Intelligent



CROSS-linked Simulation) [1.8] versuchen hier, dem Entwickler Möglichkeiten und Hinweise für einen materialklassengerechten Softwareeinsatz-Mix in hinreichender Granularität zu liefern.

Beispiel: Vergleich der Vorgehensweise bei einer Produktentwicklung mit unterschiedlichen Kunststoffen

Das Füllverhalten von Thermoplasten lässt sich mit Spritzguss-Simulationsprogrammen sehr gut vorhersagen. Hierdurch können Form- und Werkzeuggestalt, Einspritzpunkte oder Prozessparameter vorab optimiert werden. Die Aussagen zur Festigkeit werden durch *Finite-Elemente-Programme* getroffen. Ob und wie die optimale Spritzgussform gefertigt werden kann, wird durch eine *Fertigungssimulation* der notwendigen Fräs- und Erodiervorgänge entschieden. Im Bild 1.6 wird die richtige Vorgehensweise bei der Verwendung von unverstärkten Polymeren mit der von faserverstärktem Material verglichen. Da die lokale Festigkeit des Bauteils im Fall B von der einspritzbedingten Faserlage abhängig ist, muss hier nach der 3D-CAD-Modellierung des Bauteils zuerst eine *Füllsimulation* erfolgen und dann erst eine FE-Berechnung durchgeführt werden, während im Fall A bei unverstärkten Polymeren die Festigkeitsrechnung bereits vor der Füllsimulation angesetzt werden kann.

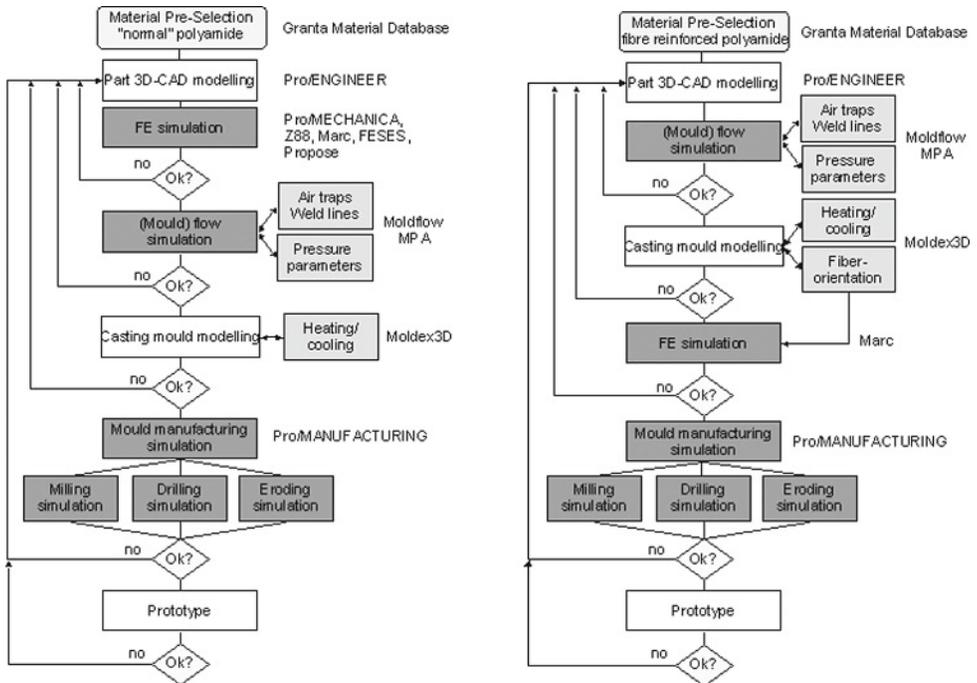


Bild 1.6 Vergleich der unterschiedlichen Prozessabläufe in Abhängigkeit des gewählten Materials nach ICROS [1.8]

1.4 Festigkeitsberechnung

Alle Bauteile werden unter der Einwirkung von äußeren Kräften verformt. Diesen äußeren Kräften wirken im Werkstoffgefüge *innere Kräfte* entgegen, die der Verformung einen Widerstand entgegensetzen. Im Normalfall befinden sich innere und äußere Kräfte im Gleichge-

wicht. Durch das so genannte *Freischnneiden* können die inneren Kräfte, auch als *Schnittlasten* bezeichnet, dargestellt und nach den statischen Gleichgewichtsbedingungen ermittelt werden. Mit steigender äußerer Kraft, also mit zunehmender *Belastung*, wachsen auch die inneren Widerstandskräfte im Werkstoff. Als Maß für die *Beanspruchung* eines Bauteils gilt die mechanische Spannung, kurz die **Spannung**, das ist die auf eine Flächeneinheit bezogene Kraft. Normalerweise wird sie auf den unverformten Ausgangsquerschnitt bezogen und auch *Nennspannung* genannt. Ihre SI-Einheit ist das N/m^2 mit der Bezeichnung Pascal (Pa). Üblicherweise werden Spannungen jedoch in N/mm^2 angegeben ($1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$). Wie Kräfte können auch Spannungen durch Vektoren beschrieben werden, d. h., auch Spannungen sind gerichtete Größen.

Die innere Widerstandskraft eines Werkstoffs ist seine **Festigkeit**. Im Betriebszustand darf man die Bauteile der Geräte und Maschinen nur so hoch beanspruchen, dass sie weder zerstört noch soweit verformt werden, dass die Funktion beeinträchtigt wird. Ihre *Festigkeitsgrenze* darf nicht überschritten werden. Die Festigkeitsgrenzen werden im Rahmen der Werkstoffprüfung durch Versuche ermittelt und als Grenzzspannungen oder *Festigkeitskennwerte* mit der Einheit N/mm^2 in Normen angegeben.

Aufgabe einer Festigkeitsberechnung ist der Nachweis, dass die Beanspruchungen in zulässigen Grenzen bleiben oder mit Sicherheit ertragen werden können, d. h. ein Versagen der Bauteile bzw. eine unzulässig hohe Verformung oder Instabilität (Knicken, Kippen, Beulen) nicht zu erwarten sind. Andererseits ist es auch möglich, die erforderlichen Abmessungen von Bauteilen oder die übertragbaren Kräfte zu errechnen, wobei man von Erfahrungswerten für zulässige Spannungen oder erforderliche Sicherheiten ausgeht.

Auf die verschiedenen Beanspruchungs- und Festigkeitsarten sowie auf den Festigkeitsnachweis wird nachfolgend näher eingegangen.

1. Beanspruchungen und Lastfälle

Nach ihrer Richtung in Bezug auf die beanspruchte Querschnittsfläche werden die Spannungen in **Normalspannungen** σ und **Schubspannungen** τ unterteilt. Normalspannungen stehen auf der Schnittfläche senkrecht (Bild 1.7) infolge einer *Normalkraft* F_N , die bei Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung wirkt.

Schubspannungen liegen in der Schnittfläche (Bild 1.8) und werden durch eine *Querkraft* F_Q hervorgerufen, die bei Scher- und Torsionsbeanspruchung (Verdrehbeanspruchung) auftritt, aber auch bei Biegebeanspruchung, wo sie bei langen und schlanken Bauteilen meistens vernachlässigt werden kann.

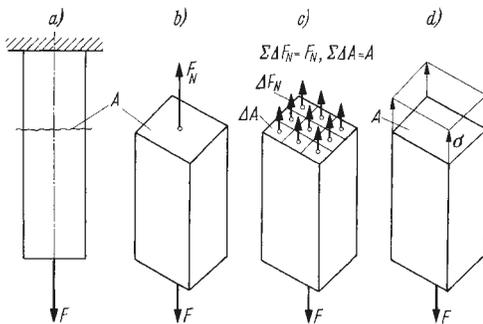


Bild 1.7 Normalspannung bei Zugbeanspruchung
a) Stab mit Zugkraft F , b) Normalkraft F_N als innere Kraft am freigeschnittenen Stabteil,
c) Teilkräfte ΔF_N auf den Teilflächen ΔA
d) durch $\sigma = \Sigma \Delta F_N / \Delta A$ gebildetes Spannungsgehäuse auf der Fläche A

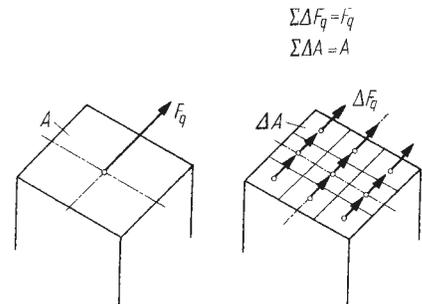


Bild 1.8 Entstehung der Schubspannung durch die Querkraft F_Q

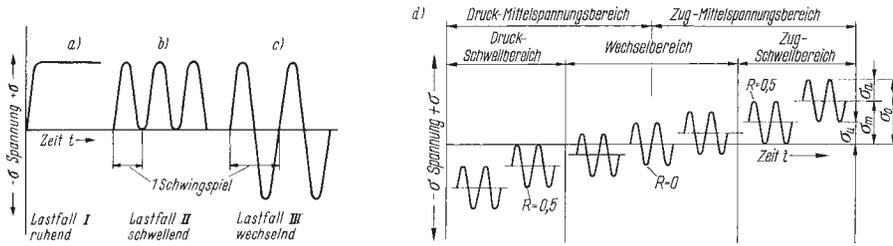


Bild 1.9 Darstellung der Lastfälle (Spannung-Zeit-Diagramme)
 a) ruhende, b) schwellende, c) wechselnde Beanspruchung,
 d) Bereiche der schwingenden Beanspruchung

Die Haltbarkeit eines Bauteils hängt maßgeblich vom zeitlichen Verlauf der Beanspruchung ab. Ändern sich die Belastungen, so ändern sich proportional dazu auch die im Bauteil auftretenden Spannungen. Mit dem Begriff *Lastfall* werden die verschiedenen Arten der Änderung von Belastungsgrößen ausgedrückt. Im Maschinen- und Gerätebau unterscheidet man folgende drei von *Bach* vorgeschlagenen idealisierten **Lastfälle** (Carl Julius von Bach, 1847–1931, deutscher Ingenieur und Forscher) (Bild 1.9):

Ruhende Beanspruchung (Lastfall I): Die Spannung steigt zügig auf einen bestimmten Wert [Die maximale Änderungsgeschwindigkeit der Spannung beträgt $10 \text{ (N/mm}^2) \cdot \text{s}^{-1}$] und behält diesen während einer längeren Zeit; es ändern sich weder ihr Betrag noch ihre Richtung. Man sagt dazu auch *statische Beanspruchung*.

Schwellende Beanspruchung (Lastfall II): Die Spannung steigt ständig von Null auf einen Höchstwert und sinkt wieder auf Null ab; es ändert sich ihr Betrag bei gleich bleibender Richtung.

Wechselnde Beanspruchung (Lastfall III): Die Spannung schwankt ständig zwischen einem positiven und einem negativen Höchstwert; es ändern sich ihr Betrag und ihre Richtung.

Die Schwell- und Wechselbeanspruchung, beide auch als *dynamische Beanspruchung* bezeichnet, werden besonders bei Festigkeitsberechnungen auf Dauerhaltbarkeit als Sonderfälle eines allgemeinen Lastfalls, der **schwingenden Beanspruchung** (Bild 1.9d) aufgefasst, bei der die Spannung ständig zwischen einer *Oberspannung* σ_o und einer *Unterspannung* σ_u schwingt. Eine volle Schwingung heißt *Schwingspiel* (bzw. *Lastspiel*). Es wird davon ausgegangen, dass sich einer ruhenden *Mittelspannung* $\sigma_m = (\sigma_o + \sigma_u)/2$ eine Wechsellast $\pm \sigma_a$ mit dem *Spannungsausschlag* oder der *Spannungsamplitude* $\sigma_a = (\sigma_o - \sigma_u)/2$ überlagert. Aus Mittel- und Oberspannung erhält man den *Ruhegrad* $R = \sigma_m/\sigma_o$. Im Druck-Mittelspannungsbereich sind σ_m und σ_o negativ. Beim Lastfall II sind $\sigma_m = \sigma_o/2$, $\sigma_u = 0$, $\sigma_a = \pm \sigma_o/2$ und $R = 0,5$, beim Lastfall III werden $\sigma_m = 0$, $\sigma_o = \sigma_a$, $\sigma_u = -\sigma_a$ und $R = 0$. Sieht man den Lastfall I auch als Sonderfall der Schwingbeanspruchung an, dann sind $\sigma_m = \sigma_o = \sigma_u$, $\sigma_a = 0$ und $R = 1$. Für Schubspannungen τ gelten diese Ausführungen ebenfalls.

Praktisch wird meistens die Festigkeitsberechnung unter Zugrundelegung der geschilderten Lastfälle durchgeführt. Tatsächlich verlaufen die Beanspruchungen jedoch oftmals nicht in der beschriebenen idealisierten Form sondern mit sehr unterschiedlichen Schwingspielen und Spannungsausschlägen, für deren Erfassung verschiedene Methoden bekannt sind (siehe z. B. [1.4] und [1.5]).

Außer dem Ruhegrad R als Verhältnis der Mittelspannung zur Oberspannung wird zur Beschreibung des Lastfalls auch das Verhältnis der Unterspannung zur Oberspannung als *Spannungsverhältnis* $S = \sigma_u/\sigma_o$ benutzt. Es kann zwischen -1 und 0 im Wechselbereich ($R = 0$ bis $R < 0,5$) und zwischen 0 und $+1$ im Schwellbereich ($R = 0,5$ bis $R < 1$) liegen.

Je nach Richtung der Belastungskraft und der von ihr am Bauteil bewirkten Verformung unterscheidet man folgende **Grundbeanspruchungsarten**:

Zugbeanspruchung tritt auf, wenn die äußeren Kräfte in Richtung der Stabachse wirken (siehe Bild 1.7) und den Stab verlängern. Die *Zugspannung* $\sigma_z = F/A$ wirkt über der Quer-

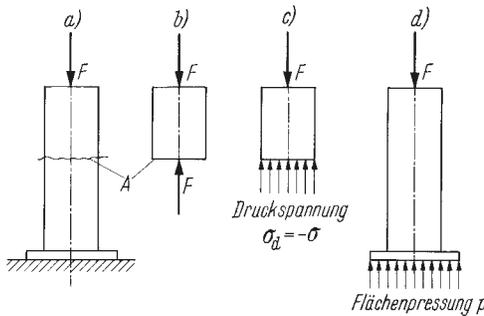


Bild 1.10 Druckbeanspruchung
 a) druckbeanspruchte Säule mit Fußplatte, b) freigeschnittenes Säulenstück, c) Druckspannung auf der Schnittfläche, d) Flächenpressung an der Fußplatte

schnittsfläche A gleichmäßig verteilt. Zugbeanspruchte Bauteile sind z. B. Seile, Ketten, Zugstangen, Schweißnähte, Schrauben, Fachwerkstäbe, Lüfterflügel (infolge der Fliehkraft).

Druckbeanspruchung liegt vor bei Kräften, die ebenfalls in Richtung der Stabachse wirken, den Stab aber verkürzen (stauchen). Die *Druckspannung* $\sigma_d = F/A$ ist genauso über der Fläche A gleichmäßig verteilt, der Zugspannung aber entgegen gerichtet (Bild 1.10), weshalb sie auch mit negativem Vorzeichen angeben wird.

An den Berührungsflächen gegeneinander gedrückter Teile tritt gleichfalls Druckbeanspruchung auf (Bild 1.10d), die bei ebener Berührungsfläche A eine gleichmäßig verteilte Berührungsspannung hervorruft, die *Flächenpressung* $p = F/A$. Bei zur Krafrichtung geneigten und bei zylindrischen Berührungsflächen (z. B. bei Stiften, Bolzen, Gleitlagern) wird mit A_{proj} gerechnet, der in Krafrichtung projizierten Fläche. Schlanke druckbeanspruchte Stäbe können ausknicken (instabil werden) und sind auf *Knickung* zu berechnen.

Biegebeanspruchung ist vorhanden, wenn infolge der äußeren Kräfte die Stabachse gebogen wird und der betrachtete Querschnitt ein Moment zu übertragen hat, das als *Biegemoment* M_b auf der Fläche senkrecht steht (Bild 1.11). Die inneren Kräfte treten als Normalkräfte paarweise in entgegengesetzter Richtung auf und erzeugen sowohl Zug- als auch Druckspannungen. In der so genannten neutralen Schicht oder Nullebene, die durch den Flächenschwerpunkt geht, sind sie Null. Zum Flächenrand hin steigen sie an (*Spannungsgefälle*) und erreichen ihren Größtwert in der äußeren Randschicht als *Biegespannung* $\sigma_b = M_b/W_b$.

Da das Biegemoment bei Querkraftbiegung über der Trägerlänge nicht konstant ist, empfiehlt es sich, den Verlauf graphisch darzustellen, um die Maximalwerte besser zu erkennen. Für einige Standardfälle sind in Tab. 1.11 die Querkraft- und die Biegemomentenflächen dargestellt und die Gleichungen zur Berechnung der Stützkkräfte und der größten Biegemomente angegeben. Gleichungen zur Berechnung des *Widerstandsmomentes gegen Biegung* $W_b = I/e$, worin e der Abstand des Flächenrandes von der Nulllinie ist, und des *axialen Flächenmomentes 2. Grades* 1 enthält die Tab. 1.12 für einige häufig vorkommende Querschnittsflächen, für Achsen- und Wellenquerschnitte die Tab. 15.2 (mit $I_b = I$). Die für Achsen und Wellen zu berechnende *Durchbiegung* ist im Abschnitt 15.6 erläutert. Außer Achsen und Wellen sind auch Stifte, Bolzen, Hebel, Träger, Federn u. a. Bauteile biegebeansprucht.

Schubbeanspruchung entsteht durch eine äußere Kraft, die quer zur Trägerachse wirkt. Die inneren Kräfte erzeugen als Querkräfte in der Schnittfläche Schubspannungen, die über der Fläche nicht gleichmäßig verteilt sind. Sie haben ihr Maximum in Flächenmitte und sind am Flächenrand Null. Praktisch wird jedoch meistens eine gleichmäßig verteilte *Schubspannung* $\tau_s = F/A$ angenommen (z. B. bei Schweißnähten). Die durch Querkräfte bei langen und schlanken Bauteilen durch Biegebeanspruchung hervorgerufenen Schubspannungen werden im Maschinenbau normalerweise vernachlässigt, da sie dort null sind, wo die größte Normalspannung als Biegespannung σ_b auftritt. Bei kurzen Bauteilen mit großem Querschnitt sind dagegen in der Regel die Schubspannungen dominant.