

HANSER



Leseprobe

zu

Mechanik und Festigkeitslehre

von Karlheinz Kabus, Bernd Kretschmer und Peter
Möhler

Print-ISBN: 978-3-446-47902-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-47903-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446479029>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Mechanik und Festigkeitslehre gehören zu den wichtigsten theoretischen Grundlagen jedes Technikers und Ingenieurs. Das vorliegende Buch will dem studierenden Nachwuchs bei der Erarbeitung dieser Grundlagen behilflich sein und ihn zur selbstständigen Lösung praktischer Aufgaben befähigen. Es ist besonders für den Gebrauch an Technikerschulen und Fachhochschulen gedacht. Für das Selbststudium und für Praktiker, die ihre theoretischen Kenntnisse auffrischen oder erweitern wollen, ist es ebenfalls geeignet.

Der Stoffumfang ist vorwiegend auf das Technikerstudium abgestimmt. Einige Kapitel gehen darüber hinaus, um auch Studenten an Fachhochschulen ein Hilfsmittel zum besseren Verständnis der Vorlesungen in Technischer Mechanik und interessierten Benutzern Weiterbildungsmöglichkeiten zu bieten. Auf eine Anwendung der höheren Mathematik wurde verzichtet, da diese an Technikerschulen nicht gelehrt wird. Bis auf wenige Ausnahmen werden die Berechnungsgleichungen hergeleitet und danach als Größengleichungen angegeben, so dass mit beliebigen Einheiten gerechnet werden kann.

Die verwendeten Einheiten und Formelzeichen entsprechen den in einem Verzeichnis zusammengestellten neuesten Ausgaben der einschlägigen DIN-Normen und den gesetzlich vorgeschriebenen SI-Einheiten. Auf die üblichen Einheiten wird hingewiesen. In Übereinstimmung mit dem täglichen Sprachgebrauch sowie den Normenempfehlungen werden die Worte Gewicht und Last im Sinne einer Massengröße verwendet. Wenn Gewicht als Kraftgröße gemeint ist, wird der Ausdruck Gewichtskraft benutzt.

Die Nummerierung der Bilder, Gleichungen und Lehrbeispiele erfolgte kapitelweise. Kontrollfragen am Ende eines in sich abgeschlossenen Sachgebietes sollen die Lernzielkontrolle erleichtern. Praxishinweise machen auf die Bedeutung des jeweiligen Lernstoffes für die Berufstätigkeit aufmerksam. Dabei werden auch die früher verwendeten, nicht mehr zugelassenen Einheiten und die in der Praxis gebräuchlichen Zahlenwertgleichungen erwähnt.

Lehrbeispiele aus vielen Gebieten der Technik ermöglichen eine Vertiefung des dargebotenen Stoffes. Bei der Auswahl der Beispiele wurde eine enge Beziehung zur Praxis angestrebt.

Für häufig vorkommende Aufgabenarten werden Arbeitsschritte empfohlen. Dem Prinzip der Größengleichung folgend, sind auch bei den Zwischenrechnungen die Einheiten mitgeschrieben, so dass man bei umfangreichen Gleichungen nicht die Übersicht verliert. Nur wenn Einheiten sich offensichtlich herauskürzen, wurden sie weggelassen. Die Genauigkeit der Ergebnisse wurde in der Regel auf vier Ziffern beschränkt. Wird mit der gesamten vom Rechner angezeigten Stellenanzahl weitergerechnet, so ergeben sich in manchen Fällen etwas abweichende Resultate.

Weitere Übungsmöglichkeiten bietet die auf das Lehrbuch abgestimmte Aufgabensammlung „Mechanik und Festigkeitslehre – Aufgaben“. Sie enthält eine große Zahl vom Leser zu lösender Aufgaben.

Alle Tabellen und Diagramme (Bildnummern mit vorgesetztem A), die zum Lösen von Aufgaben benötigt werden, sind in einem separaten Anhang untergebracht, der auch eine Zusammenstellung der wichtigsten Formeln enthält. Die für Festigkeitsberechnungen erforderlichen Werkstoffkennwerte und sonstige Einflussziffern sowie Erfahrungswerte für erforderliche Sicherheiten bzw. zulässige Spannungen sind darin angegeben, womit die Berechnung vieler Bauteile ohne weitere Unterlagen möglich ist. Der lose beigefügte Anhang kann, z. B. bei Prüfungen, unabhängig vom Lehrbuch benutzt werden.

Besonderer Wert wurde auf eine Übereinstimmung mit dem im gleichen Verlag erschienenen Lehrbuch *Decker* „Maschinenelemente“ und den dazugehörigen „Maschinenelemente-Aufgaben“ gelegt. Die „Mechanik und Festigkeitslehre“ enthält gewissermaßen das theoretische Rüstzeug für die genannten Bücher.

Allen Kolleginnen und Kollegen und Lesern, die uns auf Verbesserungsmöglichkeiten hingewiesen haben, sagen wir herzlichen Dank. Bei den Mitarbeitern des Carl Hanser Verlages, besonders bei Frau Christina Kubiak und Herrn Frank Katzenmayer, bedanken wir uns für die gute Zusammenarbeit.

Wir hoffen, dass auch die 9. Auflage den Studierenden und den Lehrenden ebenso wie den bereits in der Praxis tätigen Technikern und Ingenieuren ein brauchbares Hilfsmittel werden möge. Anregungen und Verbesserungsvorschläge werden weiterhin dankbar entgegengenommen.

Bernd Kretschmer
Peter Möhler

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	11
1.1	Aufgaben und Gliederung der Mechanik	11
1.2	Größen und Einheiten	11
1.3	Koordinatensysteme	14
2	Statik starrer Körper	15
2.1	Die Kraft	15
2.1.1	Kennzeichnung und Darstellung von Kräften	15
2.1.2	Verschiebesatz und Wechselwirkungsgesetz	17
2.1.3	Freimachen und Lagerungsarten	18
2.2	Zentrales ebenes Kräftesystem	22
2.2.1	Das Kräfteparallelogramm	22
2.2.2	Zeichnerische Kräfteermittlung	23
2.2.3	Rechnerische Kräfteermittlung	28
2.3	Allgemeines ebenes Kräftesystem	32
2.3.1	Moment und Kräftepaar	33
2.3.2	Rechnerische Kräfteermittlung	36
2.3.3	Zeichnerische Kräfteermittlung	39
2.4	Räumliche Kräftesysteme	44
2.4.1	Zentrales räumliches Kräftesystem	44
2.4.2	Allgemeines räumliches Kräftesystem	47
3	Ebene Fachwerke	52
3.1	Aufbau, Annahmen und Voraussetzungen	52
3.2	Ermittlung von Stabkräften	53
3.2.1	Rechnerische Stabkraftermittlung	53
3.2.2	Zeichnerische Stabkraftermittlung	54
4	Schwerpunkt	57
4.1	Begriffsbestimmung, Grundlagen	57
4.2	Schwerpunktberechnung	58
4.2.1	Körper	58
4.2.2	Flächen	59
4.2.3	Linien	61
4.3	Gleichgewichtslagen, Standsicherheit	62
5	Reibung	65
5.1	Allgemeine Grundlagen	65
5.2	Haft- und Gleitreibung	66
5.2.1	Reibungsgesetz	66
5.2.2	Reibungswinkel, Selbsthemmung, Haftsicherheit	68
5.2.3	Reibung auf geneigter Ebene	71
5.3	Technische Anwendung des Reibungsgesetzes	74
5.3.1	Gleitführungen	74
5.3.2	Gewinde	76
5.3.3	Reibungskupplungen und -bremsen	79
5.3.4	Lager	81
5.3.5	Rollen und Rollenzüge	82
5.4	Seilreibung	84
5.4.1	Seilreibungsgleichung	84
5.4.2	Technische Anwendung der Seilreibung	85
5.5	Rollreibung	87

5.5.1	Rollwiderstand	87
5.5.2	Fahrwiderstand	88
6	Kinematik	90
6.1	Bewegungsarten	90
6.2	Geradlinige Bewegung	90
6.2.1	Gleichförmige geradlinige Bewegung	90
6.2.2	Ungleichförmige geradlinige Bewegung	92
6.3	Kreis- und Drehbewegung	99
6.3.1	Gleichförmige Kreis- und Drehbewegung	99
6.3.2	Ungleichförmige Kreis- und Drehbewegung	101
6.3.3	Übersetzung	104
6.4	Zusammengesetzte Bewegungen	107
6.4.1	Geradlinige Bewegungen	107
6.4.2	Waagerechter und schräger Wurf.	110
6.4.3	Radialbeschleunigung bei Kreisbewegung	114
6.4.4	Relativ- und Absolutbewegung, Coriolisbeschleunigung	115
7	Kinetik	120
7.1	Translation	120
7.1.1	Trägheitsgesetz, Grundgesetz der Dynamik.	120
7.1.2	Anwendung des Grundgesetzes der Dynamik.	122
7.1.3	Trägheitskraft, Prinzip von d'Alembert	125
7.1.4	Impuls, Impulssatz	127
7.2	Arbeit, Energie, Leistung	129
7.2.1	Arbeit einer Kraft	129
7.2.2	Energie und Energiesatz	132
7.2.3	Leistung und Wirkungsgrad.	137
7.3	Gerader zentrischer Stoß	141
7.3.1	Grundlagen	141
7.3.2	Elastischer Stoß.	142
7.3.3	Plastischer Stoß.	144
7.3.4	Wirklicher Stoß.	146
7.4	Rotation.	148
7.4.1	Grundgesetz der Dynamik für Drehbewegung	148
7.4.2	Trägheitsmomente, Steinerscher Satz	151
7.4.3	Drehimpuls, Drehimpulssatz.	155
7.4.4	Arbeit, Energie und Leistung bei Drehbewegung	156
7.4.5	Fliehkraft	162
8	Mechanische Schwingungen	167
8.1	Schwingungsarten.	167
8.2	Freie ungedämpfte Schwingungen	169
8.2.1	Schwingungen mit geradliniger Bewegung	169
8.2.2	Pendelschwingungen.	176
8.2.3	Dreh- oder Torsionsschwingungen	180
8.3	Freie gedämpfte Schwingungen	183
8.3.1	Dämpfungsarten	183
8.3.2	Geschwindigkeitsproportional gedämpfte Schwingungen	184
8.4	Erzwungene Schwingungen	188
8.4.1	Fremderregung von Schwingssystemen.	188
8.4.2	Federkrafterregung	189
8.4.3	Unwucht- oder Massenkrafterregung	192
8.4.4	Kritische Drehzahlen	196
8.4.5	Schwingungsisolierung	198

9	Festigkeitslehre	202
9.1	Spannung und Formänderung	202
9.1.1	Begriff der Spannung und der Festigkeit	202
9.1.2	Freischneiden, Schnittkräfte und -momente	203
9.1.3	Normal- und Tangentialspannungen	206
9.1.4	Beanspruchungsarten	207
9.1.5	Dehnung, Hookesches Gesetz, Elastizitätsmodul	209
9.1.6	Schiebung, Gleitmodul	211
9.1.7	Formänderungsarbeit	212
9.2	Lastfälle, Sicherheiten, zulässige Spannungen	213
9.2.1	Lastfälle, Betriebsarten	213
9.2.2	Werkstofffestigkeiten	215
9.2.3	Sicherheiten, zulässige Spannungen	217
9.3	Zug-, Druck- und Scherbeanspruchung	219
9.3.1	Beanspruchung auf Zug oder Druck	219
9.3.2	Reiß- und Traglänge bei Zugbeanspruchung	222
9.3.3	Zugspannungen durch Fliehkräfte	223
9.3.4	Wärmespannungen	224
9.3.5	Flächenpressung	225
9.3.6	Walzenpressung	228
9.3.7	Beanspruchung auf Scheren (Abscheren)	229
9.4	Biegebeanspruchung	233
9.4.1	Biegespannungen in geraden Trägern	233
9.4.2	Flächenmomente, Widerstandsmomente	235
9.4.3	Biegemomente, Quer- und Längskräfte	240
9.4.4	Berechnung biegebeanspruchter Bauteile	252
9.4.5	Schubspannungen bei Biegebeanspruchung	256
9.4.6	Durchbiegung	259
9.5	Verdrehbeanspruchung (Torsion)	264
9.5.1	Verdrehbeanspruchung kreisförmiger Querschnitte	264
9.5.2	Verdrehung nichtkreisförmiger Querschnitte	267
9.5.3	Verdrehwinkel, Formänderungsarbeit	268
9.6	Zusammengesetzte Beanspruchung	269
9.6.1	Überlagerung von Spannungen, Festigkeitshypothesen	269
9.6.2	Biegung mit Zug oder Druck	271
9.6.3	Biegung mit Verdrehung	274
9.7	Gestaltfestigkeit	277
9.7.1	Kerbwirkung, Bauteilfestigkeit	277
9.7.2	Kerbwirkungszahl, Spannungsgefälle	279
9.7.3	Berechnung auf Gestaltfestigkeit (Dauerhaltbarkeit)	281
9.7.4	Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen nach DIN 743	289
9.8	Knickung	295
9.8.1	Stabilitätsproblem Knicken	295
9.8.2	Elastische Knickung	296
9.8.3	Unelastische Knickung	298
9.8.4	Omega-Verfahren	299
10	Hydromechanik	301
10.1	Einteilung, Eigenschaften von Flüssigkeiten	301
10.2	Hydrostatik	302
10.2.1	Druckausbreitung in Flüssigkeiten	302
10.2.2	Hydrostatischer Druck	306
10.2.3	Druckkräfte gegen Gefäßwände	308
10.2.4	Auftrieb und Schwimmen	311
10.3	Hydrodynamik reibungsfreier Strömungen	316

10.3.1	Grundbegriffe	316
10.3.2	Kontinuitätsgleichung	317
10.3.3	Bernoullische Gleichung	318
10.3.4	Anwendungen der Kontinuitäts- und der Bernoullischen Gleichung	320
10.4	Kraftwirkungen stationärer Strömungen	327
10.4.1	Strömungskräfte	327
10.4.2	Rückstoßkraft eines Flüssigkeitsstrahls	329
10.4.3	Stoßkräfte von Fluidstrahlen	330
10.5	Hydrodynamik wirklicher Strömungen	332
10.5.1	Viskosität	332
10.5.2	Laminare und turbulente Strömung, Reynolds-Zahl	334
10.5.3	Energieverluste in Rohrleitungsanlagen	337
	Verzeichnis der angeführten DIN-Normen und Richtlinien	342
	Literaturhinweise	343
	Sachwortverzeichnis	344

Auf plus.hanser-fachbuch.de finden Sie die Beilage zum Lehrbuch mit Diagrammen, Formeln und Tabellen zum Download.

1 Einführung

1.1 Aufgaben und Gliederung der Mechanik

Lernziele:

- Die Aufgabenstellung der Technischen Mechanik erläutern.
- Die Gliederung der Mechanik in Teilgebiete angeben und die Inhalte der Teilgebiete erläutern.

Die Mechanik ist als das älteste Teilgebiet der Physik eine für die Technik besonders wichtige Naturwissenschaft. Sie ist die **Lehre von den Bewegungen der Körper und den Wirkungen der Kräfte** auf feste, flüssige und gasförmige Körper. In der Technischen Mechanik werden die physikalischen Lehrsätze auf Körper angewendet, die in der Technik als Maschinen, Fahrzeuge, Geräte oder deren Teile vorkommen. Zur **Aufgabenstellung der Technischen Mechanik** gehört die Entwicklung von Methoden zur schnellen Lösung technischer Probleme, wobei es nicht immer auf exakte, sondern auf in kürzester Zeit erreichbare, für die Praxis ausreichende Näherungslösungen ankommt.

Das Gesamtgebiet der Mechanik kann man in verschiedene Teilgebiete untergliedern:

Die **Kinematik** ist die Lehre von den Bewegungen, unabhängig von den dabei wirkenden Kräften.

Die **Dynamik** ist die Lehre von den Kräften und ihren Wirkungen. Sie wird unterteilt in die **Kinetik**, in der die Zusammenhänge zwischen Kräften und Bewegungen dargestellt werden, und in die **Statik** als Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte an einem Körper.

Man kann die Statik als Sonderfall der Dynamik ansehen, bei dem zwar Kräfte, aber keine Bewegungsänderungen (Beschleunigungen oder Verzögerungen) auftreten. Die Körper befinden sich im Gleichgewicht (in Ruhelage oder in gleichförmig geradliniger Bewegung). Sie werden vereinfacht als starr aufgefasst (**Statik starrer Körper**). Aufgabe der Statik ist die Ermittlung unbekannter Kräfte. Die Kenntnis der am Körper angreifenden Kräfte ist eine Grundlage der Festigkeitsberechnung technischer Bauteile.

Die **Schwingungslehre** behandelt Vorgänge, bei denen sich kennzeichnende Größen so ändern, dass sie nach bestimmter Zeit wiederkehren. Handelt es sich dabei um mechanische Größen, so spricht man von **mechanischen Schwingungen**.

Wie in der Kinematik reicht es mitunter aus, nur den zeitlichen Verlauf der Schwingung zu betrachten. Untersucht man die Ursachen einer Schwingung, so müssen auch die wirkenden Kräfte und Momente einbezogen werden. Dies entspricht der Kinetik.

Die **Festigkeitslehre** ist ein besonderes Teilgebiet der Technischen Mechanik. Es werden die elastisch-festen Körper untersucht, und zwar der Zusammenhang zwischen den äußeren und inneren Kräften und den durch diese hervorgerufenen Verformungen. Festigkeitsberechnungen gehören vornehmlich zu den Aufgaben des Konstrukteurs, der die Bauteile auf Haltbarkeit und Stabilität zu berechnen hat.

Die **Hydromechanik** behandelt in der Hydrostatik die Kraftverhältnisse in ruhenden Flüssigkeiten und in der Hydrodynamik die Vorgänge in bewegten (strömenden) Flüssigkeiten.

Die Mechanik kann auch nach dem Aggregatzustand (der Zustandsform) der Körper eingeteilt werden in die *Mechanik der festen Körper* (unterteilt in starre, elastische und plastische Körper), *Mechanik der flüssigen Körper* (Hydromechanik), *Mechanik der gasförmigen Körper* (Aeromechanik).

Praxisnachweis

Gründliche Kenntnisse der Technischen Mechanik und ihrer Verfahren zur Lösung technischer Probleme sind wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Arbeit von Technikern und Ingenieuren.

Kontrollfragen:

- Welche Aufgabe hat die Technische Mechanik?
- In welche Teilgebiete kann die Mechanik eingeteilt werden?
- Welche Inhalte haben die Kinematik, die Kinetik, die Statik und die Festigkeitslehre?

1.2 Größen und Einheiten

Lernziele:

- Die Begriffe physikalische Größe, Zahlenwert, Einheit und Größengleichung erklären.
- Die in der Technischen Mechanik vorkommenden Basisgrößen und Basiseinheiten sowie deren übliche Vielfache und Teile nennen und Einheiten umrechnen.
- Für zeichnerische Lösungen die Beträge von Größen in Streckenlängen umrechnen und umgekehrt.

Zur Formulierung der naturwissenschaftlichen Gesetze bedient man sich der Mathematik und gibt die Zusammenhänge als Gleichung an. Die Größen der Mechanik sind **physikalische Größen**, für die Buchstaben als Kurzzeichen (Symbole) eingesetzt werden, z. B. l für Länge, s für die Wegstrecke, A für Fläche, V für Volumen, m für Masse, t für Zeit, v für Geschwindigkeit. In den Gleichungen (Formeln) treten sie als Formelzeichen auf (Tab. 1).

Nach DIN 1313 wird der Größenwert als Produkt aus Zahlenwert und Einheit ausgedrückt, als Wortgleichung:

Größenwert = Zahlenwert \times Einheit.

Symbolisch wird eine physikalische Größe wie folgt angegeben: $G = \{G\} \cdot [G]$.

Darin bedeuten: G die Größe (durch Formelzeichen angegeben), $\{G\}$ der Zahlenwert der Größe, $[G]$ die Einheit der Größe.

In der Angabe $s = 400 \text{ m}$ bedeutet s die Größe, z. B. eine Wegstrecke, 400 ihren Zahlenwert ($\{s\} = 400$) und m als Meter ihre Einheit ($[s] = m$). Das Produkt „400 m“ ist der Größenwert oder Betrag (in der Messtechnik auch Messwert genannt). Der Zahlenwert gibt an, wievielfach die Einheit im Größenwert enthalten ist. Durch den Zahlenwert allein ist eine Größe nicht vollständig angegeben, die Einheit muss immer mitgeschrieben werden.

Gleichungen, in denen physikalische Größen durch Formelzeichen oder durch Zahlenwerte und Einheiten angegeben sind, heißen **Größengleichungen**. Darin dürfen außer den Zahlenwerten auch die Symbole für Einheiten gekürzt, multipliziert und dividiert werden (s. die Beisp. 1.1 bis 1.8).

Für den Begriff Einheit wird manchmal fälschlicherweise der Ausdruck **Dimension** verwendet. In DIN 1313 kennzeichnet man mit Hilfe von Dimensionen die Art einer Größe. So hat z. B. die Geschwindigkeit die Dimension Länge durch Dauer, aber die Einheit Meter durch Sekunde.

Durch das „Gesetz über Einheiten im Messwesen“ ist die Verwendung der Einheiten des Internationalen Einheitensystems (*SI-Einheiten*) vorgeschrieben. In der Technischen Mechanik werden folgende **SI-Basiseinheiten** der Dimensionen Länge (L), Masse (M), Dauer (T) und Temperatur (Θ) benutzt:

Größe		SI-Basiseinheit		SI-Basiseinheit	
Name	Zeichen	Name	Zeichen	Name	Zeichen
Länge	l, s	Meter	m	Länge	L
Masse	m	Kilogramm	kg	Masse	M
Zeit	t	Sekunde	s	Dauer	T
Temperatur	T	Kelvin	K	Temperatur	Θ
(Temperatur)	ϑ	°Celsius	°C		

Im Einheitengesetz sind die **Definitionen der Basiseinheiten** angegeben, wie sie von der Internationalen „General-Konferenz für Maß und Gewicht“ festgelegt wurden. Sie sind für das Meter und die Sekunde auf Atomstrahlung bezogen (das Meter wurde am 20. 10. 1983 nach der Lichtgeschwindigkeit neu festgelegt). Ursprünglich war das Meter als 40-millionster Teil des Erdumfanges definiert, später als Abstand zweier Markierungen auf einem in Paris aufbewahrten Stab, dem Urmeter. Die Sekunde war ursprünglich der 86400ste Teil des mittleren Sonnentages ($60 \text{ s/min} \cdot 60 \text{ min/h} \cdot 24 \text{ h/d} = 86400 \text{ s/d}$).

Das Kilogramm war ursprünglich definiert als die Masse von $1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ Liter}$ Wasser bei 4°C . Heute gilt: Ein Kilogramm ist die Masse des Internationalen Kilogrammprototyps, des in Paris aufbewahrten Urkilogramms.

Ein Kelvin ist der 273,15te Teil der Temperaturdifferenz zwischen dem absoluten Nullpunkt (tiefstmögliche Temperatur) und dem Tripelpunkt von Wasser. Ein Kelvin entspricht genau einem Grad Celsius ($^\circ \text{C}$), zwischen beiden Temperaturskalen gibt es nur eine Nullpunktverschiebung.

Die Einheiten für andere Größen, wie Geschwindigkeit, Kraft, Leistung usw., sind von den Basiseinheiten abgeleitet, sie werden aus ihnen gebildet (z. B. für die Geschwindigkeit die Einheit m/s bzw. $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Es werden auch Vielfache und Bruchteile von Einheiten verwendet (Tab. 2). Maßgebend für Einheiten ist DIN 1301, für Formelzeichen DIN 1304. Einige in der Technik übliche Vielfache und Teile der Basiseinheiten sind in Tab. 3 angegeben.

Beispiel 1.1

Für eine feingeschliffene Oberfläche ist eine Rautiefe von $6,3 \mu\text{m}$ zulässig. Wie viel mm sind das?

Lösung:

Gegeben: $R_t = 6,3 \mu\text{m}$.

Gesucht: R_t in mm.

Mit $1 \mu\text{m} = \frac{1}{1000} \text{ mm}$ (nach Tab. 3) wird

$$R_t = 6,3 \mu\text{m} = 6,3 \frac{1}{1000} \text{ mm} = 0,0063 \text{ mm}$$

oder durch Erweitern

$$R_t = 6,3 \mu\text{m} \frac{1 \text{ mm}}{1000 \mu\text{m}} = 0,0063 \text{ mm},$$

da sich μm herauskürzt.

Beispiel 1.2

Welche Innenhöhe in mm muss ein Behälter für ein Fassungsvermögen von 4000 Litern mindestens haben, wenn seine quadratische Grundfläche $2,5 \text{ m}^2$ beträgt?

Lösung:

Gegeben: $V = 4000 \text{ l} = 4 \cdot 10^3 \text{ dm}^3$, $A = 2,5 \text{ m}^2$.

Gesucht: h in mm.

Da $1 \text{ dm}^3 = (100 \text{ mm})^3$ und $1 \text{ m}^2 = (1000 \text{ mm})^2$ sind, betragen

$$V = 4 \cdot 10^3 \text{ dm}^3 \frac{(100 \text{ mm})^3}{\text{dm}^3} = 4 \cdot 10^9 \text{ mm}^3,$$

$$A = 2,5 \text{ m}^2 \frac{(1000 \text{ mm})^2}{\text{m}^2} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ mm}^2.$$

Aus der bekannten Gleichung für das Volumen $V = A \cdot h$ folgt für die gesuchte Innenhöhe

$$h = \frac{V}{A} = \frac{4 \cdot 10^9 \text{ mm}^3}{2,5 \cdot 10^6 \text{ mm}^2} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ mm} = 1600 \text{ mm}.$$

Mit den vorgenannten Umrechnungsbeziehungen erhält man auch ohne Zwischenrechnung in einem einzigen Rechnungsgang:

$$h = \frac{V}{A} = \frac{4 \cdot 10^3 \text{ dm}^3 \cdot (100 \text{ mm})^3 \cdot \text{m}^2}{2,5 \text{ m}^2 \cdot \text{dm}^3 \cdot (1000 \text{ mm})^2} = 1600 \text{ mm},$$

da sich dm^3 , m^2 und mm^2 herauskürzen.

Beispiel 1.3

Ein Geräteteil wiegt 0,0375 g. Seine Masse in mg ist anzugeben.

Lösung:

Gegeben: $m = 0,0375 \text{ g}$.

Gesucht: m in mg.

Nach den Tabn. 2 und 3 ist $1 \text{ mg} = 10^{-3} \text{ g}$ bzw. $1 \text{ g} = 1000 \text{ mg}$. Somit ist

$$m = 0,0375 \text{ g} \frac{1000 \text{ mg}}{\text{g}} = 37,5 \text{ mg} \text{ oder kürzer}$$

$$m = 0,0375 \cdot 1000 \text{ mg} = 37,5 \text{ mg}.$$

Beispiel 1.4

Wie viel kg wiegen die Massen 8,6 t und 4,2 Mt?

Lösung:

Gegeben: $m_1 = 8,6 \text{ t}$, $m_2 = 4,2 \text{ Mt}$.

Gesucht: m_1 und m_2 in kg.

Nach den Tabn. 2 und 3 ergeben sich:

$$m_1 = 8,6 \cdot 1000 \text{ kg} = 8600 \text{ kg},$$

$$m_2 = 4,2 \cdot 10^6 \text{ t} = 4,2 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \text{ kg} = 4,2 \cdot 10^9 \text{ kg}.$$

Beispiel 1.5

Die Zeitangabe „78 Min. 45 Sek.“ ist in Stunden, in Minuten und in Sekunden umzurechnen (Zahlenwerte als Dezimalzahlen).

Lösung:

Gegeben: $t = 78 \text{ min} + 45 \text{ s}$.

Gesucht: t in h, in min und in s.

Nach Tab. 2:

$$t = 78 \text{ min} + 45 \text{ s} = 78 \frac{1}{60} \text{ h} + 45 \frac{1}{3600} \text{ h} \\ = (1,3 + 0,0125) \text{ h} = 1,3125 \text{ h},$$

$$t = 78 \text{ min} + 45 \frac{1}{60} \text{ min} = (78 + 0,75) \text{ min} \\ = 78,75 \text{ min}$$

$$t = 78 \cdot 60 \text{ s} + 45 \text{ s} = (4680 + 45) \text{ s} = 4725 \text{ s}.$$

Bei zeichnerischen Verfahren und in Diagrammen werden Größen als Strecken dargestellt. Dafür benötigt man einen Maßstab, der zweckmäßigerweise als Maßstabsfaktor angegeben wird. Es gilt

$$\text{Maßstabsfaktor} = \frac{\text{darzustellende Größe}}{\text{zugeordnete Strecke}}$$

oder mit der Größe G und der zugehörigen Strecke G_{gez} :

$$\text{Maßstabsfaktor } m_G = \frac{G}{G_{\text{gez}}} \quad (1.1)$$

Entspricht z. B. 1 cm einer Zeichnung dem Größenwert 5 m, d. h. $1 \text{ cm} \hat{=} 5 \text{ m}$, dann beträgt der Längenmaßstabsfaktor $m_1 = 5 \text{ m/cm}$ (5 Meter je Zentimeter).

Aus Gl. (1.1) ergibt sich für eine darzustellende Größe G die zu zeichnende

$$\text{Streckenlänge } G_{\text{gez}} = \frac{G}{m_G} \quad (1.2)$$

Einer gezeichneten Strecke G_{gez} entspricht beim Maßstabsfaktor m_G die

$$\text{Größe } G = G_{\text{gez}} \cdot m_G \quad (1.3)$$

Mit den Maßstabsfaktoren wird bei Berechnungen wie mit Größen verfahren; die Einheiten sind immer mitzuschreiben.

Beispiel 1.6

In einem Diagramm sollen verschiedene Volumen durch Balken dargestellt werden. Mit welchem Maßstabsfaktor sind die Balkenlängen zu errechnen, wenn das größte Volumen von 200 m^3 mit einer Länge von 8 cm zu zeichnen ist?

Lösung:

Gegeben: $V = 200 \text{ m}^3$, $V_{\text{gez}} = 8 \text{ cm}$.

Gesucht: m_V in m^3/cm .

Entspr. Gl. (1.1) ist

$$m_V = \frac{V}{V_{\text{gez}}} = \frac{200 \text{ m}^3}{8 \text{ cm}} = 25 \text{ m}^3/\text{cm}.$$

Beispiel 1.7

Wie groß ist die zu zeichnende Streckenlänge in mm für einen Abstand von 10,5 m bei einer Maßstabsangabe $1 \text{ cm} \hat{=} 5 \text{ m}$?

Lösung:

Gegeben: $l = 10,5 \text{ m}$, $m_1 = 5 \text{ m/cm}$.

Gesucht: l_{gez} in mm.

Entspr. Gl. (1.2)

$$l_{\text{gez}} = \frac{l}{m_1} = \frac{10,5 \text{ m}}{5 \text{ m/cm}} = 2,1 \text{ cm} = 21 \text{ mm}.$$

Beispiel 1.8

Welchen Betrag in m/s hat eine Geschwindigkeit, die mit einer Strecke von 3,6 cm dargestellt ist, wenn die Zeichnung die Angabe $10 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ km/h}$ enthält?

Lösung:

Gegeben: $v_{\text{gez}} = 3,6 \text{ cm}$, $m_v = 20 \frac{\text{km/h}}{\text{cm}}$.

Gesucht: v in m/s.

Entspr. Gl. (1.3)

$$v = v_{\text{gez}} \cdot m_v = 3,6 \text{ cm} \cdot 20 \frac{\text{km/h}}{\text{cm}} = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$= 72 \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 20 \text{ m/s.}$$

Eine Größengleichung zeigt die Beziehung zwischen physikalischen Größen. In einer **Zahlenwertgleichung** wird lediglich die Beziehung zwischen den Zahlenwerten von Größen dargestellt. Sie gilt nur für bestimmte Einheiten, die stets besonders angegeben werden müssen. Beispiele für Zahlenwertgleichungen, die in der Technik gelegentlich vorkommen, werden am Ende der Abschnitte 6.3 und 7.4 erläutert.

Praxishinweis

Größengleichungen haben gegenüber Zahlenwertgleichungen den Vorteil, dass sie unabhängig von der Wahl der Einheiten gelten. Sie sind bevorzugt anzuwenden. Umrechnungen von Einheiten können mit ihnen übersichtlich durchgeführt werden. Bei Verwendung von Maßstabsfaktoren wird die Beziehung zwischen einer Größe und der zugehörigen Strecke ebenfalls durch eine Größengleichung ausgedrückt. Die noch häufig anzutreffende Schreibweise der in eckigen Klammern eingeschlossenen Einheitenzeichen ist nach DIN 1313 nicht zulässig.

Kontrollfragen:

- Was versteht man unter einer physikalischen Größe?
- Was ist eine Größengleichung?
- Welche SI-Basisdimensionen und welche SI-Basiseinheiten kommen in der Technischen Mechanik vor?
- Welche Vielfache und Teile der Basiseinheiten sind in der Technik üblich?
- Was versteht man unter Maßstabsfaktoren, und wozu dienen sie?

1.3 Koordinatensysteme

Lernziele

- Die Notwendigkeit von Koordinatensystemen erkennen.
- Den Aufbau eines rechtwinkligen Koordinatensystems erklären.
- Bezeichnungen und Vorzeichenregeln für kartesische Koordinatensysteme nennen.
- Die Ebene in Quadranten einteilen.

Die Lage einzelner Punkte in der Ebene oder im Raum kann mithilfe von Koordinatensystemen eindeutig bestimmt werden. Beim meist angewendeten kartesischen Koordinatensystem stehen die Koordinatenachsen senkrecht aufeinander (Bild 1.1). Die waagerechte x -Achse oder Abszisse und die senkrechte y -Achse oder Ordinate schneiden sich im Nullpunkt 0. Rechts vom Nullpunkt auf der Abszisse und oberhalb des

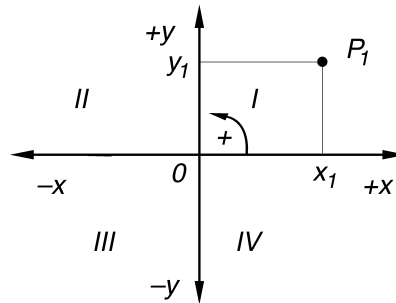


Bild 1.1 Kartesisches Koordinatensystem der Ebene

Nullpunktes auf der Ordinate liegen positive Werte, links bzw. unterhalb des Nullpunktes negative. Die Ebene wird durch die Koordinatenachse in vier Bereiche geteilt. Diese werden Quadranten genannt und von der positiven Abszisse aus im mathematisch positiven Drehsinn (linksdrehend) mit I, II, III und IV bezeichnet. Durch Angabe von Werten auf der Abszisse und der Ordinate lässt sich jeder Punkt in der Ebene eindeutig festlegen.

Sollen Punkte im Raum bestimmt werden, so muss eine dritte, senkrecht auf der durch die x - und y -Koordinaten gebildeten Ebene stehende und ebenfalls durch den Nullpunkt gehende Koordinate hinzugefügt werden. Nach DIN 4895 werden die Koordinaten mit x , y und z bezeichnet (Bild 1.2). Es sind auch davon abweichende Angaben für die Koordinatenachsen möglich, wie z. B. in DIN 1080 festgelegt.

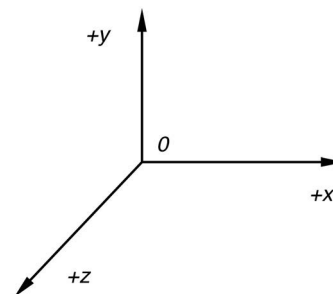


Bild 1.2 Räumliches kartesisches Koordinatensystem

Kontrollfragen:

- Wie ist ein rechtwinkliges Koordinatensystem aufgebaut und welche Vorzeichenregeln gelten?
- Was versteht man unter dem mathematisch positiven Drehsinn?
- Wie können einzelne Punkte in der Ebene und im Raum eindeutig definiert werden?
- Wo liegen die vier Quadranten im Koordinatensystem der Ebene?

2 Statik starrer Körper

2.1 Die Kraft

Lernziele

- Den Kraftbegriff definieren und die Kräfteinheit angeben, den Vektorcharakter von Kräften erläutern und Kräfte grafisch darstellen.
- Den Verschiebesatz und das Wechselwirkungsgesetz als Erfahrungssätze an Beispielen erläutern.
- Das Verfahren des Freimachens von Körpern als Voraussetzung für die Darstellung des Kräftegleichgewichts und für die Ermittlung von Kräften erläutern und auf Bauteile anwenden sowie die Auflagerarten und ihre symbolische Darstellung angeben.

2.1.1 Kennzeichnung und Darstellung von Kräften

Aus der Erfahrung des täglichen Lebens ist der Begriff Kraft vor allem als Muskelkraft bekannt. Ebenso kennt man die Federkraft, die Magnetkraft, die Windkraft, die Wasserkraft. Kräfte sind nicht sichtbar, sondern nur an ihren Wirkungen erkennbar.

Beim Spannen einer Feder durch den menschlichen Muskel wird die Feder verformt. Ursache der Verformung ist eine Kraft, ihre Wirkung ist die Formänderung. Wenn ein Magnet ein Stück Eisen anzieht, ist die Zugkraft selbst nicht zu sehen, jedoch ihre Wirkung, da das Eisenstück zum Magneten hin bewegt wird. Infolge der **Erdanziehungskraft**, der Schwerkraft, werden alle Körper von der Erde angezogen und beim Fallen in Richtung Erdmittelpunkt bewegt. In der Mechanik wird diese Kraft als **Gewichtskraft** bezeichnet. Auch durch die Gewichtskraft können Körper verformt oder in Bewegung gesetzt werden.

Allgemein gilt für die

Kraft als physikalische Größe:

Eine Kraft ist die Ursache für die Verformung oder Bewegungsänderung eines Körpers.

Demnach müssen überall, wo sich Geschwindigkeiten ändern oder Körper verformt werden, Kräfte wirken.



Bild 2.1 Gleichgewicht zweier Kräfte beim Seilziehen

Heben sich die Wirkungen zweier oder mehrerer Kräfte an einem ruhenden Körper auf, so bleibt er im **Ruhezustand**, d. h. die **Kräfte sind im Gleichgewicht**. Beispielsweise müssen die an

den Punkten A und B des Seiles in Bild 2.1 anfassenden Personen mit gleich großer Kraft ziehen, wenn das Seil in der Ruhelage bleiben soll. Um ein Gewichtsstück in der Ruhelage zu halten, muss man der Gewichtskraft mit einer gleich großen Kraft entgegenwirken (Bild 2.2). Nach der Definition des Kraftbegriffs besteht **auch bei der gleichförmig geradlinigen Bewegung Kräftegleichgewicht**, da keine Änderung der Geschwindigkeit erfolgt.

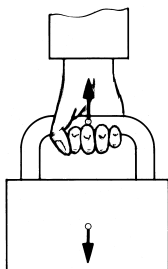


Bild 2.2 Kräftegleichgewicht zwischen Handkraft und Gewichtskraft

Das ist z. B. der Fall bei einer Hubbewegung mit gleich bleibender Hubgeschwindigkeit. Die dabei an einem Lasthaken (Bild 2.3) wirkenden Kräfte, die lotrecht nach unten gerichtete Gewichtskraft der angehängten Last und die nach oben gerichtete Zugkraft der Kette, sind gleich groß.

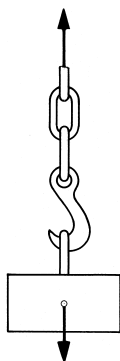


Bild 2.3 Kräftegleichgewicht an einem Lasthaken

Kräfte, die gleiche Wirkungen hervorrufen, sind gleich. Darauf beruht die Messbarkeit von Kräften. Die Messung von Kräften kann z. B. mittels geeichter Federwaagen oder Gewichtsstücke (Wägestücke) erfolgen. Die zu messende Kraft wird entweder mit der Federkraft oder der Gewichtskraft verglichen. Jede Messung ist ein Vergleich mit einer festgelegten Einheit.

Die **Einheit der Kraft** ist das N (Newton¹⁾, gesprochen: njutⁿ). Es ist eine aus den Basis-

¹⁾ *Isaak Newton* (1643 bis 1723), engl. Physiker

einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI-Einheiten) abgeleitete Einheit mit der Definitionsgleichung

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

In Worten lautet die *Definition der Kräfteinheit*:

1 N ist gleich der Kraft, die einem Körper mit der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s^2 erteilt.

In der Technik werden oftmals auch die Einheiten kN und MN verwendet ($1 \text{ kN} = 1000 \text{ N} = 10^3 \text{ N}$, $1 \text{ MN} = 10^6 \text{ N}$). Als Formelzeichen für die Kraft ist der Buchstabe F (von *force*, engl.) in DIN 1304 festgelegt. Verschiedene Kräfte werden durch Indizes¹⁾ unterschieden, z. B. F_1, F_2, F_a, F_b, F_A und dgl.

Die Definition der Kräfteinheit beruht auf der bewegungsändernden Kraftwirkung (s. auch DIN 1305) und folgt aus dem Grundgesetz der Dynamik: $F = m \cdot a$ (Gl. (7.3), Abschn. 7.1.1; die kinematische Größe Beschleunigung a mit der Einheit m/s^2 wird im Abschnitt 6.2.2 behandelt).

Die Erfahrung zeigt, dass die Wirkung einer Kraft nicht nur von ihrem Betrag (dem Größenwert) abhängt, sondern auch von ihrer Lage am Körper, gekennzeichnet durch den Angriffspunkt, und außerdem von ihrer Wirkrichtung, was am Beispiel eines Wagens in Bild 2.4 dargestellt ist.

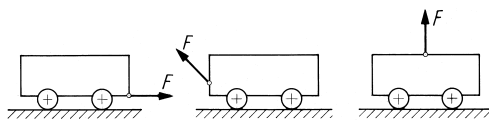


Bild 2.4 Gleich große Kräfte, die verschiedene Wirkungen hervorrufen

Die **Kraft** ist demnach **eine gerichtete Größe**. Physikalische Größen, die erst durch Betrag und Wirkrichtung vollständig angegeben sind, nennt man **Vektoren**, z. B. Kräfte, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen. Größen, die allein durch Zahlenwert und Einheit bestimmt sind, heißen **Skalare**, wie z. B. Zeit, Temperatur, Masse. Zur Kennzeichnung einer Kraft als vektorielle Größe wird nach DIN 1313 ein Pfeil über das Formelzeichen gesetzt, und man schreibt \vec{F} . Wenn nur der Betrag einer Kraft symbolisch anzugeben ist, wird F ohne Pfeil geschrieben.

Zur eindeutigen **Bestimmung einer Kraft** gehören folgende drei Angaben:

¹⁾ auch als Nebenzeiger oder Fußzeichen bezeichnet

Der **Betrag** oder Größenwert, gegeben durch das Produkt aus Zahlenwert und Einheit oder bei zeichnerischer Darstellung durch eine maßstäbliche Strecke (Bild 2.5), die Vektorlänge, die **Lage**, gekennzeichnet durch einen Punkt der Wirklinie, den Angriffspunkt, die **Richtung** oder der Richtungssinn, ausgedrückt durch den Richtungspfeil am Kraftvektor.

Unter der **Wirklinie** einer Kraft versteht man die durch den Kraftvektor verlaufende Gerade. Die Vektorlänge wird mit einem Kräftemaßstabsfaktor m_F errechnet. Da der Richtungspfeil am Kraftvektor die Kraft bereits als Vektor kennzeichnet, kann in Zeichnungen der Pfeil über F entfallen.

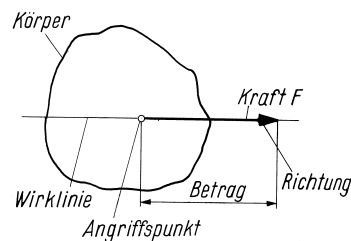


Bild 2.5 Zeichnerische Darstellung einer Kraft

Beispiel 2.1

Wie groß ist die zu zeichnende Vektorlänge in cm für eine Kraft von 1800 N bei einem Kräftemaßstabsfaktor von 400 N/cm?

Lösung:

Gegeben: $F = 1800 \text{ N}$, $m_F = 400 \text{ N/cm}$.

Gesucht: F_{gez} in cm.

Entspr. Gl. (1.2) wird

$$F_{\text{gez}} = \frac{F}{m_F} = \frac{1800 \text{ N} \cdot \text{cm}}{400 \text{ N}} = 4,5 \text{ cm.}$$

Beispiel 2.2

Welchen Betrag in kN hat eine Kraft, deren Vektor 32 mm lang ist, wenn die Zeichnung folgende Angabe enthält: $1 \text{ cm} \hat{=} 500 \text{ N}$?

Lösung:

Gegeben: $F_{\text{gez}} = 32 \text{ mm} = 3,2 \text{ cm}$, $m_F = 500 \text{ N/cm}$.

Gesucht: F in kN.

Entspr. Gl. (1.3):

$$F = F_{\text{gez}} \cdot m_F = 3,2 \text{ cm} \cdot 500 \text{ N/cm} = 1600 \text{ N} \\ = 1,6 \text{ kN.}$$

Eine besonders wichtige Kraft in der Statik ist die bereits erwähnte **Gewichtskraft** F_G (als Formelzeichen ist neben F_G auch der Buchstabe G genormt). Ihr Betrag kann aus der **Masse** m eines

Körpers und der infolge der Erdanziehung auf ihn wirkenden **Fallbeschleunigung** $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ errechnet werden nach der Gleichung $F_G = m \cdot g$ (Gl. (7.4), Abschn. 7.1.1). Sie ist *stets lotrecht nach unten gerichtet* (zum Erdmittelpunkt hin). Ihr Angriffspunkt ist der Schwerpunkt des Körpers (s. Abschn. 4.2.1). Damit sind Betrag, Lage und Richtung der Gewichtskraft bekannt.

Beispiel 2.3

Für drei Körper mit den Massen 1 kg, 50 kg und 10 t sind die Gewichtskräfte zu errechnen.

Lösung:

Gegeben: $m_1 = 1 \text{ kg}$, $m_2 = 50 \text{ kg}$,
 $m_3 = 10 \text{ t} = 10 \cdot 10^3 \text{ kg}$.

Gesucht: F_{G1} , F_{G2} und F_{G3} .

Nach der Gl. $F_G = m \cdot g$ wird

$$F_{G1} = m_1 \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ kgm/s}^2 \\ = 9,81 \text{ N},$$

$$F_{G2} = m_2 \cdot g = 50 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 490,5 \text{ N},$$

$$F_{G3} = m_3 \cdot g = 10 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 98,1 \text{ kN}.$$

In der Natur sind Kräfte entweder auf ein Volumen verteilt, **Volumenkräfte** genannt, oder auf eine Fläche als so genannte **Flächenkräfte**. Die Gewichtskraft und die Magnetkraft sind Volumenkräfte; sie wirken auf alle Teilchen eines Körpers. Flächenkräfte sind beispielsweise die Windkraft oder die auf eine Kolbenfläche wirkende Wasserkraft in einer Kolbenpumpe. Die Vorstellung der in einem Punkt wirkenden **Einzelkraft** ist eine Idealisierung. Die Einzelkraft wird ersatzweise für die verteilten Kräfte eingesetzt und ist als deren Summe ihre **Resultierende**. In der Statik verwendet man auch den Ausdruck **Streckenkraft** für Kräfte, die auf einer Bauteillänge verteilt wirken. Ferner unterscheidet man **ebene** (Abschn. 2.2 u. 2.3) und **räumliche Kräftesysteme** (Abschn. 2.4).

2.1.2 Verschiebesatz und Wechselwirkungsgesetz

Zur Erhaltung des Kräftegleichgewichts beim Seilziehen (s. Bild 2.1) spielt die Lage der Angriffspunkte der Kräfte keine Rolle. Ihre Wirkung bleibt dieselbe, unabhängig davon, ob die Angriffspunkte dicht beieinander oder weit von-

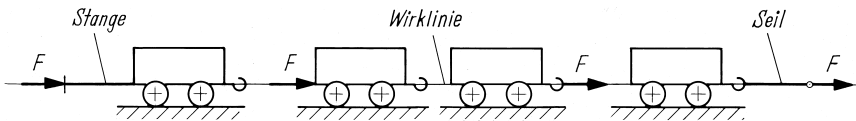


Bild 2.6 Auf einer Wirklinie an verschiedenen Punkten angreifende Kraft F

einander entfernt liegen. Ebenso verhält es sich beim Fortbewegen eines Wagens (Bild 2.6). Für den Bewegungsvorgang ist es bedeutungslos, ob an einem Seil oder unmittelbar am Zughaken gezogen oder auf derselben Wirklinie hinten am Wagen direkt oder mittels einer Stange geschoben wird. Diese Tatsache wird ausgedrückt im *Verschiebesatz*:

Kräfte am starren Körper dürfen auf ihrer Wirklinie beliebig verschoben werden.

Wird auf einen Körper eine Kraft ausgeübt, so reagiert er mit einer gleich großen Gegenkraft. Beim Seilziehen spürt man, dass das Seil an der Hand zieht. Am Lasthaken (s. Bild 2.3) zieht die Kette nach oben, der Haken zieht an der Kette nach unten. Ein Körper drückt mit der Gewichtskraft F_G auf seine Unterlage, diese drückt mit der gleich großen Kraft F gegen den Körper (Bild 2.7). Von den an einer Berührungsstelle zweier Körper paarweise auftretenden Kräften ist eine die Aktions-, die andere die Reaktionskraft. Diese Erfahrungstatsache wird ausgedrückt im *Wechselwirkungs- oder Reaktionsgesetz*:

Kräfte, mit denen zwei Körper aufeinander wirken, haben eine gemeinsame Wirklinie und sind gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet (Aktionskraft = Reaktionskraft).

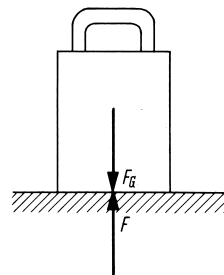


Bild 2.7 Gewichtskraft F_G und Gegenkraft F als Reaktionskraft

Das Zugfahrzeug und der Anhänger in Bild 2.8 drücken mit einem bestimmten Teil der auf sie wirkenden Gewichtskraft an jedem Rad gegen den Boden. Dieser wiederum drückt mit gleich großen, entgegengesetzt gerichteten Reaktionskräften, die auch **Stützkkräfte** genannt werden, gegen die Räder. Während der Fahrt zieht der Zugwagen am Hänger (Aktionskraft) ebenso wie der Hänger am Zugwagen (Reaktionskraft).

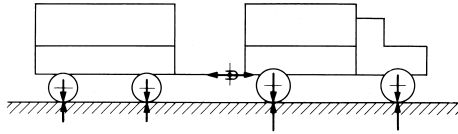


Bild 2.8 Aktions- und Reaktionskräfte an Fahrzeugen

Erfahrungstatsachen, wie der Verschiebesatz und das Wechselwirkungsgesetz, das erstmalig von *Newton* formuliert wurde, nennt man **Axiome**¹⁾. Das sind nicht beweisbare, sondern durch Erfahrung bestätigte Lehrsätze. Auf ihrer Grundlage werden andere Lehrsätze aufgebaut. Wegen des Verschiebesatzes sind Kräfte am starren Körper **linienflüchtige Vektoren**. Dies gilt nicht für die Ermittlung der Verformung von Bauteilen in der Festigkeitslehre. Dabei ist der Angriffspunkt von Bedeutung und die Kraft ist ein **gebundener Vektor**.

2.1.3 Freimachen und Lagerungsarten

Bei der Lösung von Aufgaben der Statik ist vorzugsweise das Kräftegleichgewicht an Körpern (Bauteilen, Maschinen, Geräten) zu untersuchen. Dafür ist die Kenntnis aller am Körper angreifenden Kräfte erforderlich. Diese Kräfte wirken an den Berührungsstellen mit anderen Körpern. Nach dem Wechselwirkungsgesetz treten an diesen Stellen Aktions- und Reaktionskräfte auf.

Will man sich über die an einem Körper angreifenden Kräfte Klarheit verschaffen, so löst man ihn in Gedanken an allen Stütz-, Berührungs- und Verbindungsstellen aus seiner Umgebung heraus (macht ihn frei) und *ersetzt die weggedachten Teile durch die Kräfte, die sie an der freigemachten Stelle auf den zu untersuchenden Körper ausüben*. Dieses Verfahren wird als **Freimachen** bezeichnet und beruht auf der Anwendung des Wechselwirkungsgesetzes. Im freigemachten Zustand kann ein Körper stark vereinfacht dargestellt werden. Bild 2.9 zeigt einen auf diese Weise freigemachten Hebel.

An allen Stellen, wo ein freizumachender Körper gedanklich von seiner Umgebung getrennt wird, in Lagern und Gelenken, an Stütz- und Führungsflächen, an Seilen, Aufhängungen usw., werden die auf ihn wirkenden Kräfte als Vektoren angesetzt. An Verbindungsstellen mit unbekannter Krafrichtung trägt man bei ebenen Kräftesystemen zwei senkrecht aufeinander wirkende Kräfte ein, da jede Kraft in zwei senkrechte Komponenten zerlegt werden kann (s. Beisp. 2.7). Liegt die Richtung der Komponenten nicht eindeutig fest, so sind sie in der Regel im positiven Sinne der Koordinatenachsen

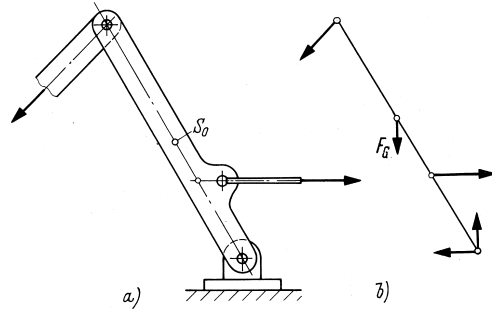


Bild 2.9 Freimachen eines Hebels
a) Hebelsystem, b) freigemachter Hebel

einzutragen. Die Gewichtskraft darf vernachlässigt werden, wenn sie gegenüber den anderen Kräften relativ klein ist.

Beim Freimachen werden die auf einen Körper wirkenden **äußeren Kräfte** dargestellt. Auch die Gewichtskraft ist eine äußere Kraft. Sollen **innere Kräfte** ermittelt werden, so denkt man sich einen Schnitt durch das Bauteil und trägt an der Schnittstelle die vom weggeschnittenen Teilstück ausgeübten Kräfte ein. Dieses Verfahren heißt **Freischneiden** (s. Abschn. 9.1.2). Dabei werden die inneren zu äußeren Kräften und können mit den Regeln der Statik bestimmt werden.

Die Berührungs- und Verbindungsstellen, an denen die Kräfteübertragung zwischen Bauteilen stattfindet, werden auch als **Auflager** bezeichnet, die dort wirkenden Reaktionskräfte dementsprechend als **Auflagerkräfte**. Durch die Art der Lagerung sind meistens Wirklinie und Richtung dieser Kräfte bestimmt. Nachfolgend werden die wichtigsten Kraftübertragungselemente und **Lagerungsarten** erläutert, die beim Freimachen eine besondere Rolle spielen, Reibungskräfte sind dabei vernachlässigt:

Seile

Seile, Riemen, Ketten (Bild 2.10) und ähnliche flexible Elemente können nur **Zugkräfte** übertragen. Durch Rollen werden die Wirklinien der Kräfte umgelenkt.

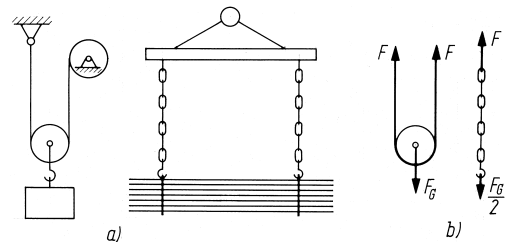


Bild 2.10 Kräfte an Seilen und Ketten
a) Anordnung, b) Seil und Kette freigemacht

¹⁾ *Axiom* (griech.) = Forderung

Pendelstützen

Pendelstützen und Zweigelenkstäbe (Bild 2.11) nehmen nur **Längskräfte** (Zug- oder Druckkräfte) auf.

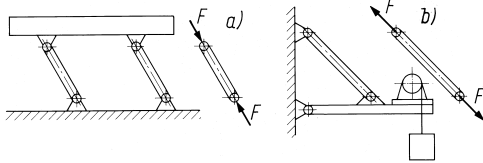


Bild 2.11 Pendelstütze und Zweigelenkstab
a) druckbeanspruchte Pendelstütze,
b) zugbeanspruchter Zweigelenkstab

Parallelführungen

Einseitige *Parallelführungen* (Bild 2.12) und *ebene Stützflächen* können nur **Druckkräfte** übertragen, deren Wirklinien senkrecht auf den Stütz- oder Führungsflächen stehen, so genannte **Normalkräfte**.

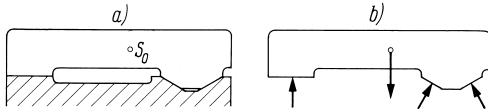


Bild 2.12 Freimachen von Parallelführungen
a) Maschinenteil mit Führungen,
b) freigemachtes Maschinenteil

Rollkörper

Das sind *Kugeln* und *Zylinder* (Bild 2.13) und ähnliche Körper. Sie übertragen nur **Druckkräfte**, deren Wirklinien durch ihren Mittelpunkt gehen bzw. auf der Tangente im Berührungspunkt senkrecht stehen (Normalkräfte). Das gilt ebenfalls für *gewölbte Berührungsflächen* beliebiger Form.

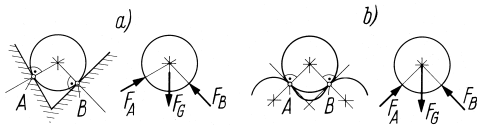


Bild 2.13 Stützkraften an Rollkörpern
a) ebene Berührungsflächen,
b) gewölbte Berührungsflächen

Loslager

Das sind Lager, die eine *Längsverschiebung* des gelagerten Bauteils (z. B. Achse oder Welle) *zulassen*, und *verschiebbare Gelenkverbindungen* (Bild 2.14). Sie übertragen wie Parallelführungen und Rollkörper nur **Druckkräfte** senkrecht

zur Führungsebene bzw. senkrecht zur möglichen Bewegungsrichtung (Normalkräfte).

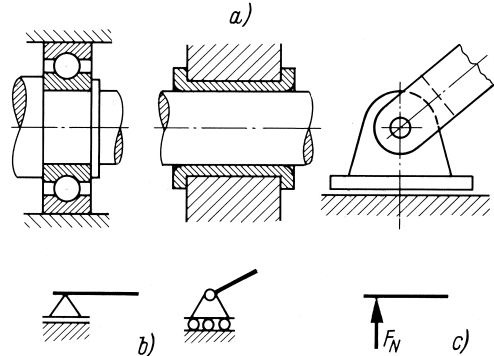


Bild 2.14 Loslager
a) Ausführungen, b) Symbole, c) freigemachtes Bauteil mit Loslagerkraft als Normalkraft F_N

Festlager

Dabei handelt es sich um Lager, die ein *Längsverschieben verhindern*, und um *feste Gelenkverbindungen* (Bild 2.15). Sie können Kräfte in beliebiger Richtung aufnehmen und sind für die Übertragung von **Längs- und Querkraften** (Axial- und Radialkräften) geeignet.

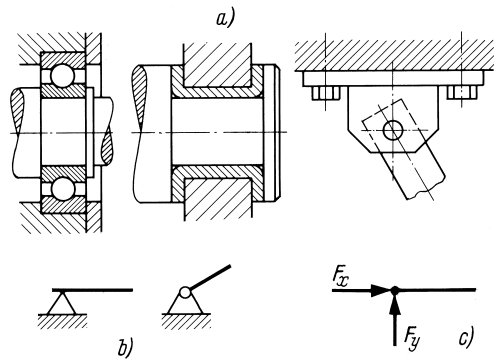


Bild 2.15 Festlager
a) Ausführungen, b) Symbole, c) freigemachtes Bauteil mit den Festlagerkräften F_x (Längskraft) und F_y (Querkraft)

Einspannungen

Eine *feste Einspannung* (Bild 2.16) *verhindert jede Art von Bewegung* des so gelagerten Bauteils. Sie lässt weder Verschiebungen noch Drehungen zu. Als Reaktionen können **Kräfte in beliebiger Richtung** (Längs- und Querkräfte) und ein **Moment** (Abschn. 2.3.1) auftreten.

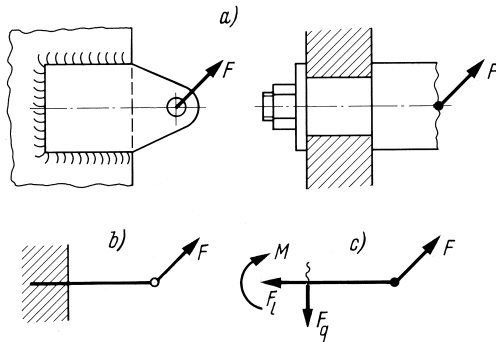


Bild 2.16 Feste Einspannungen

a) Ausführungen, b) Prinzipskizze, c) an der Einspannstelle freigeschnittenes Bauteil mit dem inneren Kräftesystem, bestehend aus Längskraft F_l , Querkraft F_q und Moment M

Die Lagerungen werden auch nach dem **Freiheitsgrad** beurteilt. Darunter versteht man die Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten eines Körpers. Im Raum hat jeder Körper sechs Bewegungsmöglichkeiten: Verschiebungen in Richtung der drei Koordinatenachsen und Drehungen um diese Achsen. Das sind sechs Freiheitsgrade. In der Ebene sind es nur drei, nämlich Verschiebungen in Richtung von zwei Koordinatenachsen und Drehung um eine zur Ebene senkrechte Achse. Lagerungen verringern die Zahl der Freiheitsgrade. Beim **Loslager** hat der Körper noch **zwei Freiheitsgrade**, das Lager ist **einwertig**. **Festlager** gestatten nur **einen Freiheitsgrad** und sind **zweiwertig**. Feste **Einspannungen** haben **keinen Freiheitsgrad** und sind **dreiwertig**. Mit der Wertigkeit wird die Anzahl der Unbekannten beim rechnerischen Ansatz zur Bestimmung der Auflagerreaktionen ausgedrückt.

Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass bei vorstehenden Betrachtungen Reibungskräfte vernachlässigt sind (die Berücksichtigung der Reibung beim Freimachen erfolgt im 5. Kapitel)!

Um Fehler beim Freimachen zu vermeiden, empfiehlt sich ein systematisches Vorgehen nach folgenden **Arbeitsschritten**:

1. **Schritt**: Prinzipskizze mit schematischer Darstellung des freizumachenden Bauteils anfertigen.
2. **Schritt**: Kraftangriffspunkte und Wirklinien der Kräfte einzeichnen unter Beachtung der durch die Lagerungsarten gegebenen Bedingungen.
3. **Schritt**: Kräfte unmaßstäblich mit Richtungs-pfeilen und Bezeichnungen eintragen.

Bild 2.17 zeigt das Freimachen am Beispiel einer Getriebewelle. Der 1. Schritt ist im Bildteil b) dargestellt. Im Bildteil c) sind der 2. und 3. Schritt vollzogen.

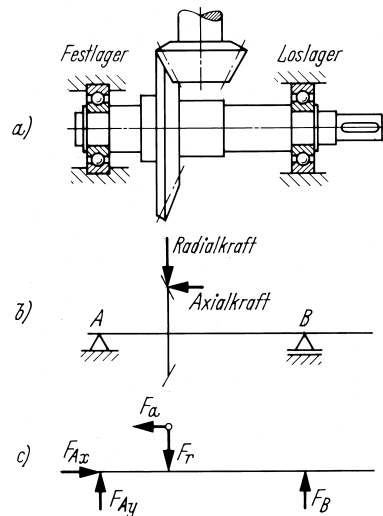


Bild 2.17 Getriebewelle mit Los- und Festlager

a) Zeichnung, b) Prinzipskizze, c) freigemachte Welle

Am Kegelrad tritt außer den angegebenen Kräften (Bild 2.17b) noch eine zur Zeichnungsebene senkrecht wirkende Tangentialkraft auf, die hier nicht eingetragen wurde. Die Kräfte an Kegelrädern ergeben ein **räumliches Kräftesystem** (Abschn. 2.4, s. a. Beisp. 2.33). Die Eigen-gewichtskraft der Welle kann vernachlässigt werden.

Beispiel 2.4

Bild 2.18a zeigt in vereinfachter Darstellung den Kurbeltrieb eines Verbrennungsmotors. Die Pleuelstange ist freizumachen unter Vernachlässigung ihres Eigengewichts.

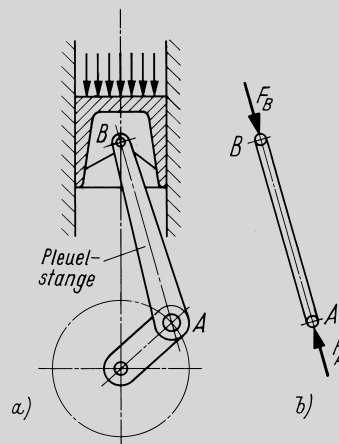


Bild 2.18 Freimachen einer Pleuelstange
a) Kurbeltrieb als Tauchkolben-Triebwerk,
b) freigemachte Pleuelstange

Sachwortverzeichnis

- λ, Re -Diagramm 338
- ω, t -Diagramm 100
- s, t -Diagramm 91
- v, t -Diagramm 91

- Abklingkoeffizient 184
- Abklingkonstante 184
- Abklingzeit 184
- Abscheren 229
- Absolutbeschleunigung 117–118
- Absolutdruck 307
- absolute Bewegung 115
- absolute Rauigkeit 336
- Absolutgeschwindigkeit 116
- Abszisse 14
- Addition, geometrische 270
- Addition, vektorielle 22, 119, 270
- Adhäsion 333
- Aggregatzustand 11
- Ähnlichkeitsmechanik 336
- aktive Schwingungsstörung 199
- allgemeine Bewegung 90
- allgemeine Wurfbewegung 112
- Amplitude 171
- Amplitude, ertragbare 291
- Amplitudenfrequenzgang 190
- Amplitudenverhältnis 186
- Anfangsphasenwinkel 171
- Anstrengungsverhältnis 271
- Antriebsmoment 78
- Anwendungsfaktor 215
- Anzahl der Umläufe 99
- Anziehungsmoment 79
- aperiodische Bewegung 184
- aperiodischer Grenzfall 185
- Aräometer 314
- Arbeit 129, 156
- Arbeit, mechanische 129
- Arbeit, spezifische 319
- Arbeitsdiagramm 129
- Arbeitssatz 133
- Arbeitsvermögen 132
- Archimedisches Prinzip 312
- a, t -Diagramm 94
- Atmosphärendruck 307
- atmosphärische Druckdifferenz 307
- äußere Kräfte 18
- Aufdruckkraft 311
- Auflager 18
- Auflagerkräfte 18
- Auftrieb 312
- Ausfluss aus offenen Behältern 322
- Ausfluss durch Fallrohre 326
- Ausflussgeschwindigkeit 322
- Ausflussgeschwindigkeit, effektive 324
- Ausflussgesetz 322
- Ausflusszahl 324
- Auslenkung 170
- Ausschlag der Vergleichsspannung 287
- Aussetzbetrieb 214
- autonome Schwingungen 168

- axiales Flächenmoment 2. Grades 234, 237
- axiales Widerstandsmoment 234, 238
- Axialkraft 250
- Axiallager 81
- Axiom 18, 22, 120, 121

- Bahn 90
- Bahnkurve 110
- Bahnlinie 317
- Bandbremsen 85
- bar 301
- Basiseinheiten 12
- Bauteile, biegebeanspruchte 252, 284
- Bauteile, torsionsbeanspruchte 286
- Bauteile, zugbeanspruchte 282
- Bauteile, zusammengesetzt beanspruchte 287
- Bauteil-Fließgrenze 291
- Bauteil-Wechselfestigkeit 291
- Bauteilfestigkeit 277
- Beanspruchung 202
- Beanspruchung, dynamische 214
- Beanspruchung, ruhende 213, 215
- Beanspruchung, schwellende 213
- Beanspruchung, schwingende 214, 216
- Beanspruchung, statische 213
- Beanspruchung, wechselnde 214
- Beanspruchung, zusammengesetzte 208, 269
- Beanspruchungsarten 207
- Befestigungsgewinde 78
- Beharrungsvermögen 120
- Belastung 202
- Berechnung auf Gestaltfestigkeit 281
- Bernoullische Gleichung 317–318, 337
- Bernoullische Konstante 319
- Bernoullisches Gesetz 319
- Beschleunigung 93
- Beschleunigung, konstante 94
- Beschleunigung, negative 93
- Beschleunigungsarbeit 131
- Beschleunigungskraft 121
- Bestimmung einer Kraft 16
- Betrag 12
- Betriebsart 214
- Betriebsfaktor 215
- Betriebsfestigkeit 278
- Betriebsfestigkeitsberechnung 219
- Beulen 295
- Bewegung, absolute 115
- Bewegung, allgemeine 90
- Bewegung, aperiodische 184
- Bewegung, geradlinige 90
- Bewegung, gleichförmige 90
- Bewegung, gleichmäßig beschleunigte 93
- Bewegung, gleichmäßig verzögerte 95
- Bewegung, quasiperiodische 185
- Bewegung, räumliche 90
- Bewegung, relative 115
- Bewegung, resultierende 107
- Bewegung, ungleichförmige 90, 92
- Bewegung, zusammengesetzte 90, 107
- Bewegungsarten 90

- Bewegungsgewinde 77
 Bewegungsgleichung 170
 Bewegungsgleichung, linearisierte 177
 bezogenes Spannungsgefälle 280, 287
 Bezugsradius 296
 biegebeanspruchte Bauteile 252, 284
 Biegebeanspruchung 207, 233
 Biegedruckspannung 235
 Biegefestigkeit 215
 Biegegrenze 215
 biegekritische Drehzahl 196
 Biegelinie 259
 Biegemoment 204, 234, 241
 Biegemomentenfläche 241
 Biegemomentenlinie 250
 Biegeschwellfestigkeit 217
 Biegeschwingungen 174
 Biegespannung 233–234
 Biegesteifigkeit 259
 Biegewechselfestigkeit 217
 Biegezugspannung 235
 Biegung mit Druck 271
 Biegung, reine 235
 Biegung, schiefe 235
 Biegung mit Verdrehung 274
 Biegung mit Zug 271
 Bodendruckkraft 308
 Bremsen 79
 Bremsmoment 80
 Bruchhypothesen 270
 Bruch-Scherkraft 232
- Coriolisbeschleunigung 117–118
 Coulombsches Reibungsgesetz 66
 Cremonaplan 55
- Dampfdruck 326
 Dämpfung 183
 Dämpfung, schwache 185
 Dämpfung, starke 184
 Dämpfungsarten 183
 Dämpfungsgrad 184
 Dämpfungskoeffizient 184
 Dämpfungskraft 183–184
 Dauerbetrieb 214
 Dauerbruch 278
 Dauerfestigkeit 216, 278
 Dauerfestigkeitsnachweis 290
 Dauerfestigkeitsschaubild 216
 Dauerschwingversuch 216
 Dauerstandfestigkeit 215
 0,2%-Dehngrenze 211
 Dehnung 209
 Dekrement, logarithmisches 186
 deterministische Schwingungen 167
 Dichte 121, 314
 Dichtebestimmung 313
 Diffusor 321
 Dimension 12
 DIN-Normen 342
 Drallsatz 155
 Drehbewegung 99
 Drehbewegung, gleichmäßig beschleunigte 102
 Drehbewegung, gleichförmige 101
 Drehimpuls 155
 Drehimpulserhaltungssatz 156
 Drehmoment 34, 156, 161
 Drehmoment, übertragbares 81
 Drehschwinger 191
 Drehschwingung 180
 Drehsinn eines Moments 33
 Drehstoß 155
 Drehwinkel 100, 102
 Drehzahl 99
 Drehzahl, biegekritische 196
 Drehzahlen, kritische 196
 Drehzahl, verdrehkritische 198
 Drillbiegung 250
 Drillflächenmoment 2. Grades 267
 Drillwiderstandsmoment 267
 Druck 301
 Druck, dynamischer 320
 Druck, hydrostatischer 306
 Druck, piezometrischer 319
 Druck, statischer 320
 Druckausbreitungsgesetz 302
 Druckbeanspruchung 207
 Druckdifferenz, atmosphärische 307
 Druckeinheit 302
 Druckenergie 318
 Druckfestigkeit 211, 215
 Druckkraft 304
 Druckmittelpunkt 310
 Druckschwellfestigkeit 217
 Druckspannung 220
 Druckwandler 304
 Durchbiegung 259–260, 262
 Durchflusskoeffizient 322
 Düse 321
 Dynamik 11
 dynamische Beanspruchung 214
 dynamisches Gleichgewicht 125
 dynamische Stützziffer 280
 dynamische Viskosität 333
 dynamischer Druck 320
- Ebene, schiefe 71
 effektive Ausflussgeschwindigkeit 324
 effektive Strömungsgeschwindigkeit 322
 Effektivspannung 209
 Eigenkreisfrequenz 170, 173
 Eigenschwingung 170
 Einflussfaktoren 290
 Einheit 11–12
 Einheit der Kraft 15
 Einheitengesetz 12, 121
 Einscheibendrehschwinger 180
 Einschwingzeit 189
 Einspannungen 19–20
 Einzelkraft 17
 elastische Knickung 296
 elastische Linie 259
 elastische Schwinger 172
 elastischer Stoß 142
 Elastizitätsgrenze 210
 Elastizitätsmodul 210
 Energie 132, 157
 Energie, kinetische 133
 Energie, piezometrische 319
 Energie, potenzielle 133

- Energie, spezifische 319
 Energiebilanz 135
 Energieerhaltungssatz 135
 Energieflussdiagramm 135
 Energieformen 133
 Energiegleichung 135, 318
 Energieverluste in Rohrleitungsanlagen 337
 Entstörung 198
 Entwurfsberechnung 219
 Erdanziehungskraft 15
 Ermüdungsbruch 289
 Erregeramplitude 189
 Erregerfunktion 189, 191, 195
 Erregerkreisfrequenz 189
 ertragbare Amplitude 291
 erzwungene Schwingungen 168, 188
 Euler-Hyperbel 298
 Eulersche Gleichungen 296
 Eytelweinsche Gleichung 85
- Fachwerke 52
 Fadenpendel 177
 Fahrbedingung 89
 Fahrwiderstand 89
 Fahrwiderstandszahl 89
 Fall, freier 97
 Fallbeschleunigung 17, 97, 121
 Fallgeschwindigkeit 97
 Faser, neutrale 233
 Feder-Masse-Schwinger 169, 176
 Federkonstante 132
 Federkrafterregung 188–189
 Federrate 132, 170, 175
 Federschaltungen 173
 Festigkeit 202
 Festigkeitsberechnung 219
 Festigkeitsgrenze 202
 Festigkeitshypothesen 269–270
 Festigkeitslehre 11, 202
 Festigkeitsnachweis 218
 Festigkeitsnachweis, statischer 291
 Festigkeitsverhältnis 271
 Festlager 19–20
 FKM-Richtlinie 219, 281
 Flächenkräfte 17
 Flächenmoment 235
 Flächenmoment 1. Grades 59, 235
 Flächenmoment 2. Grades 234, 236
 Flächenmoment 2. Grades, axiales 234, 237
 Flächenpressung 207, 225
 Flächenpressung, mittlere 227
 Flachführung 74
 Flachgewinde 76
 Flachriementriebe 86
 Flankendurchmesser 76
 Flankenwinkel 77
 Flaschenzug 83
 Fließgrenze 210
 Fliehkraft 163
 Fliehzugspannung 223
 Flüssigkeit, ideale 302
 Flüssigkeit, reale 302
 Flüssigkeitsreibung 65
 Formänderungsarbeit 132, 145, 212, 263, 268
 Formzahl 278
- freie gedämpfte Schwingungen 183
 freie Schwingungen 168
 freier Fall 97
 Freiheitsgrad 20
 Freiheitsgrade 169
 Freimachen 18
 Freischneiden 18, 203
 Freiträger 242
 fremderregte Schwingung 168
 Fremderregung 188
 Frequenz 99
 Führungsbewegung 115
 Führungsgeschwindigkeit 116
 Füllstäbe 52
- gedämpfte Schwingung 168
 gefährdete Querschnitte 219
 Gefäße, kommunizierende 306
 geometrische Addition 270
 geometrischer Größeneinflussfaktor 290
 geradlinige Bewegung 90
 Gesamteinflussfaktor 291
 Gesamtfederrate 173
 Gesamtübersetzung 106
 Gesamtwirkungsgrad 139
 Geschwindigkeit 91
 Geschwindigkeit, mittlere 93–94
 Geschwindigkeit, resultierende 108
 Geschwindigkeitsänderung 93
 Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz 94
 geschwindigkeitsproportional gedämpfte Schwingungen 184
 Geschwindigkeitszahl 324
 Gesetz von Hagen-Poiseuille 335
 Gesetz von Stokes 335
 Gestalt-Ausschlagsfestigkeit 282, 284, 286
 Gestalt-Wechselfestigkeit 281
 Gestaltfestigkeit 218, 278, 290
 Gestaltfestigkeitsnachweis 282
 Gestaltfestigkeitsschaubild 281
 Gewicht, spezifisches 128
 Gewichtskraft 15–16, 22, 57, 121
 Gewinde 76
 Gewinde, metrisches 78
 Gewindearten 77
 Gewindereibungswinkel 77
 Gewindereibungszahl 77, 79
 Gleichdruckturbine 331
 gleichförmige Bewegung 90
 Gleichgewicht, dynamisches 125
 Gleichgewicht, indifferentes 63
 Gleichgewicht, labiles 63
 Gleichgewicht, stabiles 63
 Gleichgewichtsbedingung 25, 30, 37, 42, 45, 47
 Gleichgewichtskraft 24, 28, 31
 Gleichgewichtslagen 62, 314
 Gleichheit der zugeordneten Schubspannungen 212
 gleichmäßig beschleunigte Bewegung 93
 gleichmäßig beschleunigte Drehbewegung 102
 gleichmäßig verzögerte Bewegung 95
 Gleitmodul 211
 Gleitreibung 65, 67
 Gleitreibungskraft 66
 Gleitreibungsmoment 81
 Gleitreibungswinkel 68

- Gleitreibungszahl 66
 Gravitationskraft 121
 Grenzfall, aperiodischer 185
 Grenz-Schwingspielzahl 216
 Grenzsclankheitsgrad 296
 Grenzspannungen 202
 Größe 11, 13
 Größen, physikalische 11
 Größenbeiwert 279
 Größeneinfluss 279
 Größeneinflussfaktor, geometrischer 290
 Größeneinflussfaktor, technologischer 290
 Größengleichungen 12
 Größenwert 11
 Grundbeanspruchungsarten 207
 Grundgesetz der Dynamik 121, 125, 127, 148
 Guldinsche Regeln 64
 Gurtförderer 87
- Haftreibung 65
 Haftreibungskraft 66
 Haftreibungsmoment 81
 Haftreibungswinkel 68
 Haftreibungszahl 66
 Haftsicherheit 69
 Haltemoment 81
 Hangabtriebskomponente 123
 harmonische Schwingung 167, 169, 171
 Hauptlasten 214
 Hebelarm der Rollreibung 87
 Hektopascal 302
 Hertz 172
 Hertzsche Gleichung 228
 Hertzsche Pressung 228
 heteronome Schwingungen 168
 Höhe, metazentrische 315
 Hookesche Gerade 210
 Hookesches Gesetz 210
 Hubarbeit 131
 Hydraulik 301
 hydraulisch glattes Verhalten 338
 hydraulisch raues Verhalten 338
 Hydrodynamik 301, 316, 332
 Hydromechanik 11, 301
 Hydrostatik 301
 hydrostatische Waage 313
 hydrostatischer Druck 306
 hydrostatisches Paradoxon 309
 Hypothese der größten Gestaltänderungsenergie 271
 Hypothese der größten Normalspannung 271
 Hypothese der größten Schubspannung 271
- ideale Flüssigkeit 302
 Impuls 127
 Impulsänderung 127
 Impulserhaltungssatz 128
 Impulsmoment 155
 Impulssatz 127
 Impulsstrom 327
 indifferentes Gleichgewicht 63
 Inertialsysteme 120
 inkompressibel 302
 innere Reibung 66, 301, 332
 instationäre Strömung 317
- ISO 213
 Iteration 340
- Joule 129, 132
- Kalorie 141
 Kaltverfestigung 282
 Kavitation 326
 Keilreibungszahl 74
 Kelvin 12
 Kennkreisfrequenz 184
 Kerbempfindlichkeit 278
 Kerbradius 278
 Kerbspannung 278
 Kerbtiefe 278
 Kerbwirkung 277
 Kerbwirkungszahl 279–280, 290
 Ketten 18
 Kilogramm 12
 Kilopond 128
 Kinematik 11, 90
 kinematische Viskosität 333
 Kinetik 11, 120
 kinetische Energie 133
 Kippen 295
 Knickfälle 296
 Knickkraft 295–296
 Knicklänge 296
 Knickspannung 295–296, 298
 Knickung 295
 Knickung, elastische 296
 Knickung, unelastische 298
 Knickzahl 299
 Knoten 52
 Knotenpunkte 52
 Kohäsionskraft 202
 kommunizierende Gefäße 306
 Komponenten 22, 29, 44
 Kompressionsmodul 301
 konstante Beschleunigung 94
 Kontinuitätsgesetz 318
 Kontinuitätsgleichung 317–318
 Kontraktionszahl 324
 Koordinatenachsen 14
 Koordinatensysteme 14
 Koppelschwingungen 169
 Körperpendel 178
 Kraft 15–16
 Kraft, resultierende 22
 Kräfte, äußere 18
 Kräfte, innere 202
 Krafteck 23
 Kräftegleichgewicht 15
 Krafteinheit 16
 Kräftepaar 34
 Kräfteparallelogramm 22
 Kräfteplan 25
 Kräftepolygon 26
 Krafterregung 188, 191
 Kräftesystem, inneres 203
 Kräftesystem, zentrales 22
 Kräftesysteme, räumliche 44
 Kräftezug 23
 Kraftfluss 277
 Kraftlinien 278

- Kraftmoment 33
 Kranbau 214
 Kreisbewegung 90, 99
 Kreisfrequenz 170
 Kriechen 215
 kritische Drehzahlen 196
 kritische Reynolds-Zahl 336
 Krümmung 259
 Kupplungsmoment 79
- labile Schwimmlage 314
 labiles Gleichgewicht 63
 Lageplan 25
 Lager 81
 Lagerreibungsmoment 81
 Lagerreibungszahl 81
 Lagerungsarten 18
 laminare Rohrströmung 334
 Längskraft 241
 Längskraftfläche 241
 Last 22
 Lastfall 213–214
 Lastspiel 214
 Lastspielzahl 216
 Leibungsspannung 227
 Leistung 137
 Leistung einer Kraft 137
 Leistung eines Drehmoments 161
 lineare Schwingung 169
 linearisierte Bewegungsgleichung 177
 Linie, elastische 259
 logarithmisches Dekrement 186
 Longitudinalschwingungen 169
 lose Rolle 83
 Loslager 19–20
 Luftdruck 307
- Maßstabsfaktor 13
 Manometer 306
 Masse 120
 Masse, reduzierte 154
 Masse, schwere 121
 Masse, träge 121
 Massenkraft 125
 Massenkrafterregung 188, 192, 196
 Massenmittelpunkt 58
 Massenmoment 2. Grades 149
 Massenpunkt 90, 128
 Massenstrom 318
 Massenträgheitsmoment 149
 mathematisches Pendel 176
 Mechanik 11
 mechanische Arbeit 129
 mechanische Schwingungen 11
 metazentrische Höhe 315
 Metazentrum 315
 metrisches Gewinde 78
 Mikrorissbildung 278
 Mindestschlankheitsgrad 296
 Mischreibung 65
 Mittelspannung 214, 216
 Mittelspannungsfaktor 290–291
 mittlere Flächenpressung 227
 mittlere Geschwindigkeit 93–94
 Modul 105
- Moment 34–35
 Moment, statisches 33
 Moment der Trägheitskräfte 150
 Moment einer Kraft 33
 Momentanbeschleunigung 93, 115
 Momentangeschwindigkeit 93
 Momentenanschluss 231
 Momentenmaßstab 248
 Momentensatz 34
- negative Beschleunigung 93
 Neigungswinkel 260, 262
 Nennkraft 215
 Nennmoment 215
 Nennspannung 209
 neutrale Faser 233
 Newton 15, 121
 Newtonmeter 33
 Newtonsche Flüssigkeit 333
 Nicht-Newtonsche Flüssigkeit 333
 nichtkreisförmige Querschnitte 267
 nichtlineare Schwingung 169, 177
 nichtperiodische Schwingung 168
 Nietverbindung 231
 Norm-Fallbeschleunigung 97
 Normalbeschleunigung 114
 Normalkraft 204
 Normalkräfte 19
 Normalspannung 206
 Nullebene 233
 Nulllinienverschiebung 272
 Nullstab 52
 Nutzarbeit 139
 Nutzleistung 139
- Oberflächenbeiwert 278
 Obergurt 52
 Oberspannung 214, 216
 Omega-Verfahren 299
 Ordinate 14
- Paradoxon, hydrostatisches 309
 Parallelführungen 19
 Parallelschaltung 173
 Parallelverschieben einer Kraft 35
 parametererregte Schwingungen 168
 Pascal 202, 301
 Pascalsche Waage 308
 passive Schwingungsentstörung 200
 Peltonturbine 331
 Pendel, mathematisches 176
 Pendel, physisches 178
 Pendellänge, reduzierte 178
 Pendelschwingungen 176
 Pendelstützen 19
 Periodendauer 99, 167, 173, 185
 periodische Schwingungen 167
 Phasenfrequenzgang 191
 Phasenwinkel 171
 physikalische Größen 11
 physisches Pendel 178
 piezometrische Energie 319
 piezometrischer Druck 319
 Pitotrohr 320
 plastischer Stoß 144

- Poissonsche Zahl 209
polares Flächenmoment 2. Grades 236, 265
polares Widerstandsmoment 238, 266
positive Schnittgrößen 241
potenzielle Energie 133
Prandtl'sches Staurohr 321
Prinzip von d'Alembert 125, 150
Prismenführung 74
Proportionalitätsgrenze 210
- Quadranten 14
quasiperiodische Bewegung 185
Querdehnung 209
Querkraft 204, 241
Querkraftfläche 241
Querschnitte, gefährdete 219
Querschnitte, nichtkreisförmige 267
Querschnittsformzahl 215
Quetschgrenze 211, 215
- Radialbeschleunigung 102, 114
Radiallager 81
Radiant 100
Randfaser 233
Rauheitsfaktor 290
Rauigkeit, absolute 336
Rauigkeit, relative 336
räumliche Bewegung 90
räumliche Kräftesysteme 44
Reaktionsgesetz 17
Reaktionskraft 17
reale Flüssigkeit 302
reduzierte Masse 154
reduzierte Pendellänge 178
reduziertes Trägheitsmoment 159–160
Reißlänge 222
Reibradgetriebe 105
Reibradius 80
Reibung 65
Reibung, innere 66, 301, 332
Reibungsarbeit 130
Reibungsarten 65
Reibungsgesetz 66
Reibungsgesperre 80
Reibungskegel 69
Reibungskraft 65–67
Reibungskupplungen 79
Reibungsmoment 78
Reibungswiderstand 65
Reibungswinkel 68
Reibungszahl 66
Reibungszustände 65
Reihenschaltung 173
reine Biegung 235
Reißlänge 222
relative Bewegung 115
relative Rauigkeit 336
Relativgeschwindigkeit 116
Resonanz 190, 196
Resonanzüberhöhung 190
resultierende 17, 28, 30, 36, 45
resultierende Bewegung 107
resultierende Geschwindigkeit 108
resultierende Kraft 22
Reynolds-Zahl 334, 336
- Reynolds-Zahl, kritische 336
Richtlinien 342
Richtungswinkel 28, 30–31, 45
Riemetrieb 105
Rittersches Schnittverfahren 53
Rohrleitungsanlage 338
Rohrreibungszahl 337
Rohrströmung, laminare 334
Rohrströmung, turbulente 335, 338
Rollbedingung 88
Rolle, lose 83
Rollen 82
Rollenzüge 82
Rollgeschwindigkeit 101
Rollkörper 19
Rollkraft 88
Rollreibung 65, 87
Rollreibungsmoment 88
Rollreibungszahl 88
Rollvorgang 87
Rollwiderstand 87–88
Rotation 90, 148
Rotationsenergie 133, 157
Rückstoßkraft 329
Ruhegrad 214, 217, 281
ruhende Beanspruchung 213, 215
Ruhereibung 65
- Sankey-Diagramm 135
Satz von der Unabhängigkeit der Bewegungen 109
Satz von Steiner 152, 237
Schaltbares Drehmoment 81
Schaufelkraft 332
Scheitelwert 171
Scherbeanspruchung 208
Scherfestigkeit 216
Scherspannung 230
Schichtströmung 334
Schiebung 211
schiefe Biegung 235
schiefe Ebene 71
Schlankheitsgrad 295
Schlusslinienverfahren 42
Schneidevorgänge 232
Schnittgrößen 241
Schnittgrößen, positive 241
Schnittkräfte 203
Schnittlasten 203
Schnittmoment 203
Schrumpfspannung 224
Schubbeanspruchung 208
Schubspannung 256
Schubwinkel 211
schwache Dämpfung 185
schwellende Beanspruchung 213
schwere Masse 121
Schwerebenen 57
Schweredruck 306
Schwerkraft 57, 121
Schwerlinien 57
Schwerpunkt 57
Schwerpunktabstände 58–59, 61
Schwerpunktbestimmung 57
Schwimmachse 315
Schwimmbedingung 312

- Schwimmfläche 315
 Schwimmlage, labile 314
 Schwingbeschleunigung 171
 schwingende Beanspruchung 214, 216
 Schwinger, elastische 172
 Schwinggeschwindigkeit 171
 Schwingspiel 214
 Schwingspielzahl 216
 Schwingung, fremderregte 168
 Schwingung, gedämpfte 168
 Schwingung, harmonische 167, 169, 171
 Schwingung, lineare 169
 Schwingung, nichtlineare 169, 177
 Schwingung, nichtperiodische 168
 Schwingung, ungedämpfte 168
 Schwingungen 167
 Schwingungen, autonome 168
 Schwingungen, deterministische 167
 Schwingungen, erzwungene 168, 188
 Schwingungen, freie 168
 Schwingungen, freie gedämpfte 183
 Schwingungen, geschwindigkeitsproportional gedämpfte 184
 Schwingungen, heteronome 168
 Schwingungen, mechanische 11
 Schwingungen, paramaterregte 168
 Schwingungen, periodische 167
 Schwingungen, selbsterregte 168
 Schwingungen, stochastische 168
 Schwingungsentstörung, aktive 199
 Schwingungsisolierung 198
 Schwingungslehre 11
 Seile 18
 Seileckverfahren 40
 Seilreibung 66, 84
 Seilreibungsgleichung 85
 Seilreibungskraft 85
 Seitendruckkraft 309
 selbsterregte Schwingungen 168
 Selbsthemmung 69, 76, 123
 senkrechter Wurf 97
 Senkwaage 314
 SI-Einheiten 12
 Sicherheit 217
 Sicherheit gegen Bruch 218
 Sicherheit gegen Dauerbruch 218, 282, 290
 Sicherheit gegen Fließen 218, 282, 291
 Sicherheit gegen Knicken 295
 Sicherheitsnachweis 221, 252
 Skalar 16, 129
 Sonderlasten 214
 Spannung 202
 Spannung, zulässige 218
 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 209
 Spannungsausschlag 214, 216
 Spannungsgefälle 279
 Spannungsgefälle, bezogenes 280, 287
 Spannungsgehäuse 206
 Spannungsnachweis 219
 Spannungsverhältnis 214
 Spannungszustand 270
 spezifische Arbeit 319
 spezifische Energie 319
 spezifische Verstarbeit 337–338
 spezifisches Gewicht 128
 Stabdreieck 52
 stabiles Gleichgewicht 63
 Stabilität beim Schwimmen 314
 Stabilitätsbedingung 315
 Stabilitätskontrolle 219
 Stabilitätsproblem 295
 Stabkräfte 52
 Stabkraftermittlung 53–54
 Standsicherheit 63
 starke Dämpfung 184
 Statik 11
 stationäre Strömung 317
 statische Beanspruchung 213
 statischer Druck 320
 statischer Festigkeitsnachweis 291
 statisches Moment 33
 Stauchung 209
 Staudruck 320
 Staupunkt 320
 stochastische Schwingungen 168
 Stoß 141
 Stoß, elastischer 142
 Stoß, plastischer 144
 Stoß, wirklicher 146
 Stoßfaktor 215
 Stoßkräfte in Freistrahlturbinen 331
 Stoßnormale 141
 Stoßzahl 146
 Strahlstoßkraft 330
 Streckenkraft 17, 241
 Streckgrenze 215
 Stromfaden 317
 Stromlinie 317
 Stromröhre 317
 Strömung, instationäre 317
 Strömung, stationäre 317
 Strömungsgeschwindigkeit 317
 Strömungsgeschwindigkeit, effektive 322
 Strömungsgeschwindigkeit, theoretische 321
 Strömungskräfte 327
 Strömungsmessung 320
 Stützkräfte 17
 Stützlager 78
 Stützträger 245
 Stützwirkung 215, 278
 Stützziffer, dynamische 280
 Superpositionsprinzip 109, 111, 116, 270
 Systemlinien 52
 Tangentialbeschleunigung 101–102
 Tangentialgeschwindigkeit 99
 Tangentialkraft 148
 Tangentialspannung 206
 technologischer Größeneinflussfaktor 290
 Tetmajer-Gerade 298
 theoretische Strömungsgeschwindigkeit 321
 Torr 307
 Torsion 264
 Torsions-Flächenmoment 2. Grades 265
 torsionsbeanspruchte Bauteile 286
 Torsionsfestigkeit 215
 Torsionsgrenze 215
 Torsionsmoment 204, 264
 Torsionsmomentenlinie 264
 Torsionsschwingungen 180

- Torsionsspannung 265–267
 Torsionssteifigkeit 268
 Torsionswechselfestigkeit 217
 träge Masse 121
 Träger gleicher Biegebeanspruchung 255
 Tragfähigkeitsberechnung 219
 Tragfähigkeitsberechnung von Wellen 289
 Trägheit 120
 Trägheitsaxiom 120
 Trägheitsgesetz 120, 125
 Trägheitskraft 125
 Trägheitsmoment 149, 151, 180
 Trägheitsmoment, reduziertes 159–160
 Trägheitsradius 154, 296
 Traglänge 222
 Translation 90, 120
 Translationsenergie 133
 Transversalschwingungen 169
 Trapezgewinde 77
 Trockenreibung 65
 turbulente Rohrströmung 335, 338
- Überdruck 307
 Überhöhungsfaktor 190, 193
 Übersetzung 104–105
 Übersetzung ins Langsame 105
 Übersetzung ins Schnelle 105
 übertragbares Drehmoment 81
 Umfahrungssinn 24
 Umfangsgeschwindigkeit 99
 Umfangskraft 148
 Umfangsleistung 332
 Umlaufzahl 99
 Unabhängigkeit der Bewegungen 109
 unelastische Knickung 298
 ungedämpfte Schwingung 168
 ungleichförmige Bewegung 90, 92
 ungleichförmige Drehbewegung 101
 Unterdruck 307
 Untergurt 52
 Unterspannung 214, 216
 Unwucht 163, 193
 Unwuchterregung 188, 192
- Vektor 16, 35, 206
 Vektorgleichung 22
 vektorielle Addition 22, 119, 270
 Venturirohr 321
 Verdrehbeanspruchung 208
 verdrehkritische Drehzahl 198
 Verdrehwinkel 268
 Verfestigungsfaktor 290
 Verformungskontrolle 219
 Vergleichsmittelspannung 291
 Vergleichsmoment 274
 Vergleichsoberspannung 274
 Vergleichsspannung 270–271, 274
 Vergleichsspannungsprinzip 270
 Vergrößerungsfaktor 190, 193
 Verhalten, hydraulisch glattes 338
 Verhalten, hydraulisch raues 338
 Verlängerung 209
 Verlustarbeit, spezifische 337–338
 Verlustenergie 147
- Verlustleistung 337
 Verlustzahl 338
 Versatzmoment 35
 Verschiebesatz 17
 Verzögerung 93, 95
 Viskosimeter 334
 Viskosität 301, 333
 Viskosität, dynamische 333
 Viskosität, kinematische 333
 Viskositätsmessung 334
 Volumen bestimmen 313
 Volumenelastizität 302
 Volumenkräfte 17
 Volumenstrom 318, 324
 Vorspannkraft 79
 Vorzeichen der Schnittgrößen 241
- Waage, hydrostatische 313
 waagerechter Wurf 110
 Walzenpressung 228
 Wälzpaarung 229
 Wälzreibung 66
 Wanddicke 304–305
 Wärmebehandlung 282
 Wärmedehnung 224
 Wärmespannung 224
 Warmstreckgrenze 215
 Watt 138
 Wechselfestigkeit 217
 wechselnde Beanspruchung 214
 Wechselwirkungsgesetz 17
 Weg 90
 Weg-Zeit-Gesetz 91
 Wegerregung 188
 Werkstoffermittlung 219
 Werkstofffestigkeiten 215
 Werkstoffkennwerte 215
 Wichte 128
 Widerstandsmoment 235
 Widerstandsmoment, axiales 234, 238
 Widerstandsmoment, polares 238, 266
 Widerstandsmoment gegen Biegung 234
 Widerstandsmoment gegen Torsion 266
 Widerstandszahl 338
 Winkelbeschleunigung 102
 Winkelfrequenz 170
 Winkelgeschwindigkeit 100
 Winkelverzögerung 103
 Wirbelströmung 334
 Wirkabstand 33
 wirklicher Stoß 146
 Wirklinie 16
 Wirkungsgrad 78, 82–83, 139, 161
 Wirkungsgrad beim Rammen 145
 Wirkungsgrad beim Schmieden 145
 Wöhlerkurve 216
 Wurf 97, 110
 Wurf, senkrechter 97
 Wurf, waagerechter 110
 Wurfbewegung, allgemeine 112
 Wurfhöhe 112
 Wurfparabel 110, 112
 Wurfweite 110
- Zähigkeit 301, 333

-
- Zahlenwert 11
 - Zahlenwertgleichung 14
 - Zahnradgetriebe 105
 - Zeitfestigkeit 216
 - Zeitkonstante 184
 - zentrales Kräftesystem 22
 - Zentrifugalkraft 163
 - Zentripetalbeschleunigung 114
 - Zentripetalkraft 163
 - Zerreigrenze 210
 - zugbeanspruchte Bauteile 282
 - Zugbeanspruchung 207
 - Zugfestigkeit 215
 - Zugschwellfestigkeit 217
 - Zugspannung 220
 - zulässige Spannung 218
 - zusammengesetzt beanspruchte Bauteile 287
 - zusammengesetzte Beanspruchung 208, 269
 - zusammengesetzte Bewegung 90, 107
 - Zusatzlasten 214
 - Zweigelenkstab 19, 52
 - Zweischeibendrehschwinger 182
 - Zylinderfhrung 75