



Karlheinz Kabus

Mechanik und Festigkeitslehre

ISBN (Buch): 978-3-446-45319-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-45320-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45319-7>

sowie im Buchhandel.

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 Berufsarbeit 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 *Ute Eckardt* und Frau *Katrin Wulst*, bedanken wir uns für die gute Zusammenarbeit.

Wir hoffen, dass auch die 8. 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

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

Anhang (*lose beigelegt*):

Tabellen, Diagramme, Formeln

4 Schwerpunkt

Lernziele:

- Den Begriff Schwerpunkt erklären.
- Den Momentensatz der Statik als Grundlage der Schwerpunktberechnung erläutern.
- Die Lage des Schwerpunktes von Körpern, Flächen und Linien berechnen.
- Die Begriffe Standmoment und Kippmoment erläutern und Standsicherheitsberechnungen durchführen.

4.1 Begriffsbestimmung, Grundlagen

Die von der Erde auf einen Körper ausgeübte Anziehungskraft ist die **Schwerkraft** oder **Gewichtskraft** F_G . Sie ist auf den ganzen Körper verteilt, d. h. an jedem kleinsten Körperteilchen wirkt eine Teilgewichtskraft ΔF_G , die in jeder Lage des Körpers zum Erdmittelpunkt hin, also lotrecht gerichtet ist (Bild 4.1a). Die Resultierende aller Teilgewichtskräfte ist die Gewichtskraft $F_G = \Sigma \Delta F_G$. Ihr **Angriffspunkt ist der Schwerpunkt** S_0 des Körpers. Wird der Körper im Schwerpunkt unterstützt oder gelenkig aufgehängt, so bleibt er in jeder beliebigen Lage stehen, befindet sich also im Gleichgewicht.

Die Lage des Schwerpunktes kann versuchsmäßig, zeichnerisch oder rechnerisch bestimmt werden. Beim Versuch hängt man den Körper, beispielsweise eine dünne Scheibe (Bild 4.1b), an einem beliebigen Punkt an einen Faden und markiert in Verlängerung des Fadens eine lotrechte Linie. Danach wird der Körper an einem anderen Punkt am Faden befestigt und eine weitere lotrechte Linie gezeichnet. Im Schnittpunkt beider Linien liegt der Schwerpunkt.

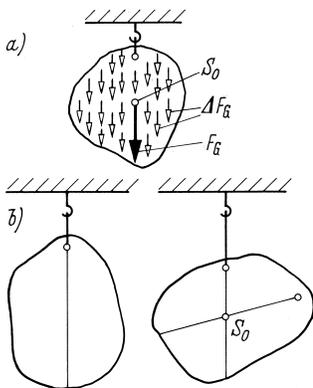


Bild 4.1 Schwerpunkt S_0

- a) Angriffspunkt der Gewichtskraft F_G ,
 b) versuchsmäßige Schwerpunktbestimmung

Für die zeichnerische Schwerpunktbestimmung ist das Seileckverfahren geeignet. Dazu zerlegt man den Körper gedanklich in Teilstücke, deren Schwerpunktlage bekannt ist. Der Abstand der Gewichtskraft als Resultierende der Teilgewichtskräfte von einer Bezugsachse wird dann nach der im Abschn. 2.3.3 beschriebenen Weise ermittelt. Dieses Verfahren ist je nach Körperform bis zu dreimal durchzuführen, u. zw. in den drei senkrecht zueinander stehenden Ansichten des Körpers.

Linien und Ebenen, die durch den Schwerpunkt hindurchgehen, sind **Schwerlinien** bzw. **Schwer-ebenen**. Symmetrielinien und -ebenen eines Körpers gehen stets durch den Schwerpunkt. Da ihre Lage bekannt ist, sind nur die nicht bekannten Schwerpunktabstände zu bestimmen.

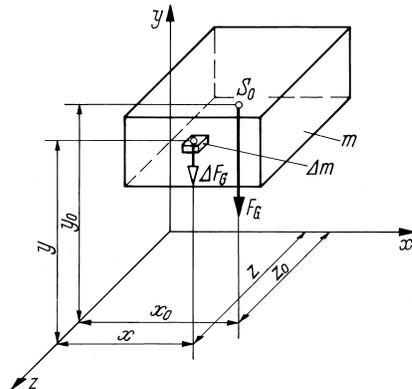


Bild 4.2 Körper in einem räumlichen Koordinatensystem

Grundlage der rechnerischen Schwerpunktbestimmung ist der **Momentensatz der Statik**. Der Schwerpunkt jedes winzig kleinen Körperteilchens Δm habe von den Koordinatenachsen eines räumlichen Koordinatensystems die Abstände x, y und z (Bild 4.2). Der besseren Übersicht wegen ist in Bild 4.2 nur die Gewichtskraft ΔF_G eines Körperteilchens Δm eingezeichnet. Mit den Koordinaten x_0, y_0 und z_0 des Schwerpunktes S_0 erhält man entspr. Gl. (2.19) die drei Momentengleichungen:

$$F_G \cdot x_0 = \Sigma(\Delta F_G \cdot x), \quad F_G \cdot y_0 = \Sigma(\Delta F_G \cdot y)$$

$$\text{und } F_G \cdot z_0 = \Sigma(\Delta F_G \cdot z).$$

Daraus folgt für die

$$\text{Schwerpunkt-} \quad x_0 = \frac{\Sigma(\Delta F_G \cdot x)}{F_G} \quad (4.1)$$

$$\text{koordinaten} \quad y_0 = \frac{\Sigma(\Delta F_G \cdot y)}{F_G} \quad (4.2)$$

$$z_0 = \frac{\Sigma(\Delta F_G \cdot z)}{F_G} \quad (4.3)$$

Da für $F_G = m \cdot g$ und für $\Delta F_G = \Delta m \cdot g$ gesetzt werden kann, kürzt sich die Fallbeschleunigung g heraus, und in den Gleichungen erscheinen die Masse m und die Teilmasse Δm . Die Lage des Schwerpunktes ist somit nur von der Massenverteilung abhängig. Daher wird der Schwerpunkt auch **Massenmittelpunkt** genannt. Er kann jedoch wie bei Ringen, Hohlzylindern u. dgl. auch außerhalb der Körpermasse liegen.

4.2 Schwerpunktberechnung

4.2.1 Körper

Ein homogener¹⁾ Körper mit dem Volumen V und der Dichte ρ (s. Abschn. 7.1.1) hat die Masse $m = V \cdot \rho$ (Gl. (7.2)). Damit gilt für die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g = V \cdot \rho \cdot g$. Setzt man diese Beziehung und $\Delta F_G = \Delta V \cdot \rho \cdot g$ in die Gln. (4.1) bis (4.3) ein, so kürzen sich ρ und g heraus. Die Gleichungen für die Koordinaten des Schwerpunktes lauten dann:

$$x_0 = \frac{\Sigma(\Delta V \cdot x)}{V} \quad y_0 = \frac{\Sigma(\Delta V \cdot y)}{V}$$

$$z_0 = \frac{\Sigma(\Delta V \cdot z)}{V}$$

Aus diesen Gleichungen ergeben sich mithilfe der Integralrechnung für homogene geometrische Grundkörper wie Prisma, Pyramide, Kegel,

Halbkugel u. a., deren Volumen mathematisch erfassbar sind, einfache Formeln zur Schwerpunktbestimmung (Tab. 5). Zusammengesetzte Körper (Bild 4.3) zerlegt man in Teilkörper, deren Schwerpunktabstände bekannt sind oder nach Tab. 5 errechnet werden können. Mit den Teilvolumen $\Delta V = V_i$ ($i = 1$ bis n , in Bild 4.3 ist $n = 3$), den zugehörigen Schwerpunktabständen x_i, y_i, z_i und dem Gesamtvolumen $V = \Sigma V_i$ folgen aus den obigen Gleichungen für einen homogenen Körper die

Schwerpunktabstände

$$x_0 = \frac{\Sigma(V_i \cdot x_i)}{V} = \frac{V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2 + \dots + V_n \cdot x_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} \quad (4.4)$$

$$y_0 = \frac{\Sigma(V_i \cdot y_i)}{V} = \frac{V_1 \cdot y_1 + V_2 \cdot y_2 + \dots + V_n \cdot y_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} \quad (4.5)$$

$$z_0 = \frac{\Sigma(V_i \cdot z_i)}{V} = \frac{V_1 \cdot z_1 + V_2 \cdot z_2 + \dots + V_n \cdot z_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n} \quad (4.6)$$

In diese Gleichungen sind die **Volumen ausgearter Teilkörper** und im **negativen Bereich** der Koordinatenachse liegende Schwerpunktabstände **mit negativem Vorzeichen** einzusetzen (z. B. das Bohrungsvolumen in Bild 4.3, ein Zylinder als Teilkörper 3).

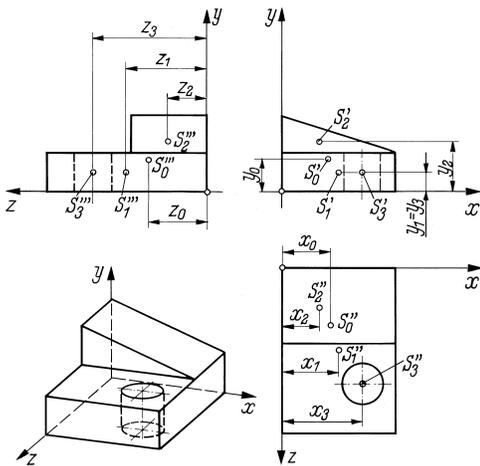


Bild 4.3 Zusammengesetzter Körper mit Projektionen auf die Koordinatenebenen

Beispiel 4.1

Die Lage des Schwerpunktes des zusammengesetzten Körpers nach Bild 4.4 ist zu errechnen.

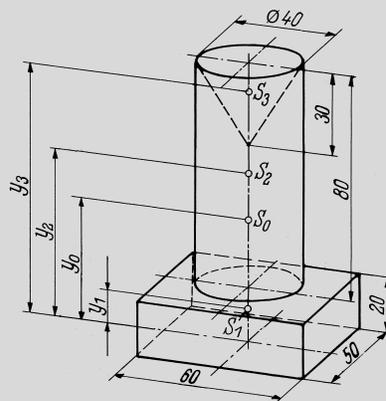


Bild 4.4 Zusammengesetzter homogener Körper

¹⁾ *homogen* (griech.): einheitlich, in allen Teilen gleich beschaffen oder stofflich gleichmäßig

Lösung:

Gegeben: $a = 6 \text{ cm}$, $b = 5 \text{ cm}$, $d = 4 \text{ cm}$,
 $h_1 = 2 \text{ cm}$, $h_2 = 8 \text{ cm}$, $h_3 = 3 \text{ cm}$.

Gesucht: y_0 in mm.

Wegen der Symmetrie braucht nur der Abstand y_0 auf der Mittelachse bestimmt zu werden. Der Körper wird in drei Teilkörper aufgeteilt (Quader 1, Zylinder 2 und Kegel 3) mit den Teilvolumen

$$V_1 = a \cdot b \cdot h_1 = 6 \text{ cm} \cdot 5 \text{ cm} \cdot 2 \text{ cm} = 60 \text{ cm}^3,$$

$$V_2 = d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot h_2 = (4 \text{ cm})^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 8 \text{ cm} = 100,53 \text{ cm}^3,$$

$$V_3 = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot h_3}{4 \cdot 3} = \frac{(4 \text{ cm})^2 \cdot \pi \cdot 3 \text{ cm}}{4 \cdot 3} = 12,57 \text{ cm}^3$$

und den Teilschwerpunktabständen (für 2 und 3 nach Tab. 5)

$$y_1 = \frac{h_1}{2} = \frac{2 \text{ cm}}{2} = 1 \text{ cm},$$

$$y_2 = h_1 + \frac{h_2}{2} = \left(2 + \frac{8}{2}\right) \text{ cm} = 6 \text{ cm},$$

$$y_3 = h_1 + h_2 - \frac{h_3}{4} = \left(2 + 8 - \frac{3}{4}\right) \text{ cm} = 9,25 \text{ cm}.$$

Nach Gl. (4.5) wird (V_3 ist negativ einzusetzen)

$$y_0 = \frac{V_1 \cdot y_1 + V_2 \cdot y_2 - V_3 \cdot y_3}{V_1 + V_2 - V_3}$$

$$= \frac{(60 \cdot 1 + 100,53 \cdot 6 - 12,57 \cdot 9,25) \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}}{(60 + 100,53 - 12,57) \text{ cm}^3}$$

$$= 3,7 \text{ cm} = 37 \text{ mm}.$$

4.2.2 Flächen

Auch von Flächen lässt sich wie von Körpern ein Schwerpunkt bestimmen. Man denkt sich eine ebene Fläche A als Vorderansicht einer Platte mit der Dicke s und unterteilt sie in i Teilflächen (A_1, A_2, A_3 in Bild 4.5) mit den bekannten Schwerpunktabständen x_i und y_i von den Koordinatenachsen. Setzt man $V = A \cdot s$ und $V_i = A_i \cdot s$ in die Gln. (4.4) und (4.5) ein, so kürzt sich die Dicke s heraus, und es ergeben sich für eine aus n Teilflächen zusammengesetzte ebene Fläche A die

Schwerpunktabstände

$$x_0 = \frac{\Sigma(A_i \cdot x_i)}{A}$$

$$= \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + \dots + A_n \cdot x_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (4.7)$$

$$y_0 = \frac{\Sigma(A_i \cdot y_i)}{A}$$

$$= \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + \dots + A_n \cdot y_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (4.8)$$

In diese Gleichungen sind **ausgesparte Teilflächen** und im **negativen Bereich** der Koordinatenachsen liegende Schwerpunktabstände **mit negativem Vorzeichen** einzusetzen. Die Berechnungsformeln für die Schwerpunktabstände einiger einfacher Flächen sind in Tab. 6 zusammengestellt. Bei drei oder mehr Teilflächen empfiehlt sich eine tabellarische Zusammenstellung der Zwischenergebnisse (s. Beisp. 4.2). Das Koordinatensystem ist so zu wählen, dass möglichst wenig Teilflächenmomente auftreten. Symmetrielinien werden vorzugsweise als Koordinatenachse gewählt.

Das Produkt aus einer Fläche und dem Abstand ihres Schwerpunktes von einer Bezugsachse ist das **Flächenmoment 1. Grades**, auch **statisches Moment der Fläche** genannt (s. Abschn. 9.4.2). Das auf eine Schwerlinie bezogene statische Moment ist null, weil der Abstand vom Schwerpunkt zur Bezugsachse null ist.

Zweckmäßig sind folgende **Arbeitsschritte**:

- 1. Schritt:** Koordinatenachsen festlegen, Fläche in Teilflächen aufteilen, Berechnungsskizze anfertigen und Schwerpunktabstände eintragen.
- 2. Schritt:** Teilflächeninhalte und -schwerpunkt-abstände errechnen, ggf. tabellarisch zusammenstellen einschl. der Teilflächenmomente.
- 3. Schritt:** Abstände des Gesamtschwerpunktes errechnen.

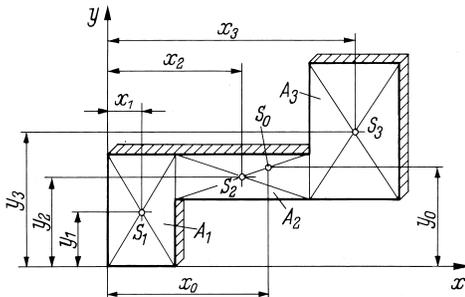


Bild 4.5 Zur Bestimmung des Schwerpunktes S_0 einer zusammengesetzten Fläche

Beispiel 4.2

Für die in Bild 4.6 dargestellte Fläche ist die Lage des Schwerpunktes rechnerisch zu bestimmen.

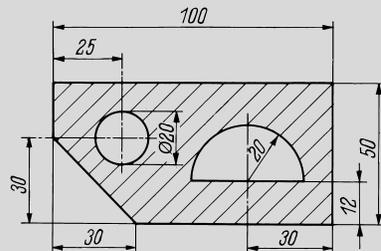


Bild 4.6 Fläche mit Aussparungen

Lösung:

Gegeben: $a = 10 \text{ cm}$, $b = 5 \text{ cm}$, $c = 1,2 \text{ cm}$,
 $h = 3 \text{ cm}$, $R_3 = 1 \text{ cm}$, $R_4 = 2 \text{ cm}$.

Gesucht: x_0 und y_0 in mm.

1. Schritt: Koordinatenachsen liegen nach Berechnungsskizze (Bild 4.7) auf dem unteren und dem linken Flächenrand, Fläche in vier Teilflächen aufteilen: Rechteck A_1 , Dreieck A_2 , Kreis A_3 und Halbkreis A_4 .

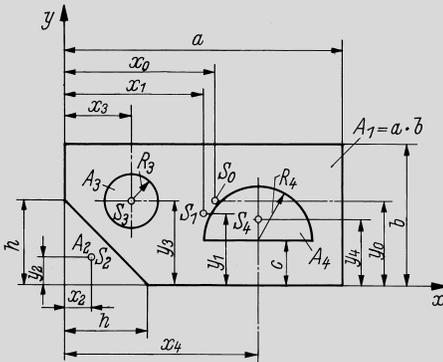


Bild 4.7 Berechnungsskizze

2. Schritt: Teilflächen A_i und Abstände x_i , y_i (nach Tab. 6):

- $A_1 = a \cdot b = 10 \text{ cm} \cdot 5 \text{ cm} = 50 \text{ cm}^2$,
- $x_1 = a/2 = (10/2) \text{ cm} = 5 \text{ cm}$,
- $y_1 = b/2 = (5/2) \text{ cm} = 2,5 \text{ cm}$,
- $A_2 = h \cdot h/2 = h^2/2 = (3^2/2) \text{ cm}^2 = 4,5 \text{ cm}^2$,
- $x_2 = y_2 = h/3 = (3/3) \text{ cm} = 1 \text{ cm}$,
- $A_3 = R_3^2 \cdot \pi = (1 \text{ cm})^2 \cdot \pi = 3,14 \text{ cm}^2$,
- $x_3 = 2,5 \text{ cm}$, $y_3 = 3 \text{ cm}$ (nach Bild 4.6),
- $A_4 = R_4^2 \cdot \pi/2 = (2 \text{ cm})^2 \cdot \pi/2 = 6,28 \text{ cm}^2$,
- $x_4 = 7 \text{ cm}$,
- $y_4 = c + 0,424 R_4 = (1,2 + 0,424 \cdot 2) \text{ cm} = 2,05 \text{ cm}$.

Diese Werte und die damit errechneten Flächenmomente $A_i \cdot x_i$ und $A_i \cdot y_i$ sowie deren Summen und die Gesamtfläche $A = \sum A_i$ sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt (A_2 , A_3 und A_4 als ausgesparte Teilflächen mit negativem Vorzeichen):

i	$\frac{A_i}{\text{cm}^2}$	$\frac{x_i}{\text{cm}}$	$\frac{A_i \cdot x_i}{\text{cm}^3}$	$\frac{y_i}{\text{cm}}$	$\frac{A_i \cdot y_i}{\text{cm}^3}$
1	50,00	5,0	250,00	2,5	125,00
2	-4,50	1,0	- 4,50	1,0	- 4,50
3	-3,14	2,5	- 7,85	3,0	- 9,42
4	-6,28	7,0	-43,96	2,05	-12,87
Σ	36,08	-	193,69	-	98,21

3. Schritt: Nach den Gln. (4.7) und (4.8):

$$x_0 = \frac{\Sigma(A_i \cdot x_i)}{A} = \frac{193,69 \text{ cm}^3}{36,08 \text{ cm}^2} = 5,37 \text{ cm} = 53,7 \text{ mm},$$

$$y_0 = \frac{\Sigma(A_i \cdot y_i)}{A} = \frac{98,21 \text{ cm}^3}{36,08 \text{ cm}^2} = 2,72 \text{ cm} = 27,2 \text{ mm}.$$

Beispiel 4.3

Bild 4.8 zeigt die Querschnittsfläche eines aus zwei Winkelprofilen EN 10056-1-50 × 50 × 6 und einem T-Profil EN 10055-T120 zusammengesetzten Trägers. Der Schwerpunktabstand von der Unterkante dieser Querschnittsfläche ist zu errechnen.

Lösung:

Gegeben: Nach Tab. 32: $A_1 = 29,6 \text{ cm}^2$, $h = 12 \text{ cm}$,
 $e_1 = 3,28 \text{ cm}$, Tab. 30: $A_2 = 5,69 \text{ cm}^2$,
 $e_2 = 1,45 \text{ cm}$.

Gesucht: y_0 in mm.

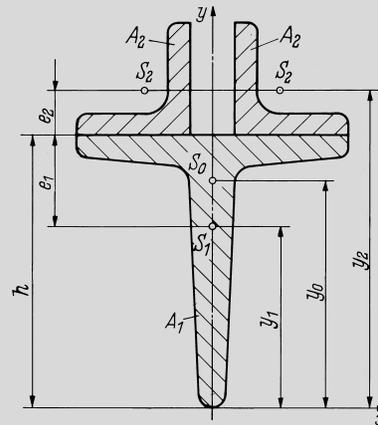


Bild 4.8 Querschnittsfläche eines aus Profilen zusammengesetzten Trägers

1. Schritt: Die Trägerunterkante wird als x- und die Symmetrielinie als y-Achse gewählt, Bild 4.8 ist auch Berechnungsskizze.

2. Schritt: Teilflächen A_1 und A_2 gegeben (s. o.), deren Schwerpunktabstände betragen:

$$y_1 = h - e_1 = (12 - 3,28) \text{ cm} = 8,72 \text{ cm},$$

$$y_2 = h + e_2 = (12 + 1,45) \text{ cm} = 13,45 \text{ cm}.$$

3. Schritt: Nach Gl. (4.8)

$$y_0 = \frac{A_1 \cdot y_1 + 2A_2 \cdot y_2}{A_1 + 2A_2} = \frac{(29,6 \cdot 8,72 + 2 \cdot 5,69 \cdot 13,45) \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}}{(29,6 + 2 \cdot 5,69) \text{ cm}^2} = 10,03 \text{ cm} = 100,3 \text{ mm}.$$

Da der Schwerpunkt auf der Symmetrielinie (y-Achse) liegt, ist $x_0 = 0$.

4.2.3 Linien

In gleicher Weise wie von Flächen lässt sich auch von Linien ein Schwerpunkt bestimmen. Man denke sich den in Bild 4.9 dargestellten, aus den Teillängen l_1, l_2 und l_3 zusammengesetzten Linienzug als Mittellinie eines dünnen Drahtes. Der Schwerpunkt des Drahtstückes ist auch der Schwerpunkt seiner Mittellinie. Somit kann der Schwerpunkt eines aus Strecken und Bögen zusammengesetzten Linienzuges wie der von einem dünnen Körper mit gleich bleibendem Querschnitt oder von einer schmalen Fläche mit gleich bleibender Breite ermittelt werden.

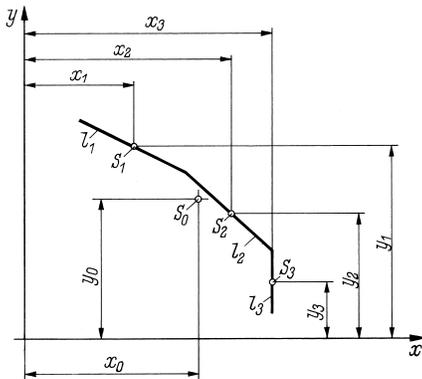


Bild 4.9 Zur Bestimmung des Schwerpunktes S_0 eines Linienzuges

Zur Lagebestimmung des Gesamtschwerpunktes S_0 eines ebenen zusammengesetzten Linienzuges mit der Länge $l = \sum l_i$, den Teillängen l_i und deren bekannten Schwerpunktabständen x_i und y_i von den Koordinatenachsen erhält man aus den Momentengleichungen $l \cdot x_0 = \sum(l_i \cdot x_i)$ und $l \cdot y_0 = \sum(l_i \cdot y_i)$ die

Schwerpunktabstände

$$x_0 = \frac{\sum(l_i \cdot x_i)}{l} = \frac{l_1 \cdot x_1 + l_2 \cdot x_2 + \dots + l_n \cdot x_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \quad (4.9)$$

$$y_0 = \frac{\sum(l_i \cdot y_i)}{l} = \frac{l_1 \cdot y_1 + l_2 \cdot y_2 + \dots + l_n \cdot y_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \quad (4.10)$$

Die Berechnungsformeln für die Schwerpunktabstände einiger einfacher Linien (Strecken, Streckenzüge, Bögen) enthält Tab. 7. Das Koordinatensystem wird so gewählt, dass man mit

möglichst wenig Linienmomenten $l_i \cdot x_i$ bzw. $l_i \cdot y_i$ auskommt. Die Schwerpunktabstände von Teillängen im negativen Bereich der Koordinatenachsen sind in die Gleichungen mit negativem Vorzeichen einzusetzen. Es kann sinnvoll nach den für Flächen im Abschnitt 4.2.2 angegebenen Arbeitsschritten vorgegangen werden.

Beispiel 4.4

Das in Bild 4.10 dargestellte Blechteil soll in großer Stückzahl aus Blechstreifen herausgeschnitten werden. Für die Werkzeugherstellung ist der Abstand des Schwerpunktes der Schnittlinie (des Umrisses mit Kreis) vom Lochmittelpunkt zu errechnen.

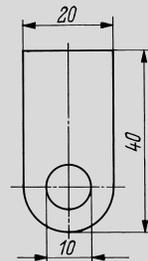


Bild 4.10 Blechteil

Lösung:

Gegeben: $a = 4$ cm, $b = 2$ cm, $d = 1$ cm.

Gesucht: y_0 in mm.

1. Schritt: Lochmittelpunkt als Koordinatenursprung, Symmetrielinien als y -Achse gewählt, s. Berechnungsskizze Bild 4.11.

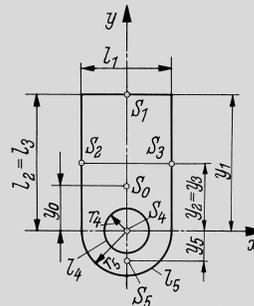


Bild 4.11 Berechnungsskizze

2. Schritt: Teillängen l_i und Abstände y_i (nach Tab. 7):

- $l_1 = b = 2$ cm, $y_1 = a - b/2 = (4 - 1)$ cm = 3 cm,
- $l_2 = l_3 = y_1 = 3$ cm, $y_2 = y_3 = y_1/2 = 1,5$ cm,
- $l_4 = 2r_4 \cdot \pi = d \cdot \pi = 1$ cm $\cdot \pi = 3,14$ cm, $y_4 = 0$,
- $l_5 = r_5 \cdot \pi = 0,5 b \cdot \pi = 1$ cm $\cdot \pi = 3,14$ cm,
- $y_5 = 0,637$ $r_5 = 0,637 \cdot 1$ cm = 0,637 cm.

Diese Werte und die damit errechneten Linienmomente $l_i \cdot y_i$ sowie deren Summe und die Gesamtlänge der Schnittlinie $l = \sum l_i$ sind in nachfolgender

Tabelle zusammengestellt (der Abstand y_5 ist negativ, da er auf der negativen y -Achse liegt):

i	$\frac{l_i}{\text{cm}}$	$\frac{y_i}{\text{cm}}$	$\frac{l_i \cdot y_i}{\text{cm}^2}$
1	2,00	3,00	6,00
2	3,00	1,50	4,50
3	3,00	1,50	4,50
4	3,14	0	0
5	3,14	-0,637	-2,00
Σ	14,28	-	13,00

3. Schritt: Nach Gl. (4.10):

$$y_0 = \frac{\Sigma(l_i \cdot y_i)}{l} = \frac{13,0 \text{ cm}^2}{14,28 \text{ cm}} = 0,91 \text{ cm} = 9,1 \text{ mm}.$$

Beispiel 4.5

In Bild 4.12 sind die Systemlinien eines Wandschwenkkranes skizziert, dessen Stäbe aus Rohren gleichen Durchmessers und gleicher Wanddicke bestehen. Welchen Abstand von der Drehachse hat der Schwerpunkt als Angriffspunkt der Eigengewichtskraft?

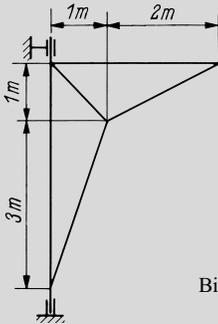


Bild 4.12 Systemlinien eines Wandschwenkkranes

Lösung:

Gegeben: $a = 1 \text{ m}$, $b = 2 \text{ m}$, $c = 3 \text{ m}$.

Gesucht: x_0 in mm.

Der Schwerpunkt des Kranes ist gleich dem Schwerpunkt der Systemlinien, da alle Stäbe gleichen Querschnitt haben.

1. Schritt: Die Drehachse ist die y -Achse, die Stablängen = Systemlinienlängen sind die Teillängen l_i . Die Abstände y_i werden nicht benötigt, Berechnungsskizze Bild 4.13.

2. Schritt: Teillängen l_i und Abstände x_i :
 $l_1 = a + c = 4 \text{ m}$, $x_1 = 0$ (da S_1 auf der y -Achse),

$$l_2 = \sqrt{a^2 + c^2} = \sqrt{10} \text{ m} = 3,162 \text{ m},$$

$$x_2 = a/2 = 0,5 \text{ m},$$

$$l_3 = \sqrt{a^2 + a^2} = \sqrt{2} \text{ m} = 1,414 \text{ m},$$

$$x_3 = x_2 = 0,5,$$

$$l_4 = a + b = 3 \text{ m}, x_4 = l_4/2 = 1,5 \text{ m},$$

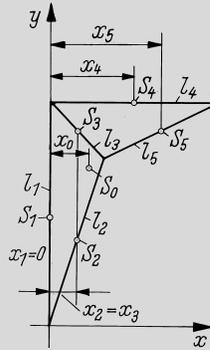


Bild 4.13 Berechnungsskizze

$$l_5 = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{5} \text{ m} = 2,236 \text{ m},$$

$$x_5 = a + b/2 = 2 \text{ m}.$$

Diese Werte und die Linienmomente $l_i \cdot x_i$ sowie deren Summen und die gesamte Systemlinienlänge $l = \Sigma l_i$ sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt:

i	$\frac{l_i}{\text{m}}$	$\frac{x_i}{\text{m}}$	$\frac{l_i \cdot x_i}{\text{m}^2}$
1	4,000	0	0
2	3,162	0,5	1,581
3	1,414	0,5	0,707
4	3,000	1,5	4,500
5	2,236	2,0	4,472
Σ	13,812	-	11,260

3. Schritt: Nach Gl. (4.9):

$$x_0 = \frac{\Sigma(l_i \cdot x_i)}{l} = \frac{11,26 \text{ m}^2}{13,812 \text{ m}} = 0,815 \text{ m} = 815 \text{ mm}.$$

4.3 Gleichgewichtslagen, Standsicherheit

Wird ein entspr. Bild 4.14 beweglich gelagerter Körper aus seiner Gleichgewichtslage gebracht, so wird sein **Schwerpunkt angehoben** und es entsteht ein **rückstellendes Moment** $F_G \cdot l$, das ihn wieder in seine Ausgangslage zurückführt. Man nennt diese Gleichgewichtslage **sicher** oder **stabil**. Wird dagegen ein wie in Bild 4.15 gelagerter Körper durch einen Anstoß aus seiner Gleichgewichtslage gebracht, so wird der **Schwerpunkt gesenkt**, und es entsteht ein **ablenkendes Moment** $F_G \cdot l$, das ihn beschleunigt und weiter von seiner Ausgangslage entfernt. Der Körper befindet sich im unsicheren oder **labilen** (instabilen) Gleichgewicht. Von unentschiedenem oder **indifferentem** Gleichgewicht

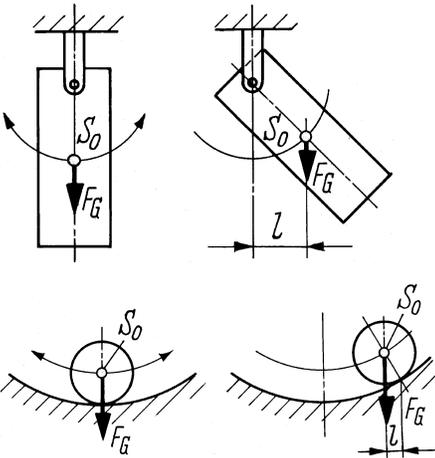


Bild 4.14 Stabiles Gleichgewicht

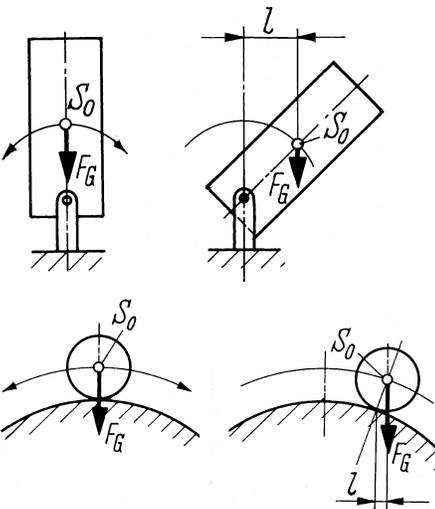


Bild 4.15 Labiles Gleichgewicht

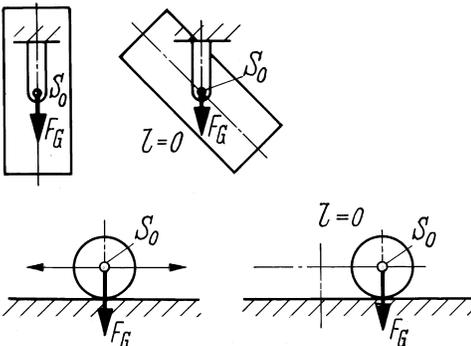


Bild 4.16 Indifferentes Gleichgewicht

spricht man, wenn bei einer Lageänderung der **Schwerpunkt** des Körpers **weder gehoben noch gesenkt** wird und keine rückstellenden oder ablenkenden Momente auftreten (Bild 4.16).

Freistehende Körper können infolge Einwirkung äußerer Kräfte umkippen. Wenn Kippgefahr zu erwarten ist, muss die Standsicherheit errechnet werden. Sie ist wie folgt definiert:

Die Standsicherheit, die stets größer als eins sein muss, ist das auf eine Kippkante bezogene Verhältnis der Summe der Standmomente zur Summe der Kippmomente.

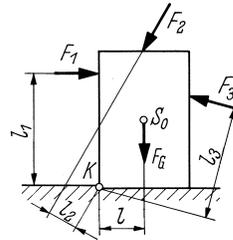


Bild 4.17 Kippgefährdeter Körper

Für den in Bild 4.17 dargestellten Körper beträgt die auf die Kippkante K bezogene

Summe der Standmomente

$$\Sigma M_{St} = F_G \cdot l + F_1 \cdot l_1$$

und die

Summe der Kippmomente

$$\Sigma M_{Ki} = F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot l_3$$

Ein Körper steht sicher bei der

Standsicherheit
$$S_{St} = \frac{\Sigma M_{St}}{\Sigma M_{Ki}} > 1 \quad (4.11)$$

In diesem Falle geht die Wirklinie der Resultierenden aller am Körper angreifenden Kräfte (einschl. der Gewichtskraft) durch die Unterstützungsfläche, d. h. so an der Kippkante vorbei, dass das Moment $F_r \cdot l_r$ stützend (rückstellend) wirkt (Bild 4.18a). Ist $S_{St} = 1$, befindet sich der Körper gerade noch im Gleichgewicht (Bild 4.18b). Geht die Wirklinie von F_r so an der

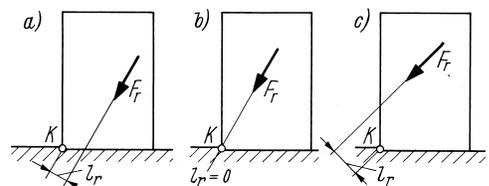


Bild 4.18 Standsicherheit S_{St} eines Körpers
 a) $S_{St} > 1$, b) $S_{St} = 1$, c) $S_{St} < 1$

Kippkante vorbei, dass das resultierende Moment ablenkend wirkt, dann ist $S_{St} < 1$ und der Körper kippt (Bild 4.18c). Bei diesen Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass der Körper nicht gleiten kann. Mitunter muss die Untersuchung auf Standsicherheit für mehrere Kippkanten durchgeführt werden. Für den Kranbau ist die Ermittlung der Standsicherheit in Normen (z. B. ISO 4304, ISO 4305 und ISO 12485) vorgeschrieben.

Beispiel 4.6

Für den in Bild 4.19 skizzierten Mobilkran sind die zulässigen Tragkräfte bei den Auslegerstellungen I, II, III und einer Standsicherheit von 1,8 zu errechnen. Die Gewichtskräfte betragen für das Fahrgestell 36,4 kN, den Aufbau 67,2 kN und den Ausleger 7 kN.

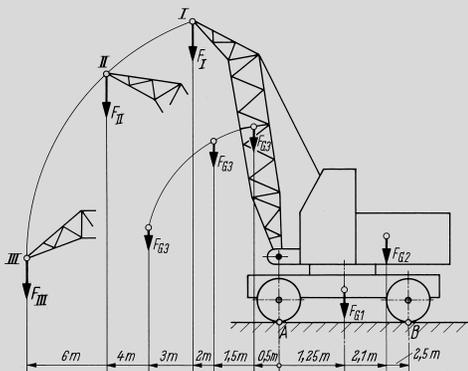


Bild 4.19 Skizze zur Tragkraftermittlung für einen Mobilkran

Lösung:

Gegeben: $S_{St} = 1,8$, $F_{G1} = 36,4$ kN, $F_{G2} = 67,2$ kN, $F_{G3} = 7$ kN, die Längen von A aus gemessen: $l_1 = 1,25$ m, $l_2 = 2,1$ m, $l_{3I} = 0,5$ m, $l_{3II} = 1,5$ m, $l_{3III} = 3$ m, $L_I = 2$ m, $L_{II} = 4$ m, $L_{III} = 6$ m.

Gesucht: F_I, F_{II}, F_{III} .

Bezogen auf den Kippkantenpunkt A (Bild 4.20) beträgt bei allen Auslegerstellungen die Summe der Standmomente

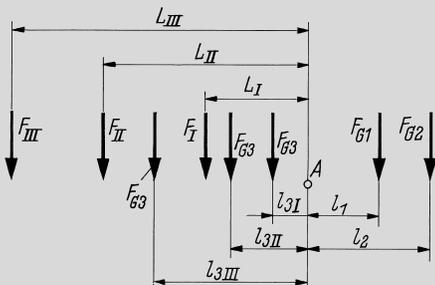


Bild 4.20 Skizze zur Momentenberechnung

$$\begin{aligned} \Sigma M_{St} &= F_{G1} \cdot l_1 + F_{G2} \cdot l_2 \\ &= (36,4 \cdot 1,25 + 67,2 \cdot 2,1) \text{ kN} \cdot \text{m} = 186,6 \text{ kNm} \end{aligned}$$

und die Summe der Kippmomente

$$\Sigma M_{Ki} = F_i \cdot L_i + F_{G3} \cdot l_{3i}$$

Beide in Gl. (4.11) eingesetzt:

$$S_{St} = \frac{\Sigma M_{St}}{F_i \cdot L_i + F_{G3} \cdot l_{3i}}$$

ergibt

$$\begin{aligned} F_i \cdot L_i + F_{G3} \cdot l_{3i} &= \frac{\Sigma M_{St}}{S_{St}} = \frac{186,6 \text{ kNm}}{1,8} \\ &= 103,7 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Daraus folgt mit $i = I, II$ und III die zulässige Tragkraft für Stellung I:

$$\begin{aligned} F_I &= \frac{\Sigma M_{St}/S_{St} - F_{G3} \cdot l_{3I}}{L_I} \\ &= \frac{(103,7 - 7 \cdot 0,5) \text{ kNm}}{2 \text{ m}} = 50,1 \text{ kN}, \end{aligned}$$

für Stellung II:

$$\begin{aligned} F_{II} &= \frac{\Sigma M_{St}/S_{St} - F_{G3} \cdot l_{3II}}{L_{II}} \\ &= \frac{(103,7 - 7 \cdot 1,5) \text{ kNm}}{4 \text{ m}} = 23,3 \text{ kN}, \end{aligned}$$

für Stellung III:

$$\begin{aligned} F_{III} &= \frac{\Sigma M_{St}/S_{St} - F_{G3} \cdot l_{3III}}{L_{III}} \\ &= \frac{(103,7 - 7 \cdot 3) \text{ kNm}}{6 \text{ m}} = 13,78 \text{ kN}. \end{aligned}$$

Praxishinweis

Die Lage des Schwerpunktes eines Körpers ist immer dann zu ermitteln, wenn die Gewichtskraft von Bauteilen bei Berechnungen berücksichtigt werden muss. In der Kinetik ist der Körperschwerpunkt als Massenmittelpunkt Angriffspunkt der Trägheitskraft sowie der Fliehkraft. Der Flächenschwerpunkt wird für die Berechnung des Flächenmomentes 2. Grades in der Festigkeitslehre benötigt. Um eine gleichmäßige Verteilung der Schnittkraft bei Schnittwerkzeugen zu erreichen, muss die Mittelachse des Einspannzapfens durch den Schwerpunkt der Schnittlinie gehen. Außerdem kann man in der Mathematik auf einfache Weise nach den **Guldinschen Regeln** mit dem Schwerpunktabstand von der Drehachse die Volumen (mit dem Flächenschwerpunktabstand) und die Oberflächen (mit dem Linienschwerpunktabstand) von Rotationskörpern errechnen. Standsicherheitsberechnungen sind z. B. für verschiedene Fahrzeugarten, für Krane und für Leitern erforderlich.

Kontrollfragen:

- Was versteht man unter dem Begriff Schwerpunkt?
- Wie wird die Lage des Schwerpunktes von Körpern, von Flächen und von Linien ermittelt?
- Wie ist die Standsicherheit definiert?

Sachwortverzeichnis

- 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 Schwingungsentstörung 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
 Biegeschwelfestigkeit 217
 Biegeschwingungen 174
 Biegespannung 233–234
 Biegesteifigkeit 259
 Biegewechsselfestigkeit 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, ungleichförmige 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
 Druckschwelfestigkeit 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
 Festigkeitsannahmen 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, axiales 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
 Freitragender 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-Schwingungszahl 216
 Grenzschlankheitsgrad 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 rauhes 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
 λ , *Re*-Diagramm 338
 Luftdruck 307
 Maßstabfaktor 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
 ω , *t*-Diagramm 100
 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
 Querschneidgrenze 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
 Schwerpunkbestimmung 57
 Schwimmachse 315
 Schwimmbedingung 312
 Schwimmfläche 315
 Schwimmelage, labile 314
 Schwingbeschleunigung 171
 schwingende Beanspruchung 214, 216
 Schwinger, elastische 172

- Schwinggeschwindigkeit 171
 Schwingenspiel 214
 Schwingenspielzahl 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, parametererregte 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 Verlustarbeit 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
s,t-Diagramm 91
 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
 Stützkkräfte 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
 Umfangungssinn 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
v,t-Diagramm 91
- 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