
Das Ingenieurwissen: Technische Mechanik

Jens Wittenburg · Hans Albert Richard ·
Jürgen Zierep · Karl Bühler

Das Ingenieurwissen: Technische Mechanik

 Springer Vieweg

Hans Albert Richard
Universität Paderborn
Paderborn, Deutschland

Karl Bühler
Hochschule Offenburg
Offenburg, Deutschland

Jens Wittenburg, Jürgen Zierep
KIT Karlsruhe
Karlsruhe, Deutschland

ISBN 978-3-642-41121-2
DOI 10.1007/978-3-642-41122-9

ISBN 978-3-642-41122-9 (eBook)

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

Das vorliegende Buch ist Teil des ursprünglich erschienenen Werks „HÜTTE - Das Ingenieurwissen“, 34. Auflage.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die HÜTTE Das Ingenieurwissen ist ein Kompendium und Nachschlagewerk für unterschiedliche Aufgabenstellungen und Verwendungen. Sie enthält in einem Band mit 17 Kapiteln alle Grundlagen des Ingenieurwissens:

- Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen
- Technologische Grundlagen
- Grundlagen für Produkte und Dienstleistungen
- Ökonomisch-rechtliche Grundlagen

Je nach ihrer Spezialisierung benötigen Ingenieure im Studium und für ihre beruflichen Aufgaben nicht alle Fachgebiete zur gleichen Zeit und in gleicher Tiefe. Beispielsweise werden Studierende der Eingangsemester, Wirtschaftsingenieure oder Mechatroniker in einer jeweils eigenen Auswahl von Kapiteln nachschlagen. Die elektronische Version der Hütte lässt das Herunterladen einzelner Kapitel bereits seit einiger Zeit zu und es wird davon in beträchtlichem Umfang Gebrauch gemacht.

Als Herausgeber begrüßen wir die Initiative des Verlages, nunmehr Einzelkapitel in Buchform anzubieten und so auf den Bedarf einzugehen. Das klassische Angebot der Gesamt-Hütte wird davon nicht betroffen sein und weiterhin bestehen bleiben. Wir wünschen uns, dass die Einzelbände als individuell wählbare Bestandteile des Ingenieurwissens ein eigenständiges, nützliches Angebot werden.

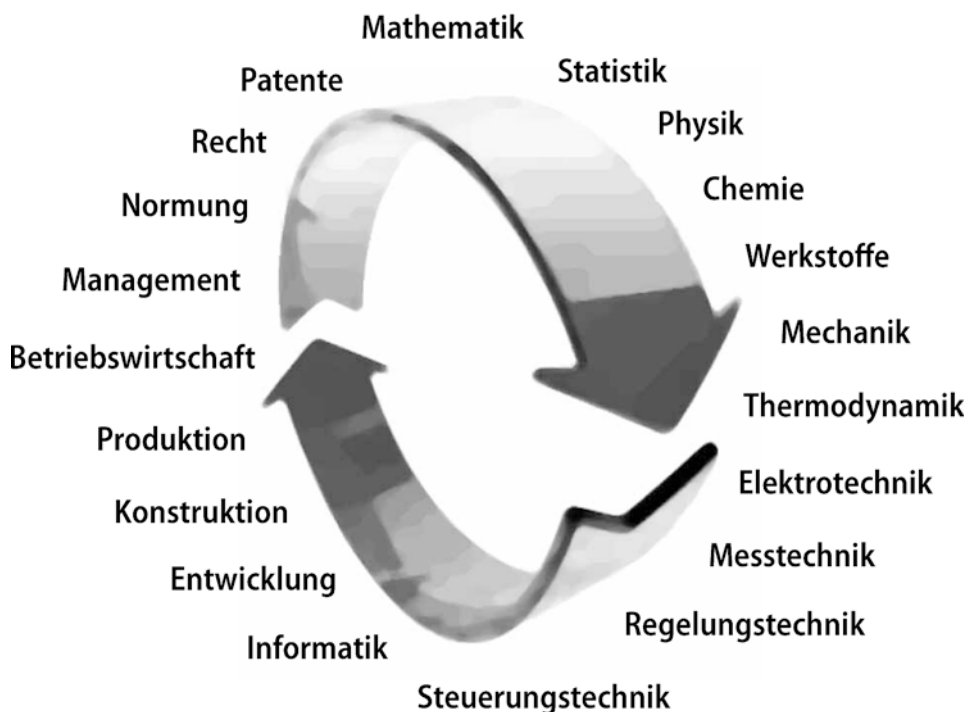
Unser herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen für ihre Beiträge und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer-Verlages für die sachkundige redaktionelle Betreuung sowie dem Verlag für die vorzügliche Ausstattung der Bände.

Berlin, August 2013

H. Czichos, M. Hennecke

Das vorliegende Buch ist dem Standardwerk *HÜTTE Das Ingenieurwissen 34. Auflage* entnommen. Es will einen erweiterten Leserkreis von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern ansprechen, der nur einen Teil des gesamten Werkes für seine tägliche Arbeit braucht. Das Gesamtwerk ist im sog. Wissenskreis dargestellt.

Das Ingenieurwissen Grundlagen



Inhaltsverzeichnis

Technische Mechanik

J. Wittenburg, H.A. Richard, J. Zierep, K. Bühler

Mechanik fester Körper

J. Wittenburg, H.A. Richard

1	Kinematik	1
1.1	Kinematik des Punktes	1
	1.1.1 Lage, Lagekoordinaten – 1.1.2 Geschwindigkeit, Beschleunigung	
1.2	Kinematik des starren Körpers	2
	1.2.1 Winkel, Winkellage, Koordinatentransformation – 1.2.2 Winkelgeschwindigkeit – 1.2.3 Winkelbeschleunigung	
1.3	Kinematik des Punktes mit Relativbewegung	9
1.4	Freiheitsgrade der Bewegung, Kinematische Bindungen	10
1.5	Virtuelle Verschiebungen	10
1.6	Kinematik offener Gliederketten	11
2	Statik starrer Körper	13
2.1	Grundlagen	13
	2.1.1 Kraft, Moment – 2.1.2 Äquivalenz von Kräftesystemen – 2.1.3 Zerlegung von Kräften – 2.1.4 Resultierende von Kräften mit gemeinsamem Angriffspunkt – 2.1.5 Reduktion von Kräftesystemen – 2.1.6 Ebene Kräftesysteme – 2.1.7 Schwerpunkt, Massenmittelpunkt – 2.1.8 Das 3. Newton'sche Axiom „actio = reactio“ – 2.1.9 Innere Kräfte und äußere Kräfte – 2.1.10 Eingeprägte Kräfte und Zwangskräfte – 2.1.11 Gleichgewichtsbedingungen für einen starren Körper – 2.1.12 Schnittprinzip – 2.1.13 Arbeit, Leistung – 2.1.14 Potenzialkraft, Potenzielle Energie – 2.1.15 Virtuelle Arbeit, Generalisierte Kräfte – 2.1.16 Prinzip der virtuellen Arbeit	
2.2	Lager, Gelenke	23
	2.2.1 Lagerreaktionen, Lagerwertigkeit – 2.2.2 Statisch bestimmte Lagerung – 2.2.3 Berechnung von Lagerreaktionen	
2.3	Fachwerke	26
	2.3.1 Statische Bestimmtheit – 2.3.2 Nullstäbe – 2.3.3 Knotenschnittverfahren – 2.3.4 Ritter'sches Schnittverfahren für ebene Fachwerke – 2.3.5 Prinzip der virtuellen Arbeit – 2.3.6 Methode der Stabvertauschung	
2.4	Ebene Seil- und Kettenlinien	27
	2.4.1 Gewichtsloses Seil mit Einzelgewichten – 2.4.2 Schwere Gliederkette – 2.4.3 Schweres Seil – 2.4.4 Schweres Seil mit Einzelgewicht – 2.4.5 Rotierendes Seil	
2.5	Coulomb'sche Reibungskräfte	30
	2.5.1 Ruhereibungskräfte – 2.5.2 Gleitreibungskräfte	
2.6	Stabilität von Gleichgewichtslagen	33
3	Kinetik starrer Körper	33
3.1	Grundlagen	33
	3.1.1 Inertialsystem und absolute Beschleunigung – 3.1.2 Impuls – 3.1.3 Newton'sche Axiome – 3.1.4 Impulssatz, Impulserhaltungssatz – 3.1.5 Kinetik der Punktmasse im beschleunigten Bezugssystem – 3.1.6 Trägheitsmomente, Trägheitstensor – 3.1.7 Drall – 3.1.8 Drallsatz (Axiom von Euler) – 3.1.9 Drallerhaltungssatz – 3.1.10 Kinetische Energie – 3.1.11 Energieerhaltungssatz – 3.1.12 Arbeitssatz	
3.2	Kreiselmechanik	40
	3.2.1 Reguläre Präzession – 3.2.2 Nutation – 3.2.3 Linearisierte Kreisgleichungen – 3.2.4 Präzessionsgleichungen	

3.3	Bewegungsgleichungen für holonome Mehrkörpersysteme	43
	3.3.1 Synthetische Methode – 3.3.2 Lagrange'sche Gleichung – 3.3.3 D'Alembert'sches Prinzip	
3.4	Stöße	45
	3.4.1 Vereinfachende Annahmen über Stoßvorgänge – 3.4.2 Stöße an Mehrkörpersystemen – 3.4.3 Der schiefe exzentrische Stoß – 3.4.4 Gerader zentraler Stoß – 3.4.5 Gerader Stoß gegen ein Pendel	
3.5	Körper mit veränderlicher Masse	48
3.6	Gravitation, Satellitenbahnen	49
3.7	Stabilität	51
4	Schwingungen	51
4.1	Lineare Eigenschwingungen	52
	4.1.1 Systeme mit einem Freiheitsgrad – 4.1.2 Eigenschwingungen bei endlich vielen Freiheitsgraden	
4.2	Erzwungene lineare Schwingungen	54
	4.2.1 Systeme mit einem Freiheitsgrad – 4.2.2 Erzwungene Schwingungen bei endlich vielen Freiheitsgraden	
4.3	Lineare parametererregte Schwingungen	59
4.4	Freie Schwingungen eindimensionaler Kontinua	60
	4.4.1 Saite, Zugstab, Torsionsstab – 4.4.2 Biegeschwingungen von Stäben	
4.5	Näherungsverfahren zur Bestimmung von Eigenkreisfrequenzen	63
	4.5.1 Rayleigh-Quotient – 4.5.2 Ritz-Verfahren	
4.6	Autonome nichtlineare Schwingungen mit einem Freiheitsgrad	66
	4.6.1 Methode der kleinen Schwingungen – 4.6.2 Harmonische Balance – 4.6.3 Störungsrechnung nach Lindstedt – 4.6.4 Methode der multiplen Skalen	
4.7	Erzwungene nichtlineare Schwingungen	69
	4.7.1 Harmonische Balance – 4.7.2 Methode der multiplen Skalen – 4.7.3 Subharmonische, superharmonische und Kombinationsresonanzen	
5	Festigkeitslehre. Elastizitätstheorie	71
5.1	Kinematik des deformierbaren Körpers	71
	5.1.1 Verschiebungen, Verzerrungen, Verzerrungstensor – 5.1.2 Kompatibilitätsbedingungen – 5.1.3 Koordinatentransformation – 5.1.4 Hauptdehnungen, Dehnungshauptachsen – 5.1.5 Mohr'scher Dehnungskreis	
5.2	Spannungen	73
	5.2.1 Normal- und Schubspannungen, Spannungstensor – 5.2.2 Koordinatentransformation – 5.2.3 Hauptnormalspannungen, Spannungshauptachsen – 5.2.4 Hauptschubspannungen – 5.2.5 Kugeltensor, Spannungsdeviator – 5.2.6 Ebener Spannungszustand, Mohr'scher Spannungskreis – 5.2.7 Volumenkraft, Gleichgewichtsbedingungen	
5.3	Hooke'sches Gesetz	75
5.4	Geometrische Größen für Stab- und Balkenquerschnitte	76
	5.4.1 Flächenmomente 2. Grades – 5.4.2 Statische Flächenmomente – 5.4.3 Querschubzahlen – 5.4.4 Schubmittelpunkt oder Querkraftmittelpunkt – 5.4.5 Torsionsflächenmoment – 5.4.6 Wölbwiderstand	
5.5	Schnittgrößen in Stäben und Balken	84
	5.5.1 Definition der Schnittgrößen für gerade Stäbe – 5.5.2 Berechnung von Schnittgrößen für gerade Stäbe	
5.6	Spannungen in Stäben und Balken	87
	5.6.1 Zug und Druck – 5.6.2 Gerade Biegung – 5.6.3 Schiefe Biegung – 5.6.4 Druck und Biegung, Kern eines Querschnitts – 5.6.5 Biegung von Stäben aus Verbundwerkstoff – 5.6.6 Biegung vorgekrümmter Stäbe – 5.6.7 Reiner Schub – 5.6.8 Torsion ohne Wölbbehinderung (Saint-Venant-Torsion) – 5.6.9 Torsion mit Wölbbehinderung	
5.7	Verformungen von Stäben und Balken	92
	5.7.1 Zug und Druck – 5.7.2 Gerade Biegung – 5.7.3 Schiefe Biegung – 5.7.4 Stab auf elastischer Bettung (Winkler-Bettung) – 5.7.5 Biegung von Stäben aus Verbundwerkstoff – 5.7.6 Querkraftbiegung – 5.7.7 Torsion ohne Wölbbehinderung (Saint-Venant-Torsion) – 5.7.8 Torsion mit Wölbbehinderung	
5.8	Energiemethoden der Elastostatik	100
	5.8.1 Formänderungsenergie, Äußere Arbeit – 5.8.2 Prinzip der virtuellen Arbeit – 5.8.3 Arbeitsgleichung oder Verfahren mit einer Hilfskraft – 5.8.4 Sätze von Castigliano – 5.8.5 Steifigkeitsmatrix, Nachgiebigkeitsmatrix, Satz von Maxwell und Betti – 5.8.6 Statisch unbestimmte Systeme, Kraftgrößenverfahren – 5.8.7 Satz von Menabrea – 5.8.8 Verfahren von Ritz für Durchbiegungen	
5.9	Rotierende Stäbe und Ringe	107
5.10	Flächentragwerke	108
	5.10.1 Scheiben – 5.10.2 Platten – 5.10.3 Schalen	

5.11	Dreidimensionale Probleme	113
	5.11.1 Einzelkraft auf Halbraumoberfläche (Boussinesq-Problem) – 5.11.2 Einzelkraft im Vollraum (Kelvin-Problem) – 5.11.3 Druckbehälter. Kesselformeln – 5.11.4 Kontaktprobleme. Hertz'sche Formeln – 5.11.5 Kerbspannungen	
5.12	Stabilitätsprobleme	116
	5.12.1 Knicken von Stäben – 5.12.2 Biegedrillknicken – 5.12.3 Kippen – 5.12.4 Plattenbeulung – 5.12.5 Schalenbeulung	
5.13	Finite Elemente	121
	5.13.1 Elementmatrizen. Formfunktionen – 5.13.2 Matrizen für das Gesamtsystem – 5.13.3 Aufgabenstellungen bei Finite-Elemente-Rechnungen	
5.14	Übertragungsmatrizen	126
	5.14.1 Übertragungsmatrizen für Stabsysteme – 5.14.2 Übertragungsmatrizen für rotierende Scheiben – 5.14.3 Ergänzende Bemerkungen	
5.15	Festigkeithypothesen	131
5.16	Kerbspannungen. Kerbwirkung	132
	5.16.1 Spannungsverteilungen an Kerben – 5.16.2 Elastizitätstheoretische Lösungen grundlegender Kerbprobleme – 5.16.3 Kerbfaktoren – 5.16.4 Kerbwirkung	
6	Plastizitätstheorie. Bruchmechanik	137
6.1	Grundlagen der Plastizitätstheorie	137
	6.1.1 Fließkriterien – 6.1.2 Fließregeln – 6.1.3 Gleitlinien	
6.2	Elementare Theorie technischer Umformprozesse	138
	6.2.1 Schrankensatz für Umformleistung – 6.2.2 Streifen-, Scheiben- und Röhrenmodell	
6.3	Traglast	140
	6.3.1 Fließgelenke. Fließschnittgrößen – 6.3.2 Traglastsätze – 6.3.3 Traglasten für Durchlaufträger – 6.3.4 Traglasten für Rahmen	
6.4	Grundlagen der Bruchmechanik	142
	6.4.1 Spannungsverteilungen an Rissen. Spannungsintensitätsfaktoren – 6.4.2 Bruchmechanische Bewertung der Bruchgefahr – 6.4.3 Ermüdungsrisssausbreitung	
6.5	Zusammenwirken von Festigkeitsberechnung und Bruchmechanik	146

Strömungsmechanik

J. Zierep, K. Bühler

7	Einführung in die Strömungsmechanik	146
7.1	Eigenschaften von Fluiden	146
7.2	Newton'sche und nichtnewton'sche Medien	148
7.3	Hydrostatik und Aerostatik	148
7.4	Gliederung der Darstellung: Nach Viskositäts- und Kompressibilitätseinflüssen	149
8	Hydrodynamik: Inkompressible Strömungen mit und ohne Viskositätseinfluss	149
8.1	Eindimensionale reibungsfreie Strömungen	149
	8.1.1 Grundbegriffe – 8.1.2 Grundgleichungen der Stromfadentheorie – 8.1.3 Anwendungsbeispiele	
8.2	Zweidimensionale reibungsfreie, inkompressible Strömungen	154
	8.2.1 Kontinuität – 8.2.2 Euler'sche Bewegungsgleichungen – 8.2.3 Stationäre ebene Potentialströmungen – 8.2.4 Anwendungen elementarer und zusammengesetzter Potentialströmungen – 8.2.5 Stationäre räumliche Potentialströmungen	
8.3	Reibungsbehaftete inkompressible Strömungen	160
	8.3.1 Grundgleichungen für Masse, Impuls und Energie – 8.3.2 Kennzahlen – 8.3.3 Lösungsigenschaften der Navier-Stokes'schen Gleichungen – 8.3.4 Spezielle Lösungen für laminare Strömungen – 8.3.5 Turbulente Strömungen – 8.3.6 Grenzschichttheorie – 8.3.7 Impulssatz – 8.3.8 Anwendungsbeispiele	
8.4	Druckverlust und Strömungswiderstand	170
	8.4.1 Durchströmungsprobleme – 8.4.2 Umströmungsprobleme	
8.5	Strömungen in rotierenden Systemen	182
9	Gasdynamik	183
9.1	Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie	183
9.2	Allgemeine Stoßgleichungen	184
	9.2.1 Rankine-Hugoniot-Relation – 9.2.2 Rayleigh-Gerade – 9.2.3 Schallgeschwindigkeit – 9.2.4 Senkrechter Stoß – 9.2.5 Schiefer Stoß – 9.2.6 Busemann-Polare – 9.2.7 Herzkurve	
9.3	Kräfte auf umströmte Körper	190

9.4	Stromfadentheorie	191
	9.4.1 Lavaldüse	
9.5	Zweidimensionale Strömungen	194
	9.5.1 Kleine Störungen, $M_\infty \lesssim 1$ – 9.5.2 Transformation auf Charakteristiken –	
	9.5.3 Prandtl-Meyer-Expansion [16, 17] – 9.5.4 Düsenströmungen –	
	9.5.5 Profilmströmungen – 9.5.6 Transsonische Strömungen	
10	Gleichzeitiger Viskositäts- und Kompressibilitätseinfluss	204
10.1	Eindimensionale Rohrströmung mit Reibung	204
10.2	Kugelumströmung, Naumann-Diagramm für c_w	206
10.3	Grundsätzliches über die laminare Plattengrenzschicht	206
10.4	(M, Re) -Ähnlichkeit in der Gasdynamik	208
10.5	Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte aktueller Tragflügel	209
	Formelzeichen der Mechanik	211
	Formelzeichen der Strömungsmechanik	215
	Literatur	216