
Holzmann/Meyer/Schumpich
Technische Mechanik Festigkeitslehre

Holm Altenbach

Holzmann/Meyer/Schumpich Technische Mechanik Festigkeitslehre

13., überarbeitete und erweiterte Auflage

104 Aufgaben, 133 Beispiele und zahlreiche
Klausuraufgaben mit Lösungen



Springer Vieweg

Holm Altenbach
Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg, Deutschland

ISBN 978-3-658-22853-8

ISBN 978-3-658-22854-5 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-22854-5>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 1968, 1972, 1975, 1979, 1982, 1986, 1990, 2002, 2006, 2012, 2014, 2016, 2018

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. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort zur 13. Auflage

Die 12. Auflage erschien im Herbst 2016. Diese wurde erneut kritisch durchgesehen und zahlreiche Korrekturen und Verbesserungen fanden Eingang. Dies betrifft textliche Passagen, aber auch die Formulierung von Aufgaben und deren Lösungen. Die aktuelle Auflage bezieht außerdem Korrekturhinweise ein, die mir als Zuschriften bzw. mündlich in den letzten beiden Jahren zugegangen sind. Besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Lenz von meinem Lehrstuhl in Magdeburg, Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Öchsner (Hochschule Esslingen), Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerald Stengele (Hochschule Ulm) sowie Herrn Joseph Wirth (DIPLOMA-Hochschule Regensburg).

Die Herausnahme von Verweisen auf Normen usw. ist durch die Leser akzeptiert worden. Ich habe mich bemüht, die Werkstoffbezeichnungen weiter zu aktualisieren. Da die Bezeichnungen in einem permanenten Wechsel begriffen sind, möge man mir nachsehen, wenn nicht immer die neueste Bezeichnung im Buch verwendet wurde. Die Leser, die sich mehr mit Normen, Bezeichnungen usw. auseinandersetzen wollen, verweise ich auf die entsprechenden Handbücher, so z.B. auf den Dubbel, den ein Kollege meiner Fakultät mitherausgibt¹ und demnächst auch als 25. Auflage erscheinen wird.

Bei der Herausgabe der aktuellen Auflage erhielt ich Unterstützung bei der Erstellung von Abbildungen von meinem Mitarbeiter Joachim Nordmann. Die Literatur wurde ergänzt und aktualisiert durch meine Ehefrau Natalija Altenbach. Für das Korrekturlesen waren meine Sekretärin Manuela Schildt sowie meine Mitarbeiter Johanna Eisenträger, Stefan Bergmann und Joachim Nordmann verantwortlich. Verlagsseitig halfen wie immer Frau Ellen Klabunde und Herr Thomas Zipsner. Letzterer ermöglichte auch die Abgabe des Manuskripts im pdf-Format.

Der versprochene größere Umbruch muss leider wegen anderer Verpflichtungen noch aufgeschoben werden. Auf Anregung des Verlages wurde jedoch ein neues Kapitel zu exemplarischen Klausuraufgaben mit Lösungsweg und Bepunktung aufgenommen. Die Vorlagen hierfür stellte Herr Dr.-Ing. Wolfgang Lenz bereit. Die

¹ Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Aufl., Springer, Berlin u. a., 2014

Bepunktung bezieht sich jeweils auf die Gesamtpunktzahl einer dreistündigen Klausur mit insgesamt 100 Punkten. Der Leser kann somit das Gewicht der einzelnen Aufgaben besser einschätzen.

Hinweise zu dieser Auflage bzw. zu möglichen Weiterentwicklungen sollten wieder an mich direkt gehen (holm.altenbach@ovgu.de).

Magdeburg

Mai 2018

Holm Altenbach

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Aufgaben der Festigkeitslehre	1
1.2	Beanspruchungsarten - Grundbeanspruchungen	3
1.2.1	Zugbeanspruchung	4
1.2.2	Druckbeanspruchung	4
1.2.3	Schub- oder Scherbeanspruchung	4
1.2.4	Biegebeanspruchung	5
1.2.5	Torsionsbeanspruchung	5
1.2.6	Knickbeanspruchung	6
1.2.7	Zusammengesetzte Beanspruchung	7
1.3	Schnittmethode - Spannungen - Kräfteinleitung	7
1.4	Formänderungen - Zusammenhang mit den Spannungen	11
2	Zug- und Druckbeanspruchung	13
2.1	Zug- und Druckspannungen	13
2.2	Zugversuch	15
2.2.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm - HOOKE'sches Gesetz ...	16
2.2.2	Elastisches Verhalten - Formänderungsarbeit	19
2.2.3	Werkstoffkennwerte	22
2.3	Druckversuch	26
2.3.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm - HOOKE'sches Gesetz ...	26
2.3.2	Werkstoffkennwerte	27
2.4	Berechnung von Bauteilen unter Zug- und Druckbelastung	28
2.4.1	Einfache Belastungsfälle	28
2.4.2	Flächenpressung	36
2.4.3	Spannungen in dünnwandigen zylindrischen Ringen	39
2.4.3.1	Zugspannungen durch Fliehkräfte	39
2.4.3.2	Zug- und Druckspannungen in zylindrischen Hohlkörpern	40
2.4.4	Wärmespannungen - Schrumpfspannungen	42

2.4.5	Längs der Stabachse veränderliche Spannungen	45
2.4.5.1	Spannungen durch Eigengewicht	47
2.4.5.2	Körper konstanter Zug- und Druckbeanspruchung	49
2.4.5.3	Beanspruchung durch Fliehkräfte	50
2.5	Aufgaben zu Kapitel 2	51
2.6	Formelzusammenfassung Kapitel 2	55
3	Zulässige Beanspruchung und Sicherheit - Beurteilung des Versagens	57
3.1	Ruhende oder statische Beanspruchung	58
3.2	Schwingende oder dynamische Beanspruchung	58
3.2.1	Grenzspannung bei dynamischer Beanspruchung	59
3.2.1.1	Ermittlung der Dauerfestigkeit im Versuch	59
3.2.2	Einflüsse, die durch die elementare Berechnung nicht erfasst sind	63
3.2.2.1	Kerbwirkung	63
3.2.2.2	Versagen bei ruhender Beanspruchung unter Kerbwirkung	65
3.2.2.3	Versagen bei schwingender Beanspruchung unter Kerbwirkung	66
3.3	Anwendung auf Zug-Druck-Beanspruchung	69
3.4	Aufgaben zu Kapitel 3	75
3.5	Formelzusammenfassung Kapitel 3	77
4	Biegebeanspruchung gerader Balken	81
4.1	Flächenmomente	81
4.1.1	Begriffsbestimmung	82
4.1.1.1	Flächenmomente 1. Ordnung	83
4.1.1.2	Flächenmomente 2. Ordnung	84
4.1.2	Flächenmomente 2. Ordnung für einfache Flächen	84
4.1.2.1	Rechteck	85
4.1.2.2	Kreisring und Vollkreis	86
4.1.2.3	Dreieck	87
4.1.3	Abhängigkeit der Flächenmomente 2. Ordnung von der Lage des Koordinatensystems	89
4.1.3.1	Parallelverschiebung des Koordinatensystems - Satz von STEINER	89
4.1.3.2	Flächenmomente 2. Ordnung zusammengesetzter Flächen	90
4.1.3.3	Drehung des Koordinatensystems um den Schwerpunkt	97
4.2	Gerade Biegung	101
4.2.1	Reine Biegung	102
4.2.2	Biegung bei veränderlichem Biegemoment	111
4.2.3	Träger und Wellen konstanter Biegebeanspruchung	117

4.3	Schiefe oder allgemeine Biegung	121
4.3.1	Biegespannungen und Nulllinie	122
4.3.1.1	Biegespannungen	122
4.3.1.2	Nulllinie	124
4.4	Zulässige Spannung und Sicherheit bei Biegung	127
4.4.1	Grenzspannung	127
4.4.2	Kerbwirkung	129
4.4.3	Versagen bei ruhender und schwingender Beanspruchung	129
4.4.4	Anwendung auf Biegebeanspruchung	130
4.5	Aufgaben zu Kapitel 4	134
4.5.1	Aufgaben zu Abschnitt 4.1	134
4.5.2	Aufgaben zu Abschnitt 4.2	136
4.5.3	Aufgaben zu Abschnitt 4.3	139
4.5.4	Aufgaben zu Abschnitt 4.4	140
4.6	Formelzusammenfassung Kapitel 4	142
5	Durchbiegung gerader Balken - Biegelinie	143
5.1	Krümmung der Biegelinie	143
5.2	Durchbiegung - Differentialgleichungen der Biegelinie	144
5.2.1	Differentialgleichung 2. Ordnung	145
5.2.2	Differentialgleichung 4. Ordnung	164
5.3	Formänderungsarbeit bei der Biegung - Biegefedern	170
5.4	Vergleichende Beurteilung von Biegespannung und Durchbiegung	174
5.5	Durchbiegung bei schiefer Biegung	177
5.6	Aufgaben zu Kapitel 5	179
5.7	Formelzusammenfassung Kapitel 5	180
6	Statisch unbestimmte Systeme	183
6.1	Allgemeines	183
6.2	Starre Lagerung	184
6.3	Satz von CASTIGLIANO	191
6.3.1	Energetische Betrachtungen zu verformbaren Systemen	191
6.3.2	Anwendung des 2. Satzes von CASTIGLIANO	192
6.4	Elastische Lagerung	197
6.5	Einfluss der statisch unbestimmten Lagerung bei Wellen und Trägern	199
6.6	Geschlossene Rahmen	203
6.7	Aufgaben zu Kapitel 6	206
6.8	Formelzusammenfassung Kapitel 6	208
7	Torsion prismatischer Stäbe	209
7.1	Torsion gerader Stäbe	209
7.1.1	Schubspannung und Schubverformung - HOOKE'sches Gesetz - Formänderungsarbeit	211

7.1.2	Torsionsstäbe mit Vollkreisquerschnitt	213
7.1.2.1	Schubspannungen	213
7.1.2.2	Torsionswinkel	215
7.1.3	Torsionsstäbe mit Kreisringquerschnitt	216
7.1.4	Torsionsstäbe mit beliebiger Querschnittform	221
7.1.4.1	Dünnwandige Hohlquerschnitte	225
7.1.4.2	Rechteck	226
7.1.4.3	Dünnwandige offene Profilquerschnitte	226
7.1.5	Kerbwirkung, Grenzspannungen und zulässige Spannung bei Torsion	229
7.1.6	Formänderungsarbeit bei Torsion - Drehstabfedern	231
7.1.7	Vergleichende Beurteilung von Schubspannung und Torsionswinkel	235
7.2	Torsionsbeanspruchung gekrümmter Stäbe	236
7.2.1	Zylindrische Schraubenfedern	236
7.3	Aufgaben zu Kapitel 7	243
7.3.1	Aufgaben zu Abschnitt 7.1	243
7.3.2	Aufgaben zu Abschnitt 7.2	245
7.4	Formelzusammenfassung Kapitel 7	246
8	Schubbeanspruchung durch Querkräfte	247
8.1	Einfache Scherung	247
8.2	Schubspannungen durch Querkräfte bei Biegung	251
8.3	Abschätzung der Größenordnung der Schubspannung	255
8.4	Schubspannungen in Profilträgern - Schubmittelpunkt	257
8.5	Berechnung von genieteten und geschweißten Trägern	262
8.6	Schubverformung	264
8.7	Aufgaben zu Kapitel 8	266
8.8	Formelzusammenfassung Kapitel 8	267
9	Zusammengesetzte Beanspruchung	269
9.1	Einteilung und Beispiele	269
9.1.1	Zusammengesetzte Zug- oder Druck- und Biegebeanspruchung	270
9.1.2	Biegung stark gekrümmter Träger	279
9.1.3	Zusammengesetzte Schub- und Torsionsbeanspruchung	286
9.2	Spannungszustand - Geometrie der Spannungen	287
9.2.1	Geschlossene dünnwandige zylindrische und kugelförmige Behälter unter innerem und äußerem Überdruck	290
9.2.2	Ebener - zweiachsiger - Spannungszustand	292
9.2.2.1	Abhängigkeit der Spannung von der Schnittrichtung - Hauptspannungen	293
9.2.2.2	Mohr'scher Spannungskreis	296
9.2.2.3	Beziehungen zwischen den Spannungen am Flächenelement	297

9.2.3	Räumlicher - dreiachsiger - Spannungszustand	299
9.3	Formänderungen des ebenen Spannungszustands	306
9.3.1	Allgemeines Hooke'sches Gesetz für den ebenen Spannungszustand	306
9.3.2	Beziehungen zwischen den isotropen Werkstoffkennwerten .	309
9.3.3	Volumenänderung	310
9.3.4	Abschätzung der Größenordnung der Querkontraktionszahl .	311
9.3.5	Dehnungsmessungen - Berechnung der Spannungen	312
9.4	Festigkeithypothesen - Versagen bei mehrachsiger Beanspruchung	315
9.4.1	Vergleichsspannung	317
9.4.1.1	Hypothese der größten Hauptspannung	317
9.4.1.2	Hypothese der größten Schubspannung	317
9.4.1.3	Hypothese der größten Gestaltänderungsenergie . .	317
9.4.2	Berechnungsgleichungen - Korrekturzahl nach VON BACH .	318
9.5	Aufgaben zu Kapitel 9	322
9.5.1	Aufgaben zu Abschnitt 9.1	322
9.5.2	Aufgaben zu Abschnitt 9.2	325
9.5.3	Aufgaben zu Abschnitt 9.3	326
9.5.4	Aufgaben zu Abschnitt 9.4	327
9.6	Formelzusammenfassung Kapitel 9	329
10	Stabilitätsprobleme	331
10.1	Arten des Gleichgewichts	331
10.2	EULER'sche Knickkraft	339
10.2.1	EULER'sche Knickkraft - Differentialgleichung 2. Ordnung .	340
10.2.2	EULER'sche Knickkraft - Differentialgleichung 4. Ordnung .	341
10.2.3	Außermittiger und mittiger Kraftangriff	352
10.2.4	Knicksicherheit	356
10.2.5	Knicken bei behinderter Wärmedehnung	360
10.3	Knickspannungsdiagramm	362
10.4	Beulung dünnwandiger Hohlkörper	365
10.4.1	Kreiszylinder unter Axialdruck	365
10.4.2	Konstanter Außendruck	366
10.5	Aufgaben zu Kapitel 10	368
10.6	Formelzusammenfassung Kapitel 10	370
11	Rotationssymmetrischer Spannungszustand in Scheiben	371
11.1	Herleitung der Grundgleichungen	371
11.1.1	Gleichgewichtsbedingungen	372
11.1.2	Verträglichkeitsbedingung	373
11.2	Dickwandige zylindrische Behälter unter Innen- und Außendruck .	374
11.2.1	Spannungsverteilung - Vergleichsspannung	375
11.2.1.1	Innendruck	376
11.2.1.2	Außendruck	376

11.2.2	Fließbeginn - vollplastischer Grenzzustand	382
11.2.3	Näherungsrechnung im teilplastischen Bereich - Berechnungsvorschriften	383
11.2.4	Mehrlagenbehälter - Schrumpfverbindungen	387
11.3	Aufgaben zu Kapitel 11	391
12	Lösungen zu den Aufgaben	393
12.1	Kapitel 2	393
12.2	Kapitel 3	395
12.3	Kapitel 4	396
12.3.1	Abschnitt 4.1	396
12.3.2	Abschnitt 4.2	396
12.3.3	Abschnitt 4.3	400
12.3.4	Abschnitt 4.4	401
12.4	Kapitel 5	401
12.5	Kapitel 6	402
12.6	Kapitel 7	403
12.6.1	Abschnitt 7.1	403
12.6.2	Abschnitt 7.2	404
12.7	Kapitel 8	405
12.8	Kapitel 9	405
12.8.1	Abschnitt 9.1	405
12.8.2	Abschnitt 9.2	406
12.8.3	Abschnitt 9.3	407
12.8.4	Abschnitt 9.4	408
12.9	Kapitel 10	408
12.10	Kapitel 11	409
13	Beispiele von Klausuraufgaben	411
	Literaturverzeichnis	421
	Sachwortverzeichnis	425