
Einführung in die Festigkeitslehre

Volker Lappler

Einfuhrung in die Festigkeitslehre

Lehr- und ubungsbuch

4., aktualisierte Auflage



Springer Vieweg

Volker Läßle
Hochschule Reutlingen
Reutlingen, Deutschland

Ergänzendes Material zu diesem Buch finden Sie unter www.springer.com.

ISBN 978-3-658-10610-2

ISBN 978-3-658-10611-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-10611-9

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 2006, 2008, 2011, 2016

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.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Vorwort zur 4. Auflage

Die **Festigkeitslehre** ist eine technische Disziplin, die sich mit der Ermittlung der inneren Beanspruchung fester Körper sowie mit der Beurteilung des daraus resultierenden Werkstoffverhaltens beschäftigt. Mit den Methoden der Festigkeitslehre können Bauteile wirtschaftlich dimensioniert und sicher ausgelegt werden.

Während die Verfahren der Elastostatik bzw. der Elastizitätstheorie nur die Ermittlung von Spannungen und Verformungen im Werkstück erlauben, muss in der Festigkeitslehre zusätzlich die Reaktion des Werkstoffs auf die jeweilige Beanspruchung berücksichtigt werden. Die Festigkeitslehre ist dementsprechend ein interdisziplinäres Fachgebiet. Sie erfordert nicht nur mathematische und physikalische Grundkenntnisse sondern vor allem auch Kenntnisse aus der Mechanik und der Werkstoffkunde.

Obwohl Spannungen und Verformungen in realen, komplexen Bauteilen heute mit Hilfe leistungsfähiger Programme berechnet werden können, ist es aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen häufig nicht geboten, in allen Phasen der Bauteilentwicklung derartige Berechnungen durchzuführen. Auch die Überprüfung der Plausibilität von Festigkeitsberechnungen sowie die Beurteilung des eng mit der Beanspruchung verknüpften Werkstoffverhaltens muss vom Konstrukteur selbst durchgeführt werden. Hierfür müssen Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden, die es erlauben, auf einfache Weise das Bauteilverhalten unter Berücksichtigung von Geometrie und Beanspruchung abzuschätzen. Eine der Hauptschwierigkeiten dabei ist es, reale, meist komplexe Bauteile auf einfachere und damit berechenbare Körper zu reduzieren, ohne die für das Werkstoffverhalten maßgeblichen Einflussfaktoren zu vernachlässigen.

Das Ziel des vorliegenden Lehr- und Übungsbuches ist es, auf möglichst einfache und anschauliche Weise, Hilfsmittel zur sicheren und wirtschaftlichen Berechnung und Dimensionierung von Bauteilen zur Verfügung zu stellen. Die mathematisch-physikalischen sowie die werkstoffkundlichen Grundlagen bleiben dabei auf das Nötigste beschränkt, um Raum für vielfältige Übungsaufgaben zu schaffen. Der dargebotene Lehrstoff kann anhand von mehr als 140 Aufgaben mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad eingeübt werden. Ergebnisse zu allen Übungsaufgaben erlauben eine sofortige Kontrolle des Lernerfolgs. Ausführliche Lösungsvorschläge sowie Lösungsvarianten finden Sie im separat verfügbaren **Lösungsbuch zur Einführung in die Festigkeitslehre**.

Das vorliegende Lehr- und Übungsbuch eignet sich vorlesungsbegleitend im Rahmen des Studiums des Ingenieurwesens an Hochschulen und Universitäten. Aber auch Technikern und Ingenieuren in der Praxis soll es wertvolle Hinweise zur Beurteilung des Festigkeitsverhaltens liefern.

Die große Nachfrage, auch zur 3. Auflage des Lehr- und Übungsbuches, machte nunmehr eine Neuauflage erforderlich. Gestärkt durch die vielfältigen positiven Zuschriften aus dem Leserkreis wurde das didaktische Konzept der 3. Auflage beibehalten und eine Aktualisierung vorgenommen. Die 4. Auflage enthält **drei vollständig gelöste Musterklausuren**, das bewährte **Verzeichnis englischer Fachausdrücke** sowie das aus der 3. Auflage bewährte **Manuskript** zum sofortigen Vorlesungseinsatz und eine **Formelsammlung**. Zum besseren Verständnis und zum schnelleren Informationstransport wurden wichtige Formeln farblich unterlegt. Die früher auf einer CD beigelegten 300 Farbfolien zur Vorlesungsgestaltung werden jetzt auf der Verlagshomepage beim Buch zum Download bereitgestellt.

Mein besonderer Dank gilt dem Verlag Springer Vieweg, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zipsner, für die sorgfältige Drucklegung und die angenehme Zusammenarbeit. Gedankt sei an dieser Stelle auch allen Lesern für die wertvollen Hinweise, die zur Verbesserung der vorliegenden 4. Auflage geführt haben.

Anregungen für Ergänzungen sowie Verbesserungsvorschläge werden weiterhin stets gerne entgegen genommen.

Schorndorf, im August 2016

Volker Läßle

Anmerkungen zur Bewertung der Schwierigkeit der Aufgaben

Das vorliegende Lehrbuch enthält mehr als **140 Aufgaben** mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden zu allen Themengebieten.

Die meist praxisorientierten Aufgaben ermöglichen es Ihnen, das erlernte Wissen zu überprüfen, anzuwenden und zu vertiefen. Weiterhin können die Aufgaben zur selbstständigen und gezielten Klausurvorbereitung eingesetzt werden.

Es wird empfohlen, die Aufgaben parallel zu den einzelnen Kapiteln des Lehrbuchs durchzuarbeiten. Die ausführlichen Lösungen sowie Lösungsvarianten zu allen Aufgaben finden Sie im separat verfügbaren **Lösungsbuch zur Einführung in die Festigkeitslehre**.

Die Bewertung der Schwierigkeit der Aufgaben erfolgt gemäß der Symbolik:

- Einfache Aufgabe. Die Lösung erfordert nur geringe einschlägige Vorkenntnisse und dient der Einführung in das Themengebiet. Häufig stehen einfache Formeln zur Lösung der Aufgabe zur Verfügung.
- Aufgabe mit mäßigem Schwierigkeitsgrad. Zur Lösung der Aufgabe sind Grundkenntnisse aus der Mechanik und Festigkeitslehre erforderlich. Weiterhin müssen bereits einfache Zusammenhänge und grundlegende Mechanismen verstanden werden.
- Aufgaben mit mittlerem Schwierigkeitsgrad. Die Lösung erfordert ein fundiertes Basiswissen insbesondere auf den Gebieten der Mechanik und der Festigkeitslehre sowie die Fähigkeit, themenübergreifende Zusammenhänge und komplexere Mechanismen zu verstehen. Mathematische Grundkenntnisse sind zur Lösung der Aufgabe in der Regel erforderlich.
- Schwierige Aufgabe. Die Aufgabe erfordert die Analyse der Problemstellung, die Entwicklung einer geeigneten Lösungsstrategie sowie das Aufzeigen und die Formulierung einer möglichen Lösung. Alternative Lösungen sind möglich. Vertiefte mathematische Kenntnisse sind zur Lösung der Aufgabe in der Regel erforderlich.
- Sehr schwierige Aufgabe meist mit hohem Praxisbezug. Die Lösung erfordert vom Bearbeiter die Entwicklung einer eigenständigen Lösungsstrategie und sehr fundierte Kenntnisse, insbesondere aus der Festigkeitslehre. Vertiefte mathematische Kenntnisse sowie Grundkenntnisse aus der Werkstoffkunde sind Voraussetzung zur erfolgreichen Lösung der Aufgabe.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Grundbelastungsarten	2
2.1 Zug	3
2.1.1 Spannungsermittlung bei Zugbeanspruchung	3
2.1.2 Werkstoffverhalten und Kennwerte bei Zugbeanspruchung	4
2.1.3 Zulässige Spannung bei Zugbeanspruchung	13
2.1.4 Formänderungen durch einachsige Normalspannung	15
2.1.5 Aufgaben	17
2.2 Druck	22
2.2.1 Spannungsermittlung bei Druckbeanspruchung	22
2.2.2 Werkstoffverhalten und Kennwerte bei Druckbeanspruchung	22
2.2.3 Zulässige Spannung bei Druckbeanspruchung	25
2.2.4 Aufgaben	26
2.3 Gerade Biegung	28
2.3.1 Spannungsermittlung bei gerader Biegung	29
2.3.2 Axiale Flächen- und Widerstandsmomente zusammengesetzter Querschnitte ..	35
2.3.3 Werkstoffverhalten und Kennwerte bei Biegebeanspruchung	37
2.3.4 Zulässige Spannung bei Biegebeanspruchung	38
2.3.5 Aufgaben	39
2.4 Schub	44
2.4.1 Schubspannung	44
2.4.2 Schiebung (Winkelverzerrung)	45
2.4.3 Formänderung durch Schubspannungen	45
2.4.4 Spannungsermittlung bei Abscherbeanspruchung	46
2.4.5 Werkstoffkennwerte bei Abscherbeanspruchung	46
2.4.6 Zulässige Spannung bei Abscherbeanspruchung	47
2.4.7 Aufgaben	48
2.5 Torsion	50
2.5.1 Spannungsermittlung bei Torsion kreisförmiger Querschnitte	50
2.5.2 Verdrehwinkel	53
2.5.3 Werkstoffverhalten und Kennwerte bei Torsionsbeanspruchung	54
2.5.4 Zulässige Spannung bei Torsionsbeanspruchung	56
2.5.5 Aufgaben	57
2.6 Zusammenfassung der Grundbelastungsarten	61
3 Spannungszustand	62
3.1 Spannungsbegriff	63
3.1.1 Normal- und Schubspannungen	63
3.1.2 Indizierung von Normal- und Schubspannungen	64
3.1.3 Vorzeichenregelung für Normal- und Schubspannungen	64
3.1.4 Zugeordnete Schubspannungen	65

3.2	Einachsiger Spannungszustand	65
3.3	Zweiachsiger (ebener) Spannungszustand	68
3.3.1	Spannungskomponenten und Schnitttrichtung	68
3.3.2	Mohrscher Spannungskreis	70
3.4	Dreiachsiger (räumlicher) Spannungszustand	75
3.4.1	Spannungstensor	75
3.4.2	Berechnung von Normal- und Schnittspannungen in einer bel. Schnittebene ..	77
3.4.3	Hauptnormalspannungen bei dreiachsigem Spannungszustand	78
3.4.4	Mohrscher Spannungskreis für den dreiachsigen Spannungszustand	82
3.4.5	Hauptschubspannungen bei dreiachsigem Spannungszustand	83
3.4.6	Graphische Ermittlung von Schnittspannungen	84
3.5	Aufgaben	85
4	Verformungszustand	88
4.1	Verformungsgrößen	89
4.1.1	Dehnung	89
4.1.2	Schiebung (Winkelverzerrung)	89
4.1.3	Vorzeichenregelung für Dehnungen und Schiebungen	89
4.1.4	Indizierung von Dehnungen und Schiebungen	90
4.2	Verformungszustand und Schnitttrichtung	91
4.2.1	Berechnung der Dehnung ε_x	91
4.2.2	Berechnung der Schiebung $\gamma_{x'y'}$	93
4.3	Mohrscher Verformungskreis	95
4.3.1	Konstruktion des Mohrschen Verformungskreises	96
4.3.2	Hauptdehnungen und Hauptdehnungsrichtungen	97
4.3.3	Verformungszustand	97
4.4	Praktische Anwendung des Mohrschen Verformungskreis	99
4.4.1	Auswertung dreier beliebig orientierter Dehnungsmessstreifen	99
4.4.2	Auswertung einer 0° - 45° - 90° DMS-Rosette	101
4.5	Grundlagen der Dehnungsmesstechnik	102
4.6	Aufgaben	105
5	Elastizitätsgesetze	107
5.1	Formänderungen durch einachsige Normalspannung	107
5.2	Formänderungen durch Schubspannungen	108
5.3	Formänderungen beim allgemeinen (dreiachsigen) Spannungszustand	108
5.4	Formänderungen beim ebenen (zweiachsigen) Spannungszustand	111
5.5	Aufgaben	112

6 Festigkeitshypothesen	116
6.1 Normalspannungshypothese (NH)	118
6.1.1 NH in Lastspannungen bei zweiachsigem Spannungszustand	118
6.1.2 NH bei Zug- oder Biegebeanspruchung mit überlagerter Torsion	119
6.1.3 Grenzkurve für das Werkstoffversagen nach der NH	119
6.2 Schubspannungshypothese (SH)	121
6.2.1 SH in Lastspannungen bei zweiachsigem Spannungszustand	123
6.2.2 SH bei Zug-, Druck oder Biegebeanspruchung mit überlagerter Torsion	125
6.2.3 Grenzkurve für das Werkstoffversagen nach der SH	125
6.3 Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH)	126
6.3.1 GEH in Lastspannungen bei zweiachsigem Spannungszustand	127
6.3.2 GEH bei Zug-, Druck oder Biegebeanspruchung mit überlagerter Torsion	127
6.3.3 Grenzkurve für das Werkstoffversagen nach der GEH	128
6.4 Zusammenfassung der Festigkeitshypothesen	129
6.5 Aufgaben	130
7 Kerbwirkung	138
7.1 Technische Kerben	138
7.2 Auswirkung technischer Kerben	139
7.3 Nennspannung und Formzahl	140
7.3.1 Nennspannung	140
7.3.2 Formzahl	140
7.3.3 Ermittlung von Formzahlen	141
7.3.4 Formzahldiagramme	142
7.4 Kerbwirkung und Bauteilverhalten	143
7.4.1 Kerbwirkung bei spröden Werkstoffen	143
7.4.2 Kerbwirkung bei duktilen Werkstoffen	143
7.5 Aufgaben	146
8 Knickung von Stäben	154
8.1 Knickkraft (Eulersche Knickfälle)	154
8.1.1 Knickung bei außermittigem Kraftangriff	154
8.1.2 Knickung bei mittigem Kraftangriff	158
8.2 Spannungsermittlung bei Knickung	160
8.3 Zulässige Spannung bei Knickung	161
8.4 Knicklänge	161
8.5 Knickspannungsdiagramme	163
8.6 Biegeknickung	165
8.7 Aufgaben	166

9 Schiefe Biegung	171
9.1 Flächenmomente.....	171
9.1.1 Flächenmomente 1. Ordnung	171
9.1.2 Flächenmomente 2. Ordnung	172
9.1.3 Abhängigkeit der Flächenmomente 2. Ordnung vom Koordinatensystem	174
9.2 Spannungsermittlung bei schiefer Biegung.....	178
9.3 Nulllinie.....	180
9.4 Aufgaben	182
10 Schubspannungen durch Querkräfte bei Biegung	186
10.1 Spannungsermittlung bei Querkraftschub	186
10.2 Schubspannungen in dünnwandigen Profilträgern.....	190
10.2.1 Horizontale Schubspannungen im Flansch	191
10.2.2 Vertikale Schubspannungen im Steg	191
10.2.3 Schubmittelpunkt	192
10.3 Schubspannungen in genieteten und geschweißten Profilträgern	193
10.3.1 Genietete Träger	193
10.3.2 Geschweißte Träger	194
10.4 Schub- und Normalspannungen bei biegebeanspruchten Balken	195
10.5 Verformung unter Schubbeanspruchung (Schubverformung)	196
10.6 Aufgaben	197
11 Torsion nicht kreisförmiger Querschnitte	200
11.1 Torsion dünnwandiger, geschlossener Hohlprofile.....	200
11.2 Torsion dünnwandiger, offener Hohlprofile	201
11.3 Torsion beliebiger Vollquerschnitte	202
11.3.1 Membran-Analogie von Prandtl	202
11.3.2 Strömungsanalogie von Thomson	203
11.4 Grundgleichungen zur Torsion ausgewählter Querschnitte	204
11.5 Aufgaben	206
12 Behälter unter Innen- und Außendruck	207
12.1 Dünnwandige Behälter	207
12.1.1 Dünnwandige Behälter unter Innendruck.....	207
12.1.2 Dünnwandige Behälter unter Außendruck	210
12.1.3 Dünnwandige Hohlkugel unter Innen- bzw. Außendruck.....	211
12.1.4 Dünnwandige Behälter mit elliptischer Unrundheit	212
12.2 Dickwandige Behälter	213
12.2.1 Elastischer Zustand unter Innen- bzw. Außendruck.....	213
12.2.2 Vollplastischer Zustand unter Innendruck.....	224
12.2.3 Teilplastischer Zustand unter Innendruck	227
12.3 Aufgaben	234

13 Werkstoffermüdung und Schwingfestigkeit	245
13.1 Schadensfälle infolge Werkstoffermüdung.....	246
13.2 Mechanismen der Entstehung eines Ermüdungsrissses.....	247
13.3 Ermüdungsbruchflächen	250
13.4 Begriffsdefinitionen	250
13.5 Werkstoffverhalten und Kennwerte	252
13.5.1 Wöhlerversuch und Wöhlerkurve	252
13.5.2 Einteilung der Wöhlerkurve	254
13.5.3 Grenzschwingspielzahl	256
13.5.4 Analytische Beschreibung der Wöhlerkurve	256
13.5.5 Statistische Auswertung von Wöhlerversuchen	258
13.5.6 Dauerfestigkeitskennwerte	260
13.6 Spannungsermittlung bei Schwingbeanspruchung	263
13.6.1 Nachweis der Dauerfestigkeit	264
13.6.2 Festigkeitsbedingung	265
13.7 Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit	265
13.7.1 Mittelspannungseinfluss (Dauerfestigkeitsschaubilder)	266
13.7.2 Einfluss der Oberflächenrauigkeit	277
13.7.3 Einfluss der Proben- bzw. Bauteilgröße - Größeneinfluss.....	280
13.7.4 Einfluss der Temperatur.....	283
13.7.5 Einfluss einer Oberflächenverfestigung (Randschichteneinfluss).....	284
13.7.6 Einfluss von Eigenspannungen	286
13.7.7 Frequenzeinfluss	287
13.7.8 Kerbwirkung bei schwingender Beanspruchung	288
13.8 Aufgaben.....	293
Anhang 1: Werkstoffkennwerte.....	312
Anhang 2: Sicherheitsfaktoren.....	321
Anhang 3: Formzahldiagramme.....	322
Anhang 4: Lösungen zu den Aufgaben	330
Anhang 5: Musterklausur 1	373
Anhang 6: Musterklausur 2	388
Anhang 7: Musterklausur 3	399
Anhang 8: Englische Fachausdrücke	411
Literaturverzeichnis	425
Sachwortverzeichnis	428

Griechisches Alphabet

A	α	Alpha	Z	ζ	Zeta	Λ	λ	Lambda	Π	π	Pi	Φ	φ	Phi
B	β	Beta	H	η	Eta	M	μ	Mü	P	ρ	Rho	X	χ	Chi
Γ	γ	Gamma	Θ	θ	Theta	N	ν	Nü	Σ	σ	Sigma	Ψ	ψ	Psi
Δ	δ	Delta	I	ι	Jota	Ξ	ξ	Ksi	T	τ	Tau	Ω	ω	Omega
E	ε	Epsilon	K	κ	Kappa	O	o	Omikron	Y	υ	Ypsilon			

Vorsätze dezimaler Teile und Vielfache

Vorsatz	Piko	Nano	Mikro	Milli	Zenti	Dezi	Deka	Hekto	Kilo	Mega	Giga	Tera
Zeichen	p	n	μ	m	c	d	da	h	k	M	G	T
Zehnerpotenz	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^1	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}

Wichtige Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

A	Bruchdehnung
A_m	Fläche innerhalb der Profilmittellinie
A_0	Anfangsquerschnittsfläche
A_u	Querschnittsfläche an der Bruchstelle
A_R	Restfläche
c	Konstante
C_O	Oberflächenfaktor (Rauheitsfaktor)
C_G	Größenfaktor
C_T	Temperaturfaktor
C_V	Randschichtfaktor
d_a	Außendurchmesser
d_i	Innendurchmesser
D	Diskriminante
e	Exzentrizität
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz oder Korrekturfaktor
F	Kraft
F_d	Druckkraft
F_K	Knickkraft
G	Schubmodul (Gleitmodul)
H	Flächenmoment 1. Ordnung
I	Flächenmoment 2. Ordnung
I_i	Hauptflächenmoment ($i = 1, 2$)
I_p	polares Flächenmoment 2. Ordnung
I_t	Torsionsflächenmoment (Drillwiderstand)
k	k-Faktor (DMS) oder Neigungsexponent
l	(Stab-)Länge
l_K	Knicklänge
L_0	Anfangsmesslänge
L_u	Länge der Probe nach dem Bruch
m	Poisson-Zahl oder Exponent
M	Mittelspannungsempfindlichkeit

M_b	Biegemoment
n_γ	dynamische Stützziffer
n_{pl}	plastische Stützziffer
N	Schwingspielzahl
N_B	Bruchschwingspielzahl
N_D	Eckschwingspielzahl
N_G	Grenzschwingspielzahl
p_a	Außendruck
p_i	Innendruck
P_A	Ausfallwahrscheinlichkeit
P_U	Überlebenswahrscheinlichkeit
Q	Querkraft
r_a	Außenradius
r_i	Innenradius
R	Spannungsverhältnis oder Radius
R_{eH}	obere Streckgrenze
R_{eL}	untere Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
R_p	Dehngrenze
s	Wanddicke
S_B	Sicherheit gegen Bruch
S_D	Sicherheit gegen Schwingbruch
S_F	Sicherheit gegen Fließen
S_K	Sicherheit gegen Knickung
t	Nietteilung
t_{min}	kleinste Wanddicke
U_m	Messspannung
U_S	Speisespannung
w	Durchbiegung
W_b	axiales Widerstandsmoment
W_t	Widerstandsmoment gegen Torsion
z_S	Schwerpunktkoordinate
Z	Brucheinschnürung

Wichtige Formelzeichen (Fortsetzung)

Griechische Buchstaben

α_k	Formzahl	σ_E	Elastizitätsgrenze
β_k	Kerbwirkungszahl	σ_{Hi}	Hauptnormalspannung, ungeordnet ($i = 1, 2, 3$)
γ	Schiebung	σ_i	Hauptnormalspannung, geordnet ($i = 1, 2, 3$)
ΔL	Verlängerung	σ_K	Knickspannung
ε	(technische) Dehnung	σ_m	Mittelspannung
ε_a	Axialdehnung oder Dehnungsamplitude	σ_n	Nennspannung
ε_{el}	elastische Dehnung	σ_o	Oberspannung
ε_F	Dehnung bei Fließbeginn	σ_O	dauernd ertragbare Oberspannung
ε_{ges}	Gesamtdehnung	σ_P	Proportionalitätsgrenze
ε_{Hi}	Hauptdehnung, ungeordnet ($i = 1, 2, 3$)	σ_r	Radialspannung
ε_i	Hauptdehnung, geordnet ($i = 1, 2, 3$)	σ_{Sch}	Schwellfestigkeit
ε_l	Längsdehnung	σ_t	Tangentialspannung
ε_m	mittlere Dehnung	σ_u	Unterspannung
ε_{pl}	plastische Dehnung	σ_U	dauernd ertragbare Unterspannung
ε_q	Querdehnung	σ_V	Vergleichsspannung
ε_r	Radialdehnung	σ_W	Wechselfestigkeit
ε_t	Tangentialdehnung	σ_{zdW}	Zug-Druck-Wechselfestigkeit
ϑ	Temperatur (in Grad Celsius)	σ_{zul}	zulässige Normalspannung
κ	Unrundheit	τ	Schubspannung
λ	Schlankheitsgrad	τ_a	mittlere Abscherspannung
λ_G	Grenzschlankheitsgrad	τ_{aB}	Scherfestigkeit
μ	Querkontraktionszahl	τ_{AD}	dauernd ertragbare Spannungsamplitude
σ	Normalspannung	τ_{Hi}	Hauptschubspannung ($i = 1, 2, 3$)
σ_a	Axialspannung oder Spannungsamplitude	τ_m	Mittelspannung
σ_{AD}	dauernd ertragbare Spannungsamplitude	τ_n	Nennspannung
σ_b	(maximale) Biegespannung	τ_{max}	maximale Schubspannung
σ_{bB}	Biegefestigkeit	τ_{Sch}	Schwellfestigkeit
σ_{bF}	Biegefließgrenze	τ_{sW}	Schubwechselfestigkeit
σ_{bW}	Biegewechselfestigkeit	τ_t	Torsionsschubspannung
σ_d	(Druck)Normalspannung	τ_{tB}	Torsionsfestigkeit
σ_{dB}	Druckfestigkeit	τ_{tF}	Torsionsfließgrenze
σ_{dF}	natürliche Quetschgrenze (Druckfließgrenze)	τ_{tW}	Torsionswechselfestigkeit
σ_{dP}	Stauchgrenze	τ_W	Wechselfestigkeit
σ_{dP}	Druckproportionalitätsgrenze	τ_{zul}	zulässige Schubspannung
		φ	Verdrehwinkel
		χ^+	bezogener Spannungsgradient

Lösungsbuch zur Einführung in die Festigkeitslehre (mit Formelsammlung)

Das vorliegende Lehr- und Übungsbuch enthält mehr als 140 praxisorientierte Aufgaben von unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad. Ausführliche Lösungen sowie Lösungsalternativen finden Sie im separat verfügbaren **Lösungsbuch zur Einführung in die Festigkeitslehre** (mit Formelsammlung).

Läpple, Volker:

Lösungsbuch zur Einführung in die Festigkeitslehre

3. Auflage 2012

ISBN 978-3-8348-1788-4

