

Lothar Issler · Hans Ruoff · Peter Häfele

Festigkeitslehre – Grundlagen

Mit 105 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona Budapest

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIX
Hinweise zur Programmdiskette	XXXIX
Bedeutung der Randsymbole	XL
1 Einleitung	1
1.1 Definition der Festigkeitslehre	2
1.2 Aufgabe der Festigkeitslehre	2
1.3 Prinzip der Festigkeitsberechnung	3
1.4 Festigkeitsbedingung	4
1.5 Versagen	7
1.6 Gliederung des vorliegenden Bandes	10
1.7 Inhalt der weiteren Bände	12
1.8 Zusammenfassung	13
1.9 Verständnisfragen	13
2 Verformungszustand	15
2.1 Verformungsgrößen	16
2.1.1 Verschiebungsfeld	16
2.1.2 Dehnungen und Schiebungen	17
2.1.3 Indizierung der Verformungsgrößen	19
2.2 Verformungsgrößen und Bezugsrichtungen	20
2.2.1 Verformungen in beliebiger Richtung	21
2.2.2 Mohrscher Verformungskreis	21
2.2.3 Folgerungen aus dem Mohrschen Verformungskreis	23

2.2.4	Hauptdehnungen	23
2.3	Volumendehnung	26
2.4	Dehnungsmessung mit Dehnungsmeßstreifen	27
2.4.1	Aufbau und Wirkungsweise eines DMS	27
2.4.2	Wheatstonesche Brückenschaltung	29
2.4.3	Auswertung der Dehnungsmessungen	32
2.5	Zusammenfassung	35
2.6	Rechnerprogramme	36
2.6.1	Mohrscher Verformungskreis (Programm P2_1)	36
2.6.2	Auswertung einer DMS-Rosette (I) (Programm P2_2)	37
2.7	Verständnisfragen	38
2.8	Musterlösungen	39
2.8.1	Verformungszustand eines Oberflächenelements	39
2.8.2	Auswertung einer DMS-Rosette mit beliebigen Meßrichtungen	42
3	Spannungszustand	45
3.1	Schnittprinzip	46
3.2	Spannungsvektor	47
3.3	Schnittspannungen am Würfelement	48
3.4	Ebener Spannungszustand	52
3.4.1	Spannungen in beliebiger Schnittrichtung	52
3.4.2	Mohrscher Spannungskreis	54
3.4.3	Hauptspannungen	56
3.5	Allgemeiner Spannungszustand	58
3.5.1	Hauptspannungen	58
3.5.2	Darstellung des räumlichen Spannungszustandes	59
3.5.3	Definition des Spannungszustandes	60
3.6	Zusammenhang zwischen Schnittspannungen und äußerer Belastung	61
3.7	Zusammenfassung	63
3.8	Rechnerprogramme	63
3.8.1	Schnittspannungen am Würfelement (Programm P3_1)	63
3.8.2	Mohrscher Spannungskreis (Programm P3_2)	64
3.9	Verständnisfragen	66
3.10	Musterlösungen	68
3.10.1	Schnittspannungen bei ebenem Spannungszustand	68
3.10.2	Schnittreaktionen in einem Balkenquerschnitt	71

4	Linear-elastisches Werkstoffverhalten	75
4.1	Hookesches Gesetz für den einachsigen Spannungszustand	76
4.1.1	Elastizitätsmodul	77
4.1.2	Querkontraktionszahl	79
4.1.3	Schubmodul	81
4.1.4	Zusammenhang zwischen den elastizitätstheoretischen Konstanten	82
4.2	Hookesches Gesetz für den allgemeinen Spannungszustand	82
4.3	Hookesches Gesetz für den ebenen Spannungszustand	84
4.4	Dehnungsbehinderung	85
4.5	Wärmedehnungen und Wärmespannungen	87
4.6	Zusammenfassung	90
4.7	Rechnerprogramme	92
4.7.1	Hookesches Gesetz für allgemeinen Spannungszustand (Programm P4_1)	92
4.7.2	Auswertung einer DMS-Rosette (II) (Programm P4_2)	93
4.8	Verständnisfragen	94
4.9	Musterlösungen	97
4.9.1	Hookesches Gesetz für zweiachsigen Spannungszustand	97
4.9.2	Querdehnungsbehinderte Scheibe	99
5	Grundbelastungsfälle	101
5.1	Zug	103
5.1.1	Spannungen	103
5.1.2	Verformungen	104
5.2	Druck	105
5.3	Gerade Biegung	106
5.3.1	Verformungen	106
5.3.2	Spannungen	108
5.4	Torsion gerader Stäbe mit Kreisquerschnitt	113
5.4.1	Verformungen	113
5.4.2	Spannungen	114
5.4.3	Mohrscher Spannungskreis	117
5.4.4	Verdrehwinkel	117
5.5	Scherung	119
5.6	Zusammenfassung	122
5.7	Verständnisfragen	122
5.8	Musterlösungen	126
5.8.1	Biegung eines Hochsprungstabs	126
5.8.2	Torsionsbeanspruchung einer Schweißkonstruktion	129

6	Werkstoffkennwerte bei zügiger Belastung	133
6.1	Zugversuch	135
6.1.1	Grundlagen	135
6.1.2	Zähes Werkstoffverhalten	137
6.1.3	Sprödes Werkstoffverhalten	145
6.1.4	Beispiele für das Werkstoffverhalten im Zugversuch	146
6.2	Druckversuch	148
6.2.1	Zähes Werkstoffverhalten	149
6.2.2	Sprödes Werkstoffverhalten	150
6.3	Biegeversuch	151
6.4	Torsionsversuch	156
6.4.1	Kennwerte	156
6.4.2	Versagensverhalten im Torsions- und Zugversuch	157
6.5	Scherversuch	160
6.6	Zusammenfassung	160
6.7	Rechnerprogramme	162
6.7.1	Zugversuch (DIN 50 125) (Programm P6_1)	162
6.7.2	Feindehnungsmessung beim Zugversuch (Programm P6_2)	163
6.8	Verständnisfragen	164
6.9	Musterlösungen	167
6.9.1	Zugversuch an einer Al-Legierung	167
7	Festigkeitshypothesen	171
7.1	Problemstellung und Lösungsweg	172
7.2	Normalspannungshypothese	174
7.3	Schubspannungshypothese	178
7.4	Gestaltänderungsenergiehypothese	183
7.4.1	Fließbedingung	183
7.4.2	Praktische Anwendung der GH	184
7.5	Vergleich von SH und GH	187
7.6	Anpassung der Festigkeitshypothesen	188
7.7	Vergleichsdehnung	190
7.8	Erweiterte Schubspannungshypothese (Mohrsche Hypothese)	192
7.9	Hencky-Diagramm	196
7.10	Zusammenfassung	199
7.11	Rechnerprogramme	201
7.11.1	Festigkeitshypothesen (Programm P7_1)	201
7.11.2	Auswertung einer DMS-Rosette (III) (Programm P7_2)	202
7.12	Verständnisfragen	204

7.13	Musterlösungen	206
7.13.1	Sicherheitsnachweis für mehrachsig beanspruchte Bauteile aus Feinkornbaustahl und Grauguß	206
8	Kerbwirkung	213
8.1	Definition von Kerben	214
8.2	Phänomenologische Aspekte von Kerben	216
8.3	Formzahl	218
8.3.1	Definition	218
8.3.2	Ermittlung	221
8.3.3	Formzahldiagramme	224
8.4	Zusammenfassung	224
8.5	Rechnerprogramme	225
8.5.1	Formzahlen (Programm P8_1)	225
8.6	Verständnisfragen	226
8.7	Musterlösungen	228
8.7.1	Spannungsverläufe im gekerbten Flachstab	228
9	Überelastische Beanspruchung	233
9.1	Werkstofffließkurve	234
9.2	Bauteilfließkurve	239
9.2.1	Glatte Biegestab	241
9.2.2	Glatte Torsionsstab mit Kreisquerschnitt	246
9.2.3	Zugbeanspruchter Kerbstab	247
9.3	Vollplastische Grenzbelastung (Kollaps)	257
9.3.1	Phänomenologie	257
9.3.2	Berechnung der Kollapslast	258
9.3.3	Experimentelle Bestimmung	267
9.4	Eigenspannungen	269
9.4.1	Definition	269
9.4.2	Voraussetzungen für die Entstehung	271
9.4.3	Einfache Beispiele	271
9.4.4	Bestimmung von Eigenspannungen	278
9.4.5	Auswirkung von Eigenspannungen bei statischer Beanspruchung	282
9.4.6	Abminderung von Eigenspannungen	285
9.5	Zusammenfassung	288
9.6	Rechnerprogramme	289
9.6.1	Fließkurven glatter Biegeträger	289

9.6.2	Fließkurve gekerbter Bauteile	290
9.7	Verständnisfragen	291
9.8	Musterlösungen	293
9.8.1	Überelastisch zugbeanspruchtes Doppelkammerrohr	293
10 Sicherheitsnachweis bei statischer Beanspruchung		299
10.1	Spannungskategorien	300
10.2	Sprödes Bauteilverhalten	301
10.3	Zähes Bauteilverhalten	303
10.3.1	Fließbeginn	304
10.3.2	Begrenzte plastische Verformung	305
10.3.3	Zähbruch	307
10.4	Sicherheitsbeiwerte	308
10.5	Bedeutung der Zähigkeit	310
10.5.1	Metallkundliche Modelle des Spröd- und Zähbruchversagens	311
10.5.2	Definition der Zähigkeit	313
10.5.3	Sicherheitsrelevanz der Zähigkeit	313
10.5.4	Einflußgrößen auf die Bauteilzähigkeit	315
10.5.5	Experimentelle Ermittlung der Zähigkeitskennwerte	316
10.6	Zusammenfassung	322
10.7	Verständnisfragen	323
10.8	Musterlösungen	325
10.8.1	Auslegung einer Sollbruchstelle	325
11 Grundlagen der Schwingfestigkeit		329
11.1	Einteilung der Berechnungsverfahren	330
11.2	Versagen bei Schwingbeanspruchung	332
11.2.1	Dauerschwingbruch	332
11.2.2	Versagensmodell	334
11.3	Begriffsdefinitionen	336
11.4	Wöhlerlinie	339
11.4.1	Experimentelle Bestimmung	339
11.4.2	Mathematische Beschreibung der Wöhlerlinie	343
11.4.3	Statistische Auswertung	347
11.5	Dauerfestigkeitskennwerte für reine Wechsel- und Schwellbeanspruchung	351
11.5.1	Wechselfestigkeit	352
11.5.2	Schwellfestigkeit	354

11.6	Mittelspannungseinfluß (Dauerfestigkeitsschaubild)	354
11.6.1	Dauerfestigkeitsschaubild nach Haigh	355
11.6.2	Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith	361
11.7	Weitere Einflüsse auf die Schwingfestigkeit	363
11.7.1	Oberflächeneinfluß	364
11.7.2	Größeneinfluß	366
11.7.3	Umgebungseinflüsse	370
11.7.4	Weitere schwingfestigkeitsmindernde Einflüsse	372
11.7.5	Verfahren zur Steigerung der Schwingfestigkeit	374
11.8	Kerbwirkung bei schwingender Beanspruchung	376
11.8.1	Kerbwirkungszahl	376
11.8.2	Berechnungsverfahren	379
11.8.3	Kerbspannungen	387
11.9	Synthetische Bauteilwöhlerlinie	388
11.9.1	Dauerfestigkeit	389
11.9.2	Zeitfestigkeit	391
11.9.3	Sicherheitsnachweis	393
11.10	Berechnungsverfahren für synchrone Belastung	396
11.10.1	Belastung durch eine Komponente	396
11.10.2	Problematik bei Belastung durch mehrere Komponenten	400
11.10.3	Zug und Biegung	402
11.10.4	Rein wechselnde Biegung und Torsion	405
11.10.5	Mittelspannungsbehaftete Biegung und Torsion	408
11.10.6	Allgemeine zweiachsige synchrone Schwingbelastung	414
11.10.7	Anstrengungsverhältnis	420
11.11	Zusammenfassung	425
11.12	Rechnerprogramme	426
11.12.1	Statistische Auswertung von Schwingversuchen als Wöhlerlinie (Programm P11_1)	426
11.12.2	Dauerfestigkeitsschaubild (Programm P11_2)	428
11.12.3	Kerbwirkungszahl (Programm P11_3)	429
11.12.4	Synthetische Wöhlerlinie (Programm P11_4)	430
11.12.5	Sicherheit bei schwingender Beanspruchung mit einer Komponente (Programm P11_5)	431
11.12.6	Sicherheit bei schwingender Beanspruchung mit maximal drei Komponenten (Programm P11_6)	432
11.13	Verständnisfragen	433
11.14	Musterlösung	436
11.14.1	Schwingfestigkeit von Wellen	436