
Sebastian Götz · Klaus-Georg Eulitz

Betriebsfestigkeit

Bauteile sicher auslegen!

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis wichtiger Formelzeichen	vii
Abkürzungsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung der Betriebsfestigkeit	1
1.2 Historische Entwicklung	4
1.3 Ziele und Aufbau des Buches	5
1.4 FKM-Richtlinien	8
2 Schwingfestigkeit	11
2.1 Phänomen der Materialermüdung bei Metallen	11
2.1.1 Phasen der Materialermüdung	11
2.1.2 Charakteristik des Ermüdungsbruchs	12
2.2 Grundlegende Begriffsdefinitionen	14
2.2.1 Belastung, Beanspruchung und Beanspruchbarkeit	14
2.2.2 Kenngrößen eines Schwingspiels	16
2.2.3 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve	18
2.3 Beanspruchbarkeit bei konstanter Amplitude	20
2.3.1 Wöhlerlinie, Zeit- und Dauerfestigkeit	20
2.3.2 Mittelspannungseinfluss und Dauerfestigkeitsschaubilder	24
2.3.2.1 Smith-Diagramm	25
2.3.2.2 Haigh-Diagramm	25
2.3.2.3 Mittelspannungsempfindlichkeit	27
2.3.2.4 Modifiziertes Haigh-Diagramm nach FKM-Richtlinie	29
2.3.3 Streuung der Schwingfestigkeit	31
2.4 Grundgedanke der linearen Schadensakkumulation	32
2.5 Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 2	35
3 Einflüsse auf die Schwingfestigkeit und deren Abschätzung	37
3.1 Werkstoff	37
3.2 Größeneinfluss	39
3.3 Kerben	42
3.3.1 Kerb- und Stützwirkung	42

3.3.2	Stützzahl	45
3.4	Oberflächenrauigkeit	50
3.5	Eigenspannungen	54
3.6	Oberflächenverfestigung	57
3.7	Umgebungsmedien und Korrosion	60
3.8	Frequenzeinfluss	60
3.9	Temperatur	61
3.10	Bauteilwechselfestigkeit und Konstruktionsfaktor nach FKM-Richtlinie	63
3.11	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 3	65
4	Statistische Grundlagen	67
4.1	Einleitung und Grundbegriffe	67
4.2	Beschreibung von Stichproben	68
4.3	Statistische Verteilungsfunktionen	71
4.3.1	Normalverteilung	72
4.3.1.1	Dichte- und Verteilungsfunktion	72
4.3.1.2	Standardisierte Normalverteilung	73
4.3.1.3	Log-Normalverteilung	75
4.3.2	Weitere Verteilungen für stetige Zufallsgrößen	77
4.3.3	Binomialverteilung	79
4.4	Lineare Regressionsrechnung	80
4.5	Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz	82
4.6	Vertrauensbereich	86
4.6.1	Vertrauensbereich des Mittelwertes	87
4.6.2	Vertrauensbereich der Standardabweichung	88
4.6.3	Vertrauensbereich für Regressionsgeraden	89
4.7	Sicherheitszahl für Ausfall- und Vertrauenswahrscheinlichkeit	90
4.7.1	Sichere Festigkeitskennwerte und nicht streuende Beanspruchung	91
4.7.2	Geschätzte Festigkeitskennwerte und nicht streuende Beanspruchung	91
4.7.3	Streuung von Festigkeit und Beanspruchung	92
4.8	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 4	93
5	Lastannahme	95
5.1	Beanspruchungs-Zeit-Verlauf	97
5.2	Klassier- und Zählverfahren	98
5.2.1	Einparametrische Zählverfahren	100
5.2.1.1	Spitzenwertzählung	100
5.2.1.2	Klassengrenzenüberschreitungs-zählung	102
5.2.1.3	Momentanwertzählung	103

5.2.1.4	Verweildauerzählung	103
5.2.1.5	Bereichspaarzählung	105
5.2.2	Rainflow-Zählung als zweiparametrisches Verfahren	105
5.2.3	Fazit zu den Zählverfahren	109
5.3	Bemessungskollektive	110
5.3.1	Ersatzamplitudenkollektiv	110
5.3.2	Kenngrößen und Darstellung von Amplitudenkollektiven	112
5.3.3	Extrapolation von gemessenen Kollektiven	115
5.3.4	Sonderereignisse	117
5.3.5	Ermittlung von Gesamtkollektiven	118
5.4	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 5	120
6	Bauteilbeanspruchung	123
6.1	Beanspruchungsgrößen spannungsbasierter Festigkeitskonzepte	123
6.2	Spannungszustand	124
6.2.1	Spannungsvektor und Spannungstensor	125
6.2.2	Festigkeitshypthesen und Vergleichsspannungen	130
6.2.3	Beanspruchung an Kerben	135
6.3	FEM zur Spannungsermittlung	137
6.4	Beanspruchungsermittlung an geschweißten Bauteilen	143
6.4.1	Nennspannungen	143
6.4.2	Strukturspannungen	144
6.4.3	Kerbspannungen	148
6.5	Verständnisfragen zu Kapitel 6	151
7	Rechnerischer Statischer Festigkeitsnachweis	153
7.1	Aufbau und Nachweisführung	153
7.2	Bauteilfestigkeit und Einflussgrößen	154
7.3	Plastische Stützwirkung	157
7.4	Geschweißte Bauteile	167
7.5	Sicherheitsfaktoren	169
7.6	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 7	172
8	Rechnerischer Dauerfestigkeitsnachweis	175
8.1	Abgrenzung zum Zeit- und Betriebsfestigkeitsnachweis	175
8.2	Proportionale und nichtproportionale Beanspruchungen	176
8.3	Nachweisführung bei einachsiger und proportionaler Beanspruchung	179
8.3.1	Experimentell ermittelte Bauteildauerfestigkeit	179
8.3.2	Abgeschätzte Bauteildauerfestigkeit	180

8.4	Stützwirkungskonzepte	185
8.4.1	Konzepte basierend auf dem Spannungsgradienten	185
8.4.2	Konzept des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens	188
8.4.3	Statistischer Größeneinfluss nach Fehlstellenmodell	190
8.4.4	Theory of Critical Distances	192
8.4.5	Werkstoffmechanische Stützzahl in der FKM-Richtlinie	194
8.4.6	Fazit zu Stützzahlkonzepten	198
8.5	Mittelspannungsbewertung und Überlastungsfälle	199
8.6	Geschweißte Bauteile und IIW-Empfehlungen	202
8.6.1	Wöhlerlinien und FAT-Klassen	202
8.6.2	Nennspannungskonzept	205
8.6.3	Strukturspannungskonzept	207
8.6.4	Kerbspannungskonzept	207
8.6.5	Berechnung nach FKM-Richtlinie	209
8.7	Behandlung nichtproportionaler mehrachsiger Beanspruchungen	211
8.7.1	Methode der kritischen Schnittebene	212
8.7.2	Schubspannungsintensitätshypothese	216
8.8	Sicherheitsfaktoren	218
8.9	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 8	221
9	Rechnerischer Betriebsfestigkeitsnachweis	225
9.1	Bauteilwöhlerlinie	225
9.2	Schadensakkumulation und Lebensdauerlinie	229
9.3	Modifikationen der Miner-Regel	233
9.3.1	Elementare Miner-Regel	234
9.3.2	Modifizierte Miner-Regel	235
9.3.3	Konsequente Miner-Regel	237
9.3.4	Modifikation nach Liu und Zenner	240
9.3.5	Berechnete Lebensdauerlinien	242
9.4	Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung	244
9.5	Relative Miner-Regel	249
9.6	Umsetzung in der FKM-Richtlinie, Betriebsfestigkeitsfaktor	250
9.7	Nachweisart und Konstruktionsprinzipien	257
9.7.1	Art des Nachweises	257
9.7.2	Werkstoffauswahl	258
9.7.3	Konstruktionsprinzipien	259
9.7.3.1	Schwingbruchsichere Konstruktion	259
9.7.3.2	Schadenstolerante Konstruktion	260
9.8	Aufgaben und Verständnisfragen zu Kapitel 9	262

10 Experimenteller Festigkeitsnachweis	267
10.1 Ermittlung der Zeitfestigkeit	268
10.1.1 Wöhlerversuche	268
10.1.2 Horizontmethode	268
10.1.3 Perlenschnurmethode	274
10.2 Ermittlung der Dauer- und Langzeitfestigkeit	280
10.2.1 Treppenstufenverfahren mit Auswertung nach Hück	282
10.2.2 Probit-Methode	290
10.2.3 Einschätzung und weitere Verfahren	295
10.2.4 Abschätzung aus der Zeitfestigkeit	296
10.3 Betriebslastennachfahrversuche	296
10.4 Aufgaben und Verständnisfragen zu Kapitel 10	301
Anhang	305
11 Bruchmechanische Grundlagen	305
11.1 Spannungen an der Rissspitze	305
11.2 Stabiles Risswachstum bei zyklischer Beanspruchung	308
11.3 Verhalten kurzer Risse	311
12 Grundzüge des elastisch-plastischen Kerbgrundkonzepts	315
12.1 Einleitung und Aufbau	315
12.2 Kerbgrundbeanspruchung	316
12.3 Schädigungsbewertung und Lebensdauerabschätzung	319
12.4 Berücksichtigung weiterer Bauteileinflüsse	323
12.5 Abschätzung der zyklischen Materialparameter	325
12.6 FKM-Richtlinie (nichtlinear)	325
13 Erfahrungswerte zur Streuung der Schwingfestigkeit	329
14 Ergebnisse der Aufgaben	331
Literaturverzeichnis	337
Stichwortverzeichnis	359