

Inhaltsverzeichnis

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
 Teil I: Grundlagen		 11
2	Schwingfestigkeit	13
2.1	Phänomen der Materialermüdung bei Metallen	13
2.1.1	Phasen der Materialermüdung	13
2.1.2	Charakteristik des Ermüdungsbruchs	14
2.2	Grundlegende Begriffsdefinitionen	16
2.2.1	Belastung, Beanspruchung und Beanspruchbarkeit	16
2.2.2	Kenngrößen eines Schwingspiels	18
2.2.3	Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve	20
2.3	Beanspruchbarkeit bei konstanter Amplitude	22
2.3.1	Wöhlerlinie, Zeit- und Dauerfestigkeit	22
2.3.2	Mittelspannungseinfluss und Dauerfestigkeitsschaubilder	26
2.3.2.1	Smith-Diagramm	27
2.3.2.2	Haigh-Diagramm	27
2.3.2.3	Mittelspannungsempfindlichkeit	29
2.3.2.4	Modifiziertes Haigh-Diagramm nach FKM-Richtlinie	31
2.3.3	Streuung der Schwingfestigkeit	33
2.4	Grundgedanke der linearen Schadensakkumulation	34
2.5	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 2	37
3	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit und deren Abschätzung	39
3.1	Werkstoff	39
3.2	Größeneinfluss	41
3.3	Kerben	44

3.3.1	Kerb- und Stützwirkung	44
3.3.2	Stützzahl	47
3.4	Oberflächenrauigkeit	52
3.5	Eigenspannungen	56
3.6	Oberflächenverfestigung	59
3.7	Umgebungsmedien und Korrosion	62
3.8	Frequenzeinfluss	62
3.9	Temperatur	63
3.10	Bauteilwechselfestigkeit und Konstruktionsfaktor nach FKM-Richtlinie	65
3.11	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 3	66
4	Statistische Grundlagen	69
4.1	Einleitung und Grundbegriffe	69
4.2	Beschreibung von Stichproben	70
4.3	Statistische Verteilungsfunktionen	73
4.3.1	Normalverteilung	74
4.3.1.1	Dichte- und Verteilungsfunktion	74
4.3.1.2	Standardisierte Normalverteilung	75
4.3.1.3	Log-Normalverteilung	77
4.3.2	Weitere Verteilungen für stetige Zufallsgrößen	79
4.3.3	Binomialverteilung	81
4.4	Lineare Regressionsrechnung	82
4.5	Auswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz	84
4.6	Vertrauensbereich	88
4.6.1	Vertrauensbereich des Mittelwertes	89
4.6.2	Vertrauensbereich der Standardabweichung	90
4.6.3	Vertrauensbereich für Regressionsgeraden	91
4.7	Sicherheitszahl für Ausfall- und Vertrauenswahrscheinlichkeit	92
4.7.1	Sichere Festigkeitskennwerte und nicht streuende Beanspruchung . .	93
4.7.2	Geschätzte Festigkeitskennwerte und nicht streuende Beanspruchung	93
4.7.3	Streuung von Festigkeit und Beanspruchung	94
4.8	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 4	95
5	Lastannahme	97
5.1	Beanspruchungs-Zeit-Verlauf	99
5.2	Klassier- und Zählverfahren	100
5.2.1	Einparametrische Zählverfahren	102
5.2.1.1	Spitzenwertzählung	102
5.2.1.2	Klassengrenzenüberschreitungszählung	104

5.2.1.3	Momentanwertzählung	105
5.2.1.4	Verweildauerzählung	105
5.2.1.5	Bereichspaarzählung	107
5.2.2	Rainflow-Zählung als zweiparametrisches Verfahren	107
5.2.3	Fazit zu den Zählverfahren	111
5.3	Bemessungskollektive	112
5.3.1	Ersatzamplitudenkollektiv	112
5.3.2	Kenngrößen und Darstellung von Amplitudenkollektiven	114
5.3.3	Extrapolation von gemessenen Kollektiven	117
5.3.4	Sonderereignisse	119
5.3.5	Ermittlung von Gesamtkollektiven	120
5.4	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 5	122
6	Bauteilbeanspruchung	125
6.1	Beanspruchungsgrößen spannungsbasierter Festigkeitskonzepte	125
6.2	Spannungszustand	126
6.2.1	Spannungsvektor und Spannungstensor	127
6.2.2	Festigkeitshypothesen und Vergleichsspannungen	132
6.2.3	Beanspruchung an Kerben	137
6.3	FEM zur Spannungsermittlung	139
6.4	Beanspruchungsermittlung an geschweißten Bauteilen	145
6.4.1	Nennspannungen	145
6.4.2	Strukturspannungen	146
6.4.3	Kerbspannungen	150
6.5	Verständnisfragen zu Kapitel 6	153
Teil II: Festigkeitsnachweise		155
7	Rechnerischer Statischer Festigkeitsnachweis	157
7.1	Aufbau und Nachweisführung	157
7.2	Bauteilfestigkeit und Einflussgrößen	158
7.3	Plastische Stützwirkung	161
7.4	Geschweißte Bauteile	171
7.5	Sicherheitsfaktoren	173
7.6	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 7	176
8	Rechnerischer Dauerfestigkeitsnachweis	179
8.1	Abgrenzung zum Zeit- und Betriebsfestigkeitsnachweis	179
8.2	Proportionale und nichtproportionale Beanspruchungen	180

8.3	Nachweisführung bei proportionaler Beanspruchung	183
8.3.1	Experimentell ermittelte Bauteildauerfestigkeit	183
8.3.2	Abgeschätzte Bauteildauerfestigkeit	184
8.4	Stützwirkungskonzepte	189
8.4.1	Konzepte basierend auf dem Spannungsgradienten	189
8.4.2	Konzept des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens	192
8.4.3	Statistischer Größeneinfluss nach Fehlstellenmodell	194
8.4.4	Theory of Critical Distances	196
8.4.5	Werkstoffmechanische Stützzahl in der FKM-Richtlinie	198
8.4.6	Fazit zu Stützzahlkonzepten	202
8.5	Mittelspannungsbewertung und Überlastungsfälle	203
8.6	Geschweißte Bauteile und IIW-Empfehlungen	206
8.6.1	Wöhlerlinien und FAT-Klassen	206
8.6.2	Nennspannungskonzept	209
8.6.3	Strukturspannungskonzept	211
8.6.4	Kerbspannungskonzept	211
8.6.5	Berechnung nach FKM-Richtlinie	213
8.7	Behandlung nichtproportionaler mehrachsiger Beanspruchungen	215
8.7.1	Methode der kritischen Schnittebene	216
8.7.2	Schubspannungsintensitätshypothese	220
8.8	Sicherheitsfaktoren	222
8.9	Verständnisfragen und Aufgaben zu Kapitel 8	225
9	Rechnerischer Betriebsfestigkeitsnachweis	229
9.1	Bauteilwöhlerlinie	229
9.2	Schadensakkumulation und Gaßnerlinie	233
9.3	Modifikationen der Miner-Regel	237
9.3.1	Elementare Miner-Regel	238
9.3.2	Modifizierte Miner-Regel	239
9.3.3	Konsequente Miner-Regel	241
9.3.4	Modifikation nach Liu und Zenner	244
9.3.5	Berechnete Gaßnerlinien	246
9.4	Treffsicherheit der Lebensdauerabschätzung	248
9.5	Relative Miner-Regel	253
9.6	Umsetzung in der FKM-Richtlinie, Betriebsfestigkeitsfaktor	254
9.7	Nachweisart und Konstruktionsprinzipien	261
9.7.1	Art des Nachweises	261
9.7.2	Werkstoffauswahl	262
9.7.3	Konstruktionsprinzipien	263

9.7.3.1	Schwingbruchsichere Konstruktion	263
9.7.3.2	Schadenstolerante Konstruktion	264
9.8	Aufgaben und Verständnisfragen zu Kapitel 9	266
10	Experimenteller Festigkeitsnachweis	271
10.1	Ermittlung der Zeitfestigkeit	272
10.1.1	Wöhlerversuche	272
10.1.2	Horizontmethode	272
10.1.3	Perlenschnurmethode	278
10.1.4	Abschließende Hinweise zur Ermittlung der Zeitfestigkeit	283
10.2	Ermittlung der Dauer- und Langzeitfestigkeit	284
10.2.1	Treppenstufenverfahren mit Auswertung nach Hück	286
10.2.2	Probit-Methode	294
10.2.3	Einschätzung und weitere Verfahren	299
10.2.4	Abschätzung aus der Zeitfestigkeit	299
10.3	Betriebslastennachfahrversuche	300
10.4	Aufgaben und Verständnisfragen zu Kapitel 10	304
Anhang		307
11	Bruchmechanische Grundlagen	309
11.1	Spannungen an der Rissspitze	309
11.2	Stabiles Risswachstum bei zyklischer Beanspruchung	312
11.3	Verhalten kurzer Risse	315
12	Grundzüge des elastisch-plastischen Kerbgrundkonzepts	319
12.1	Einleitung und Aufbau	319
12.2	Kerbgrundbeanspruchung	320
12.3	Schädigungsbewertung und Lebensdauerabschätzung	323
12.4	Berücksichtigung weiterer Bauteileinflüsse	327
12.5	Abschätzung der zyklischen Materialparameter	329
12.6	FKM-Richtlinie (nichtlinear)	329
13	Erfahrungswerte zur Streuung der Schwingfestigkeit	333
14	Ergebnisse der Aufgaben	335
	Literaturverzeichnis	341
	Stichwortverzeichnis	363