

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehen	3
1.3	Abgrenzung	3
1.4	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen der Werkstoffermüdung	7
2.1	Schwingbeanspruchung	7
2.2	Ermüdungsfestigkeit	8
2.3	Der Kerbfall	11
2.4	Auswertung von Wöhlerversuchen	12
2.4.1	Streuung der Wöhlerlinie	12
2.4.2	Auswertung von Spannungsschwingbreiten und Lastspielzahlen	14
2.4.3	Vertrauenswahrscheinlichkeit	20
2.4.4	Rechnerisches Beispiel für eine Horizontenauswertung	23
2.4.5	Mindestanzahl von Proben	27
2.4.6	Wöhlerlinien-Auswertung	28
2.4.7	Normierte Versuchsauswertung	31
2.5	Variable Schwingbeanspruchung	32
2.6	Betriebsfestigkeitsversuche	33
2.7	Phasen der Werkstoffermüdung	35
2.8	Nachweisführung gegen Ermüdung	36
2.8.1	Nachweis der Schwingfestigkeit	37
2.8.2	Nachweis der Betriebsfestigkeit	38
2.8.3	Nachweiskonzepte	40
2.8.4	Normativer Ermüdungsnachweis	46
2.9	Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit	49
2.9.1	Einfluss der statischen Festigkeit	49
2.9.2	Mittelspannungseinfluss	50
2.9.3	Eigenspannungseinfluss	56

2.9.4	Größeneinfluss	56
2.9.5	Einfluss korrosiver Umweltbedingungen	58
2.10	Beanspruchungsermittlung	58
2.10.1	Zählverfahren	58
2.10.2	Mittelspannungsschwankungen und Unregelmäßigkeit	62
2.10.3	Amplitudentransformation	63
3	Grundlagen der Lebensdauervorhersage anhand der Schadensakkumulation	67
3.1	Wöhlerlinie und Lebensdauerlinie	68
3.2	Teilschaden	69
3.3	Schadensakkumulation und Lebensdauervorhersage	69
3.4	Schädigungsabhängige Dauerfestigkeitsgrenze	70
3.5	Reihenfolgeeinfluss	71
3.6	Bezugs-Wöhlerlinie	72
3.7	Tatsächliche Schadenssumme	72
3.8	Stand der Forschung zu den Schadensakkumulations-Hypothesen	77
3.9	Berechnungsformen der Miner-Regel	93
3.10	Originale Form	94
3.11	Elementare Form	95
3.12	Konsequente Form	95
3.12.1	Schädigungsabhängige Abminderung der Dauerfestigkeitsgrenze	96
3.12.2	Erläuterung der Haibach'schen konsequenten Form am Beispiel eines zweistufigen Kollektivs	97
3.12.3	Vorgehensweise bei der konsequenten Form nach Haibach	101
3.12.4	Vorgehensweise bei der konsequenten Form nach Gnilke	102
3.13	Modifizierte Form nach Haibach	102
3.14	Modifizierte Form nach Liu/Zenner	103
3.15	Lebensdauerlinien am Beispiel einer geradlinigen Kollektivform	105
3.15.1	Ermittlung der Lebensdauerlinien durch stufenweise Schädigungsberechnung	105
3.15.2	Formelmäßige Beschreibung der Lebensdauerlinien	109
3.16	Kollektivbeschreibende Parameter	117
3.16.1	Formparameter λ	117
3.16.2	Völligkeitsmaß v	117
3.17	Formelmäßige Beschreibung der Schadenssumme für beliebige Kollektivformen	120
3.17.1	Funktion der Schadenssumme nach Miner-elementar	122
3.17.2	Funktion der Schadenssumme nach Miner-original	123
3.17.3	Funktion der Schadenssumme nach Miner-modifiziert	124

3.17.4	Einfluss der Dauerfestigkeit auf die Schadenssumme und die Lebensdauer für beliebige Kollektivformparameter λ	125
3.18	Treffsicherheit der Miner-Regel	128
3.19	Zusammenfassende Ergebnisse aus früheren Auswertungen der Lebensdauer für Schweißverbindungen aus Stahl	129
3.20	Lebensdauerkorrekturverfahren	130
3.20.1	Relative Miner-Regel	130
3.20.2	Relative Miner-Regel nach der IIW-Richtlinie	132
3.20.3	Verfahren nach Wirthgen und Mogwitz	133
3.20.4	Korrigieren der Lebensdauer nach der 5. FKM-Richtlinie	134
3.20.5	q_0 -Verfahren zur Lebensdauerkorrektur	137
3.20.6	KF-Methode	140
3.20.7	IMAB-Methode	141
3.20.8	Korrigieren der Lebensdauer nach der 6. FKM-Richtlinie	142
3.20.9	Gegenüberstellung der vorhandenen Lebensdauerkorrekturverfahren am Beispiel von Schweißverbindungen aus Stahl	145
4	Überprüfung der Treffsicherheit der Lebensdauervorhersage anhand von Datensammlungen	149
4.1	Vorhandene Datensammlungen von stählernen Schweißverbindungen	151
4.2	Kurzbeschreibung der auszuwertenden Datensammlungen	152
4.2.1	Beschreibung der Datensammlung DABEF	152
4.2.2	Beschreibung der Datensammlung DABSV	157
4.3	Aufbereitung und Auswertung von DABEF	159
4.3.1	Klassifizierung von Werkstoffen	159
4.3.2	Statistische Auswertung der Wöhlerversuche	159
4.3.3	Aufbereitung der Beanspruchungskollektive	161
4.3.4	Statistische Auswertung der Betriebsfestigkeitsversuche	167
4.3.5	Lebensdauerberechnung	168
4.3.6	Berechnung der tatsächlichen Schadenssummen	169
4.3.7	Exemplarische Berechnung für Datensätze aus DABEF	170
4.3.8	Statistische Auswertung der tatsächlichen Schadenssummen aus DABEF	179
4.3.9	Diskussion der Einflussgrößen auf die tatsächlichen Schadenssummen aus DABEF	180
4.4	Aufbereitung und Auswertung von DABSV	183
4.4.1	Werkstoffe und Probenformen	183
4.4.2	Statistische Auswertung der Wöhlerversuche	183
4.4.3	Aufbereitung der Beanspruchungskollektive	184

4.4.4	Statistische Auswertung der Betriebsfestigkeitsversuche	190
4.4.5	Rechnerische Lebensdauerwerte und tatsächliche Schadenssummen	190
4.4.6	Exemplarische Berechnung für einen Datensatz aus DABSV	194
4.4.7	Statistische Auswertung der tatsächlichen Schadenssummen aus DABSV	198
4.4.8	Diskussion der Einflussgrößen auf die tatsächlichen Schadenssum- men aus DABSV	203
4.5	Auswertung der tatsächlichen Schadenssummen aus DABEF und DABSV	213
4.6	Schlussfolgerungen aus der Nachrechnung von Datensammlungen	214
5	Probabilistische Schadensakkumulation in der Bemessung	217
5.1	Zuverlässigkeitstheoretische Grundlagen	218
5.1.1	Das Sicherheitskonzept	218
5.1.2	Lineare Grenzzustandsgleichung mit normalverteilten Zufallsvariablen	222
5.1.3	Monte-Carlo-Simulation	223
5.2	Allgemeine Formulierung der Grenzzustandsgleichung für den Betriebsfes- tigkeitsnachweis mit der Schadensakkumulations-Hypothese	224
5.3	Probabilistische Schadensakkumulation nach Miner-elementar	224
5.3.1	Grenzzustandsgleichung für Miner-elementar	224
5.3.2	Berechnungen und Ergebnisse	226
5.3.3	Bemessungshilfe anhand von γ_{Mf}	229
5.4	Probabilistische Schadensakkumulation nach Miner-original	231
5.4.1	Grenzzustandsgleichung für Miner-original	231
5.4.2	Berechnungen und Ergebnisse	232
5.4.3	Einflussparameter auf die Teilsicherheitsbeiwerte nach Miner-original	235
5.4.4	Gegenüberstellung der probabilistischen Berechnungen nach Miner- elementar und Miner-original	242
5.5	Probabilistische Schadensakkumulation nach Miner-modifiziert	248
5.5.1	Grenzzustandsgleichung für Miner-modifiziert	248
5.5.2	Berechnungen und Ergebnisse	248
5.6	Zusammenfassung und Diskussion der probabilistischen Untersuchung	254
6	Zusammenfassung und Ausblick	265
6.1	Zusammenfassung	265
6.2	Ausblick	267
A	Zur Berechnung der Fraktilwerte bei ausgewählten Vertrauenswahrschein- lichkeiten	269
B	Datensammlung: DABEF - Auswertergebnisse	271

B.1	Rechnerische und experimentelle Lebensdauerwerte	272
B.2	Verteilung der tatsächlichen Schadenssummen	276
B.3	Auswertung der tatsächlichen Schadenssummen nach Auswahlkriterien . .	280
B.3.1	Auswahlkriterium: Stumpfnah	283
B.3.2	Auswahlkriterium: Kreuzstoß	284
B.3.3	Auswahlkriterium: Kollektivhöchstwert $\bar{H} < 100.000$	285
B.3.4	Auswahlkriterium: Kollektivhöchstwert $\bar{H} \geq 100.000$	286
B.3.5	Auswahlkriterium: Spannungsverhältnis $R = 0$	287
B.3.6	Auswahlkriterium: Spannungsverhältnis $R = -1$	288
B.4	Einfluss von $\Delta\sigma_{max}/\Delta\sigma_D$ auf die tatsächlichen Schadenssummen	289
B.5	Einfluss von \bar{H} auf die tatsächlichen Schadenssummen	290
B.6	Einfluss von ν auf die tatsächlichen Schadenssummen	291
B.7	Einfluss der Hilfsgröße A_e auf die tatsächlichen Schadenssummen	292
C	Datensammlung: DABSV - Inhalt und Auswertergebnisse	293
C.1	Auszuwertende Datensätze aus DABSV	294
C.2	Rechnerische und experimentelle Lebensdauerwerte	296
C.3	Verteilung der tatsächlichen Schadenssummen	300
C.4	Auswertung der tatsächlichen Schadenssummen nach Auswahlkriterien . .	304
C.4.1	Auswahlkriterium: Stumpfnah	309
C.4.2	Auswahlkriterium: Quersteife	310
C.4.3	Auswahlkriterium: Normalverteiltes Kollektiv	311
C.4.4	Auswahlkriterium: Gesamtkollektiv mit Überbelastung	312
C.4.5	Auswahlkriterium: Blechdicke $t = 10 \text{ mm}$	313
C.4.6	Auswahlkriterium: Blechdicke $t = 30 \text{ mm}$	314
C.4.7	Auswahlkriterium: Werkstoff S355M	315
C.4.8	Auswahlkriterium: Werkstoff S690Q	316
C.4.9	Auswahlkriterium: Werkstoff S960Q	317
C.4.10	Auswahlkriterium: Spannungsverhältnis $R = 0$	318
C.4.11	Auswahlkriterium: Spannungsverhältnis $R = -1$	319
	Nomenklatur	321
	Abbildungsverzeichnis	326
	Tabellenverzeichnis	334
	Literaturverzeichnis	339