

Inhaltsverzeichnis

1	Auslegung von Bauteilen und Strukturen nach Festigkeitskriterien.....	1
1.1	Belastungen von Bauteilen und Strukturen	1
1.2	Spannungen und Spannungszustände in Bauteilen und Strukturen.....	4
1.2.1	Ebener Spannungszustand	5
1.2.2	Räumlicher Spannungszustand.....	6
1.2.3	Hauptspannungen	6
1.2.4	Ebener Spannungs- oder ebener Verzerrungszustand	8
1.3	Statischer Festigkeitsnachweis	8
1.3.1	Vergleichsspannung	8
1.3.2	Zulässige Beanspruchung	9
1.3.3	Ablauf eines Festigkeitsnachweises	9
1.3.4	Berücksichtigung der Kerbwirkung	11
1.3.5	Kerbfaktoren.....	12
1.3.6	Materialkennwerte und Sicherheitsfaktoren	14
1.4	Dauerfestigkeitsnachweis	16
1.4.1	Wirksame und zulässige Spannungen	16
1.4.2	Werkstoffkennwerte	18
1.4.3	Oberflächen- und Größenbeiwerte	19
1.4.4	Dauerfestigkeitsnachweis bei gekerbten Bauteilen	21
1.5	Betriebsfestigkeitsnachweis	21
1.6	Sonstige Nachweise.....	22
1.7	Grenzen der klassischen BauteilAuslegung.....	22
	Literatur zu Kapitel 1.....	23
2	Schäden durch Risswachstum	24
2.1	Rissentstehung und Risswachstum.....	26
2.2	Stabiles und instabiles Risswachstum	28
2.3	Schadensanalyse / Bruchflächenanalyse	29
2.4	Ermüdungsrisswachstum beim ICE-Radreifen.....	33
2.5	Risswachstum in einem Pressenkörper.....	34
2.6	Ermüdungsrisswachstum im Verschlusskörper einer Innenhochdruckumformmaschine	35
2.7	Bruch der Antriebswelle eines Oldtimers.....	36
2.8	Weitere Schadensereignisse	36
2.9	Prinzipielle Rissverläufe und Rissformen in Bauteilen und Strukturen	38
2.9.1	Rissverläufe bei grundlegenden Spannungszuständen	38
2.9.2	Rissverläufe und Rissformen in Wellen	40
2.9.3	Systematisierung der Rissarten in Bauteilen und Strukturen.....	42
2.10	Risse erkennen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren.....	46
	Literatur zu Kapitel 2.....	48

3	Grundlagen der Bruchmechanik.....	51
3.1	Risse und Rissbeanspruchungsarten	51
3.1.1	Mode I	52
3.1.2	Mode II	53
3.1.3	Mode III.....	53
3.1.4	Mixed Mode	53
3.2	Spannungsverteilungen an Rissen	53
3.2.1	Elastizitätstheoretische Lösungen für Rissprobleme	53
3.2.2	Spannungsverteilungen bei ebenen Rissproblemen.....	55
3.2.3	Spannungsverteilungen bei räumlichen Rissproblemen	59
3.3	Verschiebungsfelder in der Rissumgebung	61
3.4	Spannungsintensitätsfaktoren	62
3.4.1	Spannungsintensitätsfaktoren für die Rissmoden I, II und III	62
3.4.2	Spannungsintensitätsfaktoren für grundlegende Rissprobleme	63
3.4.3	Überlagerung von Spannungsintensitätsfaktoren, Vergleichsspannungsintensitätsfaktoren.....	73
3.5	Lokale Plastizität an der Risspitze	77
3.5.1	Abschätzung der plastischen Zone	78
3.5.2	Risslängenkorrektur.....	82
3.5.3	Bedeutung der plastischen Zone bei der Ermüdungsrissausbreitung	82
3.6	Energiefreisetzungsrate und J-Integral	82
3.6.1	Energiefreisetzungsrate	82
3.6.2	J-Integral.....	83
3.7	Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren und andere bruchmechanischer Größen	84
3.7.1	Ermittlung von Spannungsintensitätsfaktoren aus dem Spannungsfeld in der Rissumgebung	85
3.7.2	Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren aus dem Verschiebungsfeld in der Rissumgebung	86
3.7.3	Ermittlung bruchmechanischer Größen mit dem J-Integral	86
3.7.4	Ermittlung bruchmechanischer Größen mit dem Rissschließungsintegral ..	86
3.8	Konzepte zur Vorhersage des instabilen Risswachstums	89
3.8.1	K-Konzept für Mode I	89
3.8.2	K-Konzept für Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Beanspruchungen ..	90
3.8.3	Kriterium der Energiefreisetzung	94
3.8.4	J-Kriterium	95
3.9	Risszähigkeiten.....	95
3.10	Bewertung von Bauteilen mit Rissen mit bruchmechanischen Methoden.....	96
3.10.1	Ablauf eines bruchmechanischen Nachweises	96
3.10.2	Anwendungen des Bruchkriteriums und des bruchmechanischen Nachweises auf Mode I-Rissprobleme	97
3.10.3	Anwendungen des Bruchkriteriums und des bruchmechanischen Nachweises auf Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Probleme.....	99
3.11	Zusammenwirken von Festigkeitsberechnung und Bruchmechanik	100
	Literatur zu Kapitel 3	103

4	Ermüdungsrisswachstum bei zyklischer Belastung mit konstanter Amplitude	106
4.1	Zusammenhang zwischen Bauteilbelastung und zyklischer Spannungsintensität..	106
4.1.1	Spannungsfeld bei zeitlich veränderlicher Mode I-Beanspruchung	106
4.1.2	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor bei Mode I	108
4.1.3	<i>R</i> -Verhältnis.....	109
4.1.4	Rissausbreitungsvorgang.....	109
4.1.5	Spannungsfeld bei zeitlich veränderlicher Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Beanspruchung	109
4.1.6	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode II	110
4.1.7	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode III	111
4.1.8	Ebene Mixed-Mode-Beanspruchung	111
4.1.9	Räumliche Mixed-Mode-Beanspruchung	112
4.2	Zusammenhang zwischen Rissgeschwindigkeit und zyklischem Spannungsintensitätsfaktor bei Mode I	112
4.2.1	Grenzen der Ermüdungsrissausbreitung bei Mode I	113
4.2.2	Einflussfaktoren auf die Rissgeschwindigkeitskurve	114
4.2.3	Riss-schließverhalten beim Ermüdungsrisswachstum	115
4.2.4	Thresholdwert und Schwellenwertverhalten	119
4.2.5	Kurzrisswachstum	123
4.3	Rissausbreitungskonzepte bei Mode I	124
4.3.1	PARIS – Gerade	124
4.3.2	ERDOGAN/RATWANI-Gesetz	124
4.3.3	FORMAN/METTU-Gleichung	125
4.3.4	Vergleich der Rissfortschrittsgleichungen.....	126
4.3.5	Bestimmung der Restlebensdauer.....	127
4.4	Risswachstum bei Mode II-, Mode III- und Mixed-Mode-Beanspruchung	130
4.4.1	Risswachstum bei Mode II-Beanspruchung am Ausgangsriss	131
4.4.2	Risswachstum bei Mode III-Beanspruchung am Ausgangsriss.....	132
4.4.3	Risswachstum bei ebener Mixed-Mode-Beanspruchung	132
4.4.4	Risswachstum bei räumlicher Mixed-Mode-Beanspruchung	133
4.5	Vorgehensweise bei der Bewertung des Ermüdungsrisswachstums	134
4.5.1	Bruchmechanische Bewertung des Ermüdungsrisswachstums	134
4.5.2	Ermittlung der Risslänge, ab der Ermüdungsrisswachstum möglich ist....	135
4.5.3	Sicherheit gegen das Auftreten des Ermüdungsrisswachstums	137
4.5.4	Bereich des Ermüdungsrisswachstums.....	137
4.5.5	Festlegung von Inspektionsintervallen	137
4.6	Zusammenwirken von Dauerfestigkeitsberechnung und Bruchmechanik	138
	Literatur zu Kapitel 4.....	140
5	Experimentelle Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte	143
5.1	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor und Risszähigkeit	143
5.1.1	Ermittlung der Risszähigkeit nach ASTM E 399	144
5.1.2	Versuchsdurchführung bei der Risszähigkeitsbestimmung	147
5.1.3	K_{IC} oder K_Q ? – Auswertung der Versuche.....	148

5.2	Thresholdwerte und Rissgeschwindigkeitskurven	151
5.2.1	Ermittlung der Thresholdwerte und Rissgeschwindigkeitskurven nach ASTM E 647.....	151
5.2.2	Methoden der Thresholdwertbestimmung	154
5.2.3	Methoden der Risslängenmessung	157
5.2.4	Rissgeschwindigkeitsermittlung	161
5.2.5	Auswertung der Thresholdwert- und der Rissfortschrittskurvenversuche	162
5.3	Werkstoffkennwerte für das Mode I-Risswachstum	164
5.3.1	Risszähigkeitswerte	164
5.3.2	Schwellenwerte des Ermüdungsrissswachstums.....	167
5.3.3	Rissgeschwindigkeitskurven	168
5.4	Werkstoffkennwerte bei Mode II- und Mixed Mode-Beanspruchung	170
5.4.1	Mode II-Beanspruchung	170
5.4.2	Ebene Mixed-Mode-Beanspruchung	171
5.4.3	Räumliche Mixed-Mode-Beanspruchung	173
	Literatur zu Kapitel 5	174
6	Ermüdungsrissswachstum bei Betriebsbelastung	177
6.1	Lastspektren und -kollektive	177
6.1.1	Bestimmung von Betriebsbelastungen.....	177
6.1.2	Klassier- und Zählverfahren	178
6.1.3	Standardlastspektren	179
6.2	Reihenfolgeeffekte und ihre Wirkung	180
6.2.1	Überlasten	181
6.2.2	Unterlasten	185
6.2.3	Kombinationen aus Über- und Unterlasten	186
6.2.4	Überlastsequenzen	186
6.2.5	Blocklasten	188
6.2.6	Betriebsbelastungen	190
6.3	Rissfortschrittskonzepte bei Belastung mit variabler Amplitude	193
6.3.1	Globale Analysen	194
6.3.2	Lineare Schadensakkumulation	195
6.3.3	Fließzonenmodelle.....	195
6.3.4	Riss-schließmodelle	203
6.3.5	Fließstreifenmodelle	203
6.4	Mixed-Mode-Beanspruchung	206
6.4.1	Risswachstum beim Wechsel der Belastungsrichtung bzw. der lokalen Beanspruchung am Riss	207
6.4.2	Einfluss von Mixed-Mode-Überlasten auf das Ermüdungsrissswachstum	207
	Literatur zu Kapitel 6	208
7	Simulationen des Ermüdungsrissswachstums	212
7.1	Analytische Risswachstumssimulationen	212
7.1.1	NASGRO und ESACRACK	212
7.1.2	AFGROW	214

7.2	Numerische Risswachstumssimulationen.....	214
7.2.1	Grundlegende Vorgehensweise mittels der Finite-Elemente-Methode	215
7.2.2	Programmsystem FRANC/FAM für ebene Rissausbreitungssimulationen	218
7.2.3	Programmsystem ADAPCRACK3D für räumliche Rissausbreitungssimulationen	219
7.3	Bestimmung der Wirkung von Belastungswechseln mittels Finite-Elemente-Analysen.....	220
	Literatur zu Kapitel 7.....	224
8	Praxisbeispiele	227
8.1	Leck in einer Rohrleitung.....	227
8.1.1	Spannungen im Rohr	227
8.1.2	Spannungsintensitätsfaktoren für den vorliegenden Riss	228
8.1.3	Sicherheit gegen instabile Rissausbreitung	229
8.1.4	Risslänge, bei der instabile Rissausbreitung eintritt	229
8.2	Untersuchung des Ermüdungsrisswachstums im ICE-Radreifen	230
8.2.1	Aufbau und Belastung gummigefederter Räder	230
8.2.2	Rechnerische Spannungsanalyse	231
8.2.3	Schadensanalyse des Radreifenbruches.....	233
8.2.4	Bruchmechanische Charakterisierung des Radreifenwerkstoffs	233
8.2.5	Numerische Simulation des Ermüdungsrisswachstums	233
8.2.6	Experimentelle Simulation des Risswachstums	235
8.3	Simulation des Ermüdungsrisswachstums in einem Pressenkörper	237
8.4	Sanierungsmaßnahme einer Presse.....	240
8.4.1	Modellierung der Rissgeometrie im Verschlussdeckel	240
8.4.2	Spannungsanalyse für den Deckel.....	241
8.4.3	Ergebnisse der FE-Analysen für den angerissenen Verschlussdeckel	241
8.4.4	Bruchmechanische Auswertung der FE-Ergebnisse.....	242
8.4.5	Folgerungen für den Weiterbetrieb der Maschine.....	243
8.5	Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Maschinen, Anlagen und Strukturen.....	243
8.5.1	Weiterbetrieb einer Maschine oder Anlage nach einer Rissdetektion	243
8.5.2	Optimierungsmaßnahmen bei einer Neukonstruktion	245
	Literatur zu Kapitel 8.....	246
9	Wichtige Formelzeichen.....	248
	Sachwortverzeichnis.....	254