

Hans Albert Richard | Manuela Sander

# Ermüdungsrisse

Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden

Mit 181 Abbildungen

PRAXIS



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Auslegung von Bauteilen und Strukturen nach Festigkeitskriterien.....</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Schäden durch Risswachstum .....</b>	<b>24</b>
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 Oldtimer-Autos .....	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

<b>3</b>	<b>Grundlagen der Bruchmechanik.....</b>	<b>51</b>
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 Rissspitze.....	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	Energiefreisetzungsrates und $J$ -Integral.....	82
3.6.1	Energiefreisetzungsrates.....	82
3.6.2	$J$ -Integral.....	83
3.7	Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren und anderer 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 Riss-schließungsintegral ..	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

<b>4</b>	<b>Ermüdungsrischwachstum bei zyklischer Belastung mit konstanter Amplitude .....</b>	<b>106</b>
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 Ermüdungsrisssausbreitung bei Mode I .....	113
4.2.2	Einflussfaktoren auf die Rissgeschwindigkeitskurve .....	114
4.2.3	Riss-schließverhalten beim Ermüdungsrischwachstum .....	115
4.2.4	Thresholdwert und Schwellenwertverhalten .....	119
4.2.5	Kurzrischwachstum .....	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 Ermüdungsrischwachstums .....	134
4.5.1	Bruchmechanische Bewertung des Ermüdungsrischwachstums .....	134
4.5.2	Ermittlung der Risslänge, ab der Ermüdungsrischwachstum möglich ist....	135
4.5.3	Sicherheit gegen das Auftreten des Ermüdungsrischwachstums.....	137
4.5.4	Bereich des Ermüdungsrischwachstums .....	137
4.5.5	Festlegung von Inspektionsintervallen .....	137
4.6	Zusammenwirken von Dauerfestigkeitsberechnung und Bruchmechanik .....	138
	Literatur zu Kapitel 4.....	140
<b>5</b>	<b>Experimentelle Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte .....</b>	<b>143</b>
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 Ermüdungsrisswachstums .....	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
<b>6</b>	<b>Ermüdungsrisswachstum bei Betriebsbelastung .....</b>	<b>177</b>
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 Ermüdungsrisswachstum .....	207
	Literatur zu Kapitel 6 .....	208
<b>7</b>	<b>Simulationen des Ermüdungsrisswachstums .....</b>	<b>212</b>
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 FRANCO/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
<b>8</b>	<b>Praxisbeispiele .....</b>	<b>227</b>
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	Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Maschinen, Anlagen und Strukturen.....	240
8.4.1	Weiterbetrieb einer Maschine oder Anlage nach einer Rissdetektion .....	240
8.4.2	Optimierungsmaßnahmen bei einer Neukonstruktion .....	242
	Literatur zu Kapitel 8.....	243
<b>9</b>	<b>Wichtige Formelzeichen.....</b>	<b>245</b>
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>251</b>