
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Die Problematik der Schädigung und ihrer Beherrschung	1
1.2	Versagenszustände rißgeschädigter Konstruktionen	5
1.3	Grundbegriffe der Bruchmechanik	7
1.4	Voraussetzungen für die Anwendung der Bruchmechanik	12
	Literatur	13
2	Rißartige Schäden in der ingenieurtechnischen Praxis	15
2.1	Typische Beispiele für rißartige Schäden	15
2.1.1	Schäden an Stahlbrücken	15
2.1.2	Risse und Brüche an Schiffen	21
2.1.3	Schäden an Offshore-Konstruktionen	24
2.1.4	Schäden an Rädern von Schienenfahrzeugen	28
2.1.5	Schäden an Eisenbahnachsen	32
2.1.6	Schäden an Eisenbahnschienen	34
2.1.7	Schäden an Flugzeugen	36
2.1.8	Schäden an Rohrleitungen	38
2.1.9	Schäden an Anlagen der Fördertechnik	40
2.1.10	Rißartige „Bagatellschäden“	44
2.2	Ingenieurtechnische Schlußfolgerungen aus Schadensfällen	46
2.2.1	Systematisierung und statistische Analyse der Schäden	47
2.2.2	Analyse der Beanspruchung	55
2.2.3	Konventionelle Analysen der Beanspruchbarkeit	61
2.2.4	Konstruktive Verbesserungen	73
2.2.5	Festlegungen zum Werkstoffeinsatz	75
2.2.6	Verbesserung der Herstellungs- und der Schweißtechnologie	77
2.2.7	Verbesserte Instandhaltung	80
2.2.8	Durchführung zerstörungsfreier Prüfungen	81
2.2.9	Festlegung zulässiger Lasten, Rißgrößen und Prüfzyklen	85

2.2.10	Festlegung von Kriterien für Reparatur, Ausmusterung und Ersatz	88
2.2.11	Erarbeitung verbindlicher Maßnahmenkataloge	89
	Literatur	96
3	Die Beanspruchung des Werkstoffs rißgeschädigter Bauteile	101
3.1	Analyse und Idealisierung des nominellen Spannungszustandes	101
3.2	Spannungen an Kerben	103
3.3	Die Beanspruchung des Werkstoffs in der Umgebung ideal scharfer Rißspitzen	107
3.3.1	Die Spannungen in der Umgebung der Rißspitze	109
3.3.2	Die Verschiebung des Werkstoffs im Rißspitzenbereich	114
3.3.3	Die Deformationsenergie im Material des Rißspitzenbereiches ..	116
3.3.4	Die Grenzen des linear-elastischen Werkstoffverhaltens	118
3.3.5	Die plastische Zone an der Rißspitze und ihre Auswirkungen	123
3.4	Analyse und Idealisierung der Bauteildefekte	130
3.5	(Normierte) Darstellung der Spannungsintensitätsfaktoren	133
3.6	Methoden zur Ermittlung von Spannungsintensitätsfaktoren	134
3.6.1	Die Superpositionsmethode zur SIF-Bestimmung	136
3.6.2	SIF-Ermittlung aus Kerbspannungen	139
3.6.3	SIF-Ermittlung aus der Nachgiebigkeit	147
3.6.4	FEM-Berechnung von Spannungsintensitätsfaktoren	151
3.6.5	SIF-Berechnung mit Gewichtsfunktionen	157
3.6.6	SIF-Ermittlung aus Rißwachstumsmessungen	159
3.6.7	SIF-Ermittlung mit Hilfe spannungsoptischer Versuche	162
	Literatur	164
4	Spannungsintensitätsfaktoren für idealisierte Risse	167
4.1	Die Normierungsfälle für die Spannungsintensitätsfaktoren	167
4.2	Ebene Rißprobleme	168
4.2.1	Gerade und gekrümmte Risse in der unendlich großen Scheibe ..	168
4.2.2	Kantenrisse am Rande der halb-unendlichen Scheibe	172
4.2.3	Risse an Bohrungen in der unendlich großen Scheibe	174
4.2.4	Risse im Scheibenstreifen	180
4.2.5	Bohrungsrisse im Augenstab	183
4.3	Räumliche Rißprobleme	187
4.3.1	Kreis- und Ellipsenrisse im Inneren unendlich großer Körper	187
4.3.2	Halb-elliptische Oberflächenrisse	189
4.3.3	Viertel-kreisförmige Eckrisse	194
4.3.4	Viertel-elliptische Eckrisse	198

4.4	Risse in Bolzen, Achsen und Wellen	200
4.4.1	Querrisse in Kreiszylinderstäben bei Zug, Biegung und Torsion..	200
4.4.2	Querrisse in biegebeanspruchten Achsen	203
4.5	Risse in Profilstäben	204
4.5.1	Stegquerrisse in zug- bzw. biegebeanspruchten I-Profilen	204
4.5.2	Querrisse im Kopf von Eisenbahnschienen	211
4.6	Kerb- und Wurzelrisse an Schweißverbindungen	220
4.6.1	Wurzelrisse an Schweißnähten	220
4.6.2	Kerbrisse an Schweißnähten	222
4.6.3	Durchriß in einer kreuzförmigen Schweißverbindung	225
4.7	WIEGHARDTs Rißproblemlösung von 1907	226
	Literatur	230
5	Rißausbreitungsphänomene und ihre experimentelle Untersuchung	233
5.1	Beschreibung der Rißausbreitung bei zyklischer Beanspruchung	233
5.1.1	Rißausbreitung bei Einstufenbeanspruchung der Rißöffnungsart I.	233
5.1.2	Rißausbreitung bei überlagerten Rißöffnungsarten	236
5.2	Prüfstandards, Proben und Prüfeinrichtungen	239
5.2.1	Bruchmechanische Werkstoff-Prüfstandards	239
5.2.2	K_I -Bruchmechanik-Proben	240
5.2.3	K_{II} -, Mixed-Mode- und Biaxial-Proben	244
5.2.4	Probennahme und -bearbeitung	248
5.2.5	Prüfmaschinen und -einrichtungen	253
5.2.6	Prüfmittel und -geräte	258
5.2.7	Versuchsführung bei der Schwingbeanspruchung	261
5.2.8	Ermittlung der Rißtiefe im Bruchquerschnitt	262
5.3	Der Schwellenwert der Rißausbreitung	263
5.3.1	Durchführung und Auswertung der Schwellenwertermittlung	263
5.3.2	Die relevanten Einflüsse auf den Schwellenwert	265
5.4	Die Rißwachstumsrate bei zyklischer Beanspruchung	266
5.4.1	Durchführung und Auswertung der Rißwachstumsversuche	266
5.4.2	Empirische Rißwachstumsgesetze	269
5.4.3	Die Korrelation der Paris-Koeffizienten C und n	271
5.4.4	Die relevanten Einflüsse auf die Rißwachstumsrate	273
5.4.5	Näherungsbeziehungen für die Grenzkurve der Rißwachstumsrate	296
5.4.6	Die Streuung der Rißwachstumsrate	297
5.4.7	Untersuchungen zum Rißwachstum bei Schub- und Mixed-Mode-Beanspruchung	300
5.5	Die Bruchzähigkeitseigenschaften	303
5.5.1	Die relevanten Einflüsse auf die Größe der Bruchzähigkeit	303
5.5.2	Durchführung und Auswertung statischer Bruchversuche	304

5.5.3	Durchführung und Auswertung dynamischer Bruchversuche	308
5.5.4	Die näherungsweise Ermittlung der dynamischen Streckgrenze . .	311
5.6	Die dynamische Rißausbreitungszähigkeit	314
5.7	Die Rißarrestzähigkeit	317
5.7.1	Durchführung und Auswertung der Rißarrestversuche	317
5.7.2	Die relevanten Einflüsse auf die Rißarrestzähigkeit	320
5.8	Der Aufwand für bruchmechanische Untersuchungen	321
5.8.1	Empfehlenswerter Stichprobenumfang	321
5.8.2	Der Materialaufwand für Bruchmechanikproben	323
5.8.3	Der Zeitaufwand für bruchmechanische Versuche	324
5.8.4	Kostenvergleiche bei Werkstoffprüfungen	326
5.9	Umrechnungsbeziehungen für bruchmechanische Kennwerte	328
	Literatur	330
6	Analyse der Grenzen der Bauteilbeanspruchung	335
6.1	Praktische Erfahrungen zum Auftreten und zur Entwicklung von Rissen . .	335
6.1.1	Rißgefährdete Bereiche von Bauteilen	335
6.1.2	Größe der Ausgangsdefekte sowie der wachsenden und kritischen Risse	336
6.1.3	Entwicklung der Geometrie der Ermüdungsrisse	344
6.1.4	Bauteil- und problemspezifische Beanspruchungsbedingungen . .	349
6.2	Analyse der Dauerfestigkeit	361
6.2.1	Zielstellungen bruchmechanischer Dauerfestigkeitsanalysen	361
6.2.2	Das Kriterium der Dauerfestigkeit	361
6.2.3	Anmerkung zur Übertragung des Schwellenwertes auf Bauteile . .	362
6.3	Analyse der stabilen Rißausbreitung bei zyklischer Beanspruchung	362
6.3.1	Zielstellungen von Rißwachstumsanalysen	362
6.3.2	Die Berechnung des Rißwachstums	362
6.3.3	Der Effektivwert $\Delta\sigma_{eff.}$ stochastischer Schwingweiten der Spannung	363
6.3.4	Der Effektivwert $f_{eff.}$ stochastischer Beanspruchungsfrequenzen . .	364
6.4	Analyse der Initiierung der instabilen Rißausbreitung	366
6.4.1	Zielstellungen der Bruchanalysen	366
6.4.2	Berechnung des kritischen Zustandes – das Bruchkriterium	366
6.4.3	Die Darstellung der Ergebnisse der Bruchversuche	367
6.4.4	Die Übertragung der Bruchzähigkeitseigenschaften auf Bauteile .	368
6.5	Analyse der Phase der dynamischen Rißausbreitung	373
6.6	Analyse der Rißarretierung	373
6.6.1	Zielstellungen der Rißarrestanalysen	373
6.6.2	Berechnung des arretieren Zustandes – das Rißarrestkriterium . .	374
6.7	Hypothesen zur Beschreibung des Mixed-Mode-Rißverhaltens	374

6.8	Art und Weise der Riausbreitungsanalysen	376
6.8.1	Betrachtung und Darstellung der Riausbreitungsphnomene . . .	376
6.8.2	Probabilistische Riausbreitungsanalyse mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation	377
6.9	Experimentelle Überprüfung der Anwendbarkeit der Bruchmechanik	381
6.9.1	Überprüfung des Bruchverhaltens von Eisenbahnschienen	382
6.9.2	Überprüfung des Wachstums von Rissen in Eisenbahnschienen . .	384
6.9.3	Überprüfung der Dauerfestigkeit rißgeschädigter Schienen	386
6.9.4	Betrachtung der Riausbreitungsrichtung bei Modus-II- und Mixed-Mode-Beanspruchung	391
	Literatur	392
7	Der bruchmechanische Sicherheitsnachweis	397
7.1	Einleitende Anmerkungen zum Sicherheitsnachweis	397
7.2	Die Verwendung von Sicherheitsbeiwerten in der Bruchmechanik	398
7.3	Schdigungsstadien, Versagensformen und zulässige Risse	401
7.4	Die Ableitung der Rigrenzmae aus probabilistischen Analysen	402
7.4.1	Ausgangsdaten und Resultate probabilistischer Riausbreitungsanalysen	402
7.4.2	Repräsentative und zulässige Rißgrößen	403
7.4.3	Die erforderliche Größe der Sicherheitsbeiwerte zur Festlegung zulässiger Rißgrößen	405
7.4.4	Praktische Modifikationen des Sicherheitsnachweises	412
7.5	Anwendung der Rigrenzmae	416
7.6	Schlußfolgerungen für die bruchmechanische Sicherheitsbewertung	417
7.7	Bruchmechanisch berechnete und empirisch festgelegte Rißgrößen	419
	Literatur	419
8	Resultate bruchmechanischer Analysen	423
8.1	Zielstellungen durchgeführter bruchmechanischer Untersuchungen	423
8.2	Analyse des Bruchs einer Ruderpinne	424
8.3	Einschätzung des Rißwachstums in einer gebrochenen Fahrzeugachse . .	429
8.4	Vergleichende Analyse der Rißausbreitung in Gterwagenachsen	431
8.5	Zulässige Rißgrößen für die Ultraschall-Schienenprfung	436
8.6	Analyse und Bewertung der Rißausbreitung in Triebfahrzeugrdern	441
	Literatur	444
9	Mathematische Hilfsmittel	447
9.1	Die Ermittlung statistischer Verteilungsparameter	447
9.1.1	Die Bestimmung der Stichprobenparameter	447
9.1.2	Die Weibullverteilung	448

9.2	Die Ermittlung von Regressionsfunktionen	450
9.2.1	Regressionsgeraden und deren mögliche Transformationen	450
9.2.2	Regressionspolynom 2. Grades	454
9.2.3	Regressionsfunktionen zweier unabhängiger Variablen	455
9.3	Interpolationsbeziehungen	458
9.4	Die Bestimmung von Nullstellen analytischer Funktionen	459
9.5	Die Differentiation numerisch gegebener Funktionswerte	460
9.6	Die numerische Integration analytischer Funktionen	461
9.7	Generierung und Transformation von Zufallswerten	464
9.7.1	Die Erzeugung gleichverteilter Pseudo-Zufallszahlen	464
9.7.2	Die Erzeugung normierter normalverteilter Zufallszahlen	465
9.7.3	Die Erzeugung von Zufallswerten vorgegebener Wahrscheinlichkeitsverteilungen	466
9.7.4	Die Erzeugung miteinander korrelierter Zufallswerte	467
9.8	Rechnen mit Kalenderdaten	468
	Literatur	469
	Literatur	471
	Sachverzeichnis	475

Einführung in die bruchmechanische
Schadensbeurteilung

Edel, K.-O.

2015, XVI, 483 S. 125 Abb., 25 Abb. in Farbe.,
Hardcover

ISBN: 978-3-662-44263-0