

<b>1</b>	<b>Grundlagen zeitabhängiger Sicherheitsbetrachtungen</b> .....	<b>1</b>
1.1	Der Begriff Sicherheit .....	1
1.2	Die quantitative Bestimmung der Sicherheit .....	2
1.3	Die Zeitabhängigkeit der Sicherheit .....	3
1.4	Die Planung der Sicherheit .....	4
1.5	Lebensdaueranalyse .....	5
1.6	Qualitätssicherung bei der Planung und Errichtung von Anlagen .....	7
1.7	Qualitätssicherung während des Betriebes .....	12
1.8	Instandhaltung .....	12
1.9	Schädigungsprozesse .....	15
	<i>Schrifttum zu Kapitel 1</i> .....	16
<b>2</b>	<b>Ermüdungsverhalten technischer Bauteile</b> .....	<b>19</b>
2.1	Einleitung .....	19
2.2	Grundlagen des Ermüdungsverfahrens metallischer Werkstoffe	19
2.2.1	Anrißfreie Phase .....	20
2.2.1.1	Wechselverfestigung .....	21
2.2.1.1.1	Reine Metalle .....	21
2.2.1.1.2	Substitutions-Mischkristalle .....	22
2.2.1.1.3	Einlagerungs-Mischkristalle .....	22
2.2.1.2	Zyklische Verfestigung .....	23
2.2.2	Rißbildung .....	24
2.2.3	Rißausbreitung .....	24

<b>2.3</b>	<b>Einflüsse auf Lebensdauer und Dauerfestigkeit</b> .....	<b>27</b>
2.3.1	Beanspruchung .....	27
2.3.1.1	Spannungsamplitude .....	28
2.3.1.2	Mittelspannung .....	29
2.3.1.3	Schwingspielfrequenz .....	29
2.3.2	Werkstoff .....	29
2.3.3	Eigenspannungen .....	30
2.3.4	Bauteilgeometrie .....	31
2.3.5	Temperatur .....	32
2.3.6	Umgebung .....	32
<b>2.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>33</b>
	<i>Schrifttum zu Kapitel 2</i> .....	33
<b>3</b>	<b>Lebensdauervoraussage mit bruchmechanischen Methoden</b> .....	<b>35</b>
3.1	Einleitung .....	35
3.2	Grundlagen der linear-elastischen Bruchmechanik .....	36
3.2.1	Spannungsintensitätsfaktor und instabile Rißausbreitung .....	36
3.2.2	Unterkritische Rißausbreitung .....	38
3.3	Prinzip der Lebensdauerberechnung .....	39
3.4	Beschreibung der $da/dt$ - $K_I$ -Kurve .....	41
3.5	Beschreibung der $da/dN$ - $\Delta K$ -Kurve .....	42
3.5.1	Allgemeiner Verlauf .....	42
3.5.2	Einfluß der Mittelspannung .....	42
3.5.3	Einfluß des umgebenden Mediums .....	43
3.5.4	Einfluß der Frequenz .....	45
3.5.5	Einfluß von Amplitudenwechseln .....	46
3.6	Rißausbreitung bei zweidimensionalen Rissen .....	47
3.7	Spannungsintensitätsfaktor bei Spannungsgradienten .....	50
3.8	Rißstoppverhalten .....	55
3.9	Kritische Rißlänge bei zähen Werkstoffen .....	56
3.9.1	Das J-Integral-Verfahren .....	57
3.9.2	Das COD-Verfahren .....	58
3.9.3	Das FAD der Zwei-Kriterien-Methode .....	58

3.10	<b>Fehlerbewertungsschema</b> .....	60
	<i>Schrifttum zu Kapitel 3</i> .....	61
<b>4</b>	<b>Betriebsfestigkeitsrechnung</b> .....	63
4.1	<b>Einleitung</b> .....	63
4.2	<b>Betriebsfestigkeitsrechnung in der Rißeinleitungsphase</b> .....	64
4.3	<b>Betriebsfestigkeitsrechnung in der Rißausbreitungsphase</b> .....	70
4.4	<b>Zusammenfassung</b> .....	73
4.5	<b>Beispiele</b> .....	74
	<i>Schrifttum zu Kapitel 4</i> .....	76
<b>5</b>	<b>Verschleiß</b> .....	79
5.1	<b>Einleitung</b> .....	79
5.2	<b>Analyse von Verschleißvorgängen</b> .....	80
5.2.1	Systemtechnik .....	80
5.2.2	Verschleißarten .....	81
5.2.3	Verschleißmechanismen .....	82
5.2.4	Verschleißerscheinungsformen .....	84
5.2.5	Verschleißprüftechnik .....	85
5.3	<b>Nutzungsdauer verschleißbeanspruchter Bauteile</b> .....	87
5.3.1	Verschleißverlauf .....	87
5.3.2	Verschleißmodelle .....	90
5.3.3	Mathematisch-statistische Methoden .....	98
5.4	<b>Maßnahmen zur Verschleißminderung</b> .....	103
	<i>Schrifttum zu Kapitel 5</i> .....	107
<b>6</b>	<b>Neutronenversprödung</b> .....	109
6.1	<b>Einleitung</b> .....	109
6.2	<b>Veränderung der Werkstoffkennwerte bei Neutronen-</b> <b>bestrahlung</b> .....	110
6.2.1	Kennwerte des Zugversuches .....	110
6.2.2	Kennwerte des Kerbschlagbiegeversuchs .....	111

6.2.3	NDT-Temperatur . . . . .	112
6.2.4	Härte. . . . .	113
6.2.5	Rißzähigkeit . . . . .	114
6.2.6	Rißfortschrittsgeschwindigkeit. . . . .	117
<b>6.3</b>	<b>Einflüsse auf die Bestrahlungsempfindlichkeit . . . . .</b>	<b>118</b>
6.3.1	Chemische Zusammensetzung . . . . .	118
6.3.2	Gefüge . . . . .	120
6.3.3	Textur . . . . .	122
6.3.4	Korngröße. . . . .	122
<b>6.4</b>	<b>Einflüsse der Bestrahlungsparameter . . . . .</b>	<b>123</b>
6.4.1	Fluenz . . . . .	123
6.4.2	Flußdichte . . . . .	123
6.4.3	Spektrum. . . . .	124
6.4.4	Bestrahlungstemperatur . . . . .	125
<b>6.5</b>	<b>Ausheilung von Strahlenschäden . . . . .</b>	<b>125</b>
<b>6.6</b>	<b>Berücksichtigung der Neutronenversprödung in Regelwerken und Empfehlungen. . . . .</b>	<b>128</b>
6.6.1	Vorsorgemaßnahmen bereits bei der Auslegung . . . . .	128
6.6.1.1	Berechnung der Neutronenfluenz für das Ende der Betriebs- dauer. . . . .	128
6.6.1.2	Konservative Abschätzung des Zähigkeitsverlustes während der Lebensdauer . . . . .	128
6.6.1.3	Gegenüberstellung von Beanspruchung und Tragfähigkeit der Struktur. . . . .	130
6.6.2	Ständige Registrierung der Versprödung durch Bestrahlungsüber- wachungsprogramme. . . . .	132
6.6.2.1	Experimentelle Überprüfung der Neutronenfluenzberechnung. . .	132
6.6.2.2	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des bestrahlten origi- nalen RDB-Werkstoffs. . . . .	133
6.6.2.3	Kontrolle bzw. Korrektur der Auslegungsberechnung . . . . .	133
6.6.3	Wiederkehrende Prüfungen . . . . .	133
6.6.3.1	Zerstörungsfreie Wiederholungsprüfungen. . . . .	133
6.6.3.2	Wiederholungsdruckprobe. . . . .	134
6.6.4	Kontrollierter Betriebsablauf . . . . .	134
<b>6.7</b>	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>134</b>
	<i>Schrifttum zu Kapitel 6. . . . .</i>	<i>135</i>
<b>7</b>	<b>Physikalischer Wasserstoffangriff. . . . .</b>	<b>137</b>
	<b>Zusammenfassung . . . . .</b>	<b>137</b>

	<b>Einleitung</b> .....	137
<b>7.1</b>	<b>Vorstellungen über die Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff und Bauteilgefüge</b> .....	139
7.1.1	Versprödungstheorien .....	139
7.1.2	Die Wasserstoffaufnahme aus der Gasphase .....	141
7.1.3	Die Verteilung von Wasserstoff im Gefüge .....	142
<b>7.2</b>	<b>Untersuchungsmethoden zur Qualifizierung von Bauteilen für den Einsatz von Wasserstoff</b> .....	144
<b>7.3</b>	<b>Einfluß der unterschiedlichen Betriebsbeanspruchungen auf das Verhalten von Bauteilen in Wasserstoff</b> .....	150
7.3.1	Wasserstoff-Rißwachstum bei statischer Beanspruchung .....	150
7.3.2	Der Einfluß von Wasserstoff auf die Ermüdung von Bauteilen. . . .	153
7.3.3	Die Entstehung von wasserstoffinduzierten Ermüdungsrissen an Oberflächenfehlern .....	159
7.3.4	Sicherheitsanalyse für den Betrieb von Bauteilen in Druckwasserstoff. . . . .	161
	<i>Schrifttum zu Kapitel 7</i> .....	162
<b>8</b>	<b>Zeitstandverhalten metallischer Werkstoffe</b> .....	165
<b>8.1</b>	<b>Grundlagen</b> .....	165
8.1.1	Gefügealterung .....	165
8.1.2	Langzeitkriechen .....	167
8.1.3	Regenerierung .....	170
8.1.4	Schlußfolgerungen und Vorhersagbarkeit .....	171
<b>8.2</b>	<b>Technische Anwendung</b> .....	171
8.2.1	Bestimmung zeitabhängiger Werkstoffkennwerte .....	171
8.2.2	Berechnung .....	174
8.2.3	Zeitsicherheit .....	174
8.2.4	Restlebensdauer .....	175
8.2.4.1	Abschätzung der Restlebensdauer mit Hilfe von Betriebsdaten . . .	175
8.2.4.2	Besondere Überwachungsmaßnahmen .....	178
8.2.4.3	Abschätzung der Restlebensdauer auf der Grundlage des Werkstoffzustandes .....	178
8.2.5	Bewertung von im Zeitstandsbereich eingesetzten betriebsbeanspruchten Bauteilen (Restlebensdauerabschätzung) .....	181
	<i>Schrifttum zu Kapitel 8</i> .....	182

<b>9</b>	<b>Flächenkorrosion</b> .....	185
9.1	Einleitung .....	185
9.2	Grundlagen .....	186
9.3	Korrosionsgeschwindigkeit .....	186
9.4	Beständigkeitsstufen, Säurekorrosion .....	188
9.5	Zeitabhängigkeit der Flächenkorrosion .....	190
9.6	Atmosphärische Korrosion .....	191
9.7	Korrosion in Wässern .....	193
9.8	Inhibition .....	194
9.9	Passivität .....	195
9.10	Aktiver und passiver Korrosionsschutz .....	197
	<i>Schrifttum zu Kapitel 9</i> .....	199
<b>10</b>	<b>Lochkorrosion</b> .....	201
10.1	Begriffe .....	201
10.2	Bedeutung der Lochkorrosion für die Praxis .....	201
10.3	Allgemeine Bedingungen für Lochkorrosion .....	202
10.4	Sauerstoffkorrosion an un- und niedriglegierten Stählen .....	203
10.5	Lochkorrosion bei ferritischen Chromstählen und austenitischen Chrom-Nickel-(Molybdän-)Stählen .....	205
10.5.1	Medienseitige Parameter .....	206
10.5.2	Werkstoffseitige Parameter .....	208
10.5.3	Einfluß von Fertigung und Konstruktion .....	209
10.5.4	Maßnahmen zur Verringerung der Lochkorrosionsgefahr .....	211
10.6	Statistik der Inkubationszeit .....	211
	<i>Schrifttum zu Kapitel 10</i> .....	213
<b>11</b>	<b>Spannungs- und Schwingungsrißkorrosion</b> .....	215
11.1	Allgemeines .....	215

<b>11.2</b>	<b>Spannungsrißkorrosion</b> . . . . .	215
11.2.1	Anodische Spannungsrißkorrosion der Stähle . . . . .	216
11.2.2	Anodische Spannungsrißkorrosion von Nichteisenmetallen . . . . .	220
11.2.3	Dehnungsinduzierte Spannungsrißkorrosion . . . . .	223
11.2.4	Wasserstoffinduzierte (kathodische) Spannungsrißkorrosion der Stähle . . . . .	226
11.2.5	Inkubation, Rißbildung und Rißfortschritt bei der Spannungsrißkorrosion . . . . .	231
<b>11.3</b>	<b>Schwingungsrißkorrosion</b> . . . . .	238
11.3.1	Grundlagen . . . . .	238
11.3.2	Mechanische Vorstellungen zur Schwingungsrißkorrosion . . . . .	240
11.3.3	Einflußgrößen der Korrosionsschwingfestigkeit . . . . .	241
<b>11.4</b>	<b>Folgerungen für die Praxis</b> . . . . .	243
	<i>Schrifttum zu Kapitel 11</i> . . . . .	245
<b>12</b>	<b>Hochtemperaturkorrosion</b> . . . . .	247
<b>12.1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .	247
<b>12.2</b>	<b>Grundlagen – Isotherme Oxidation reiner Metalle</b> . . . . .	248
12.2.1	Thermodynamische Betrachtungen . . . . .	248
12.2.2	Mechanismus der Hochtemperaturoxidation . . . . .	249
12.2.3	Zeitabhängigkeit der Oxidationsvorgänge . . . . .	253
12.2.4	Temperaturabhängigkeit der Oxidationsreaktionen . . . . .	255
<b>12.3</b>	<b>Weitere Einflußgrößen auf das Hochtemperatur-oxidationsverhalten</b> . . . . .	257
12.3.1	Einfluß der Werkstoffzusammensetzung . . . . .	258
12.3.1.1	Stähle . . . . .	259
12.3.1.2	Nickel- und Kobaltlegierungen . . . . .	263
12.3.1.3	Heizleiterlegierungen . . . . .	266
12.3.2	Einfluß des angreifenden Gases . . . . .	267
12.3.2.1	Einfluß von Wasserdampf . . . . .	267
12.3.2.2	Oxidation in CO <sub>2</sub> -CO-Gasgemischen . . . . .	267
12.3.2.2.1	Zeitgesetze . . . . .	267
12.3.2.2.2	Aufkohlung hochlegierter Werkstoffe . . . . .	269
12.3.2.3	Verzunderung durch Verbrennungsabgase . . . . .	270
12.3.2.4	Verzunderung unter Ablagerungen aus Verbrennungsabgasen . . . . .	271
12.3.2.5	Sulfidbildung durch Schwefel und Schwefelverbindungen . . . . .	274
12.3.2.6	Einwirkung von Chlor . . . . .	275
12.3.3	Einfluß zyklischer Temperaturbeanspruchung . . . . .	276

12.3.4	Einfluß mechanischer Belastung . . . . .	277
12.3.5	Strömungseinfluß . . . . .	277
<b>12.4</b>	<b>Qualitätssichernde Maßnahmen in der Planungsphase . . . . .</b>	<b>278</b>
12.4.1	Anlagen- und verfahrensbedingte Einflußgrößen . . . . .	278
12.4.2	Ermittlung des isothermen Zunderverhaltens . . . . .	279
12.4.2.1	Ermittlung der Zeitgesetze . . . . .	279
12.4.2.2	Ermittlung der Temperaturabhängigkeit . . . . .	281
12.4.2.3	Sigma-Phasen-Versprödung . . . . .	281
12.4.3	Ermittlung des Zunderverhaltens bei zyklischer Temperaturbeanspruchung . . . . .	281
12.4.4	Möglichkeiten des Korrosionsschutzes . . . . .	282
12.4.4.1	Inhibierende Additive . . . . .	282
12.4.4.2	Schutzüberzüge . . . . .	283
12.4.4.3	Ausblick . . . . .	283
<b>12.5</b>	<b>Maßnahmen zur Verminderung der Hochtemperaturkorrosion in der Betriebsphase. . . . .</b>	<b>284</b>
12.5.1	Maßnahmen während des Betriebes . . . . .	284
12.5.2	Maßnahmen der Wartung und Instandhaltung . . . . .	284
	<i>Schrifttum zu Kapitel 12. . . . .</i>	<i>285</i>
<b>13</b>	<b>Erosionskorrosion . . . . .</b>	<b>289</b>
13.1	Einleitung . . . . .	289
13.2	Grundlagen . . . . .	289
13.3	Erscheinungsformen der Erosionskorrosion . . . . .	291
13.4	Gesetzmäßigkeiten der Erosionskorrosion . . . . .	294
13.4.1	Erosionskorrosion in Speisewasser . . . . .	295
13.4.2	Erosionskorrosion in Naßdampf . . . . .	297
13.4.3	Erosionskorrosion an Werkstoffen für Wärmetauscherrohre . . . . .	300
13.5	Schutzmaßnahmen gegen Erosionskorrosion . . . . .	303
	<i>Schrifttum zu Kapitel 13. . . . .</i>	<i>304</i>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>307</b>