
Inhaltsverzeichnis

1	Geschichte der Technik – Geschichte der Versagens- und der Schadenfälle	1
	Weiterführende Literatur	6
2	Erkenntnisgewinn aus dem System technischen Versagens	7
	Weiterführende Literatur	9
3	Evolution und Selektion in der Technik	11
3.1	Vorbild Natur	11
3.2	Autonomes technisches Design	14
	Weiterführende Literatur	20
4	Ereignisketten von Pannen zu Katastrophen	21
4.1	Kleinteile und „Sonstiges“	22
4.2	Der Fall Corvair – kein Endpunkt	23
4.3	Ein Schicksalsbolzen in der Zivilluftfahrt	23
4.4	Verstrickungen auf See	25
4.5	Automation und Schnittstelle Mensch-Maschine	27
4.6	Fehler bei Elektronik und elektrischen Netzwerken	28
4.7	Wenn Bauwerke ihre Festigkeit verlieren	30
	Weiterführende Literatur	32
5	Strategischer Standort der Schadenanalyse	33
5.1	Produktzyklus	33
5.1.1	Konstruktions- und Planungsphase	34
5.1.2	Realisierungsphase	36
5.1.3	Nutzungsphase	40
5.1.4	Wartungs- und Reparaturphase	43
5.1.5	Folgerungen zur Qualitätssicherung	45
5.2	Kriterien für Bauteilgestaltung und Werkstoffwahl	48
5.2.1	Ursprünge der Werkstoffprüfung	49

5.2.2	Mechanische Beanspruchung	49
5.2.3	Riß- und Fehlertoleranz	51
5.2.4	Reibkorrosionsbeanspruchung	52
5.2.5	Schwingungsrißkorrosionsbeanspruchung (SwRK)	53
5.2.6	Spannungsrißkorrosionsbeanspruchung (SpRK)	53
5.2.7	Thermomechanische Beanspruchung	54
5.2.8	Schadenanalyse und technische Sicherheit	55
	Weiterführende Literatur	55
6	Begriffe und Sequenzen bei Versagensprozessen	57
6.1	Begriffsdefinition	57
6.2	Begriffsbewertungen	58
6.3	Ursache – Wirkungszusammenhang	60
	Weiterführende Literatur	62
7	Systematik der Schadenklärung	63
7.1	Konzeption einer Schadenuntersuchung	63
7.2	Arbeits- und Entscheidungsschritte bei der Schadenklärung	66
7.3	Befundvergleiche zur Bewertung und Zuordnung von Schadenmerkmalen	72
	Weiterführende Literatur	79
8	Voraussetzungen und Planung werkstoffkundlicher Untersuchungen	81
8.1	Einteilung und Aufgabenstellung	81
8.2	Untersuchungsziel	83
8.3	Untersuchungsmaterial	83
8.3.1	Auswahlkriterium Schädigungsgrad	84
8.3.2	Auswahlkriterium Initialschaden	86
8.4	Zuordnung und Kennzeichnung von Untersuchungsmaterial	88
8.5	Entnahme und Versand von Untersuchungsmaterial	89
8.6	Probenplan für die Laboruntersuchungen	90
	Weiterführende Literatur	92
9	Beanspruchungsreaktionen und Schadenmerkmale	93
9.1	Äußere Beurteilung von Schadenteilen	94
9.1.1	Untersuchungsverfahren	94
9.1.2	Makromorphologische Merkmale	94
9.1.3	Mikromorphologische Merkmale	99
9.2	Fraktographie	103
9.2.1	Untersuchungsverfahren	105
9.2.2	Makrofraktographische Bruchmerkmale	107
9.2.2.1	Gewaltbrüche	108

9.2.2.2	Wechselbeanspruchungsbrüche (Schwingbrüche, Dauerbrüche)	116
9.2.2.3	Brüche unter korrosiven Zusatzeinflüssen	126
9.2.2.4	Thermisch beeinflußte Riß- und Bruchvorgänge	134
9.2.3	Mikrofraktographische Bruchmerkmale	139
9.2.3.1	Gewaltbrüche	139
9.2.3.2	Werkstofffehler	154
9.2.3.3	Wechselbeanspruchungsbrüche	155
9.3	Metallographie	160
9.3.1	Makroschliffe (Makroschnitte)	161
9.3.1.1	Makroschliffe ungeätzt	161
9.3.1.2	Makroschliffe geätzt	166
9.3.2	Mikroschliffe	173
9.3.2.1	Mikroschliffe ungeätzt	176
9.3.2.2	Mikroschliffe geätzt	177
9.3.2.3	Schadenerscheinungen im Mikrogefüge	178
9.4	Feinstrukturuntersuchungen	195
9.4.1	Methodik	197
9.4.2	Anwendungsmöglichkeiten	198
9.4.2.1	Bestimmung der Phasenzusammensetzung von Werkstoffen	198
9.4.2.2	Analyse von Reaktionsprodukten	198
9.4.2.3	Analyse von Ablagerungen	199
9.4.3	Anwendungsbeispiel	199
	Weiterführende Literatur	201
10	Schadenmerkmale an nichtmetallischen Werkstoffen	203
10.1	Polymere Kurzfaserverbundwerkstoffe	204
10.1.1	Äußere Beurteilung geschädigter Bauteile	206
10.1.2	Fraktographische Beurteilung geschädigter Bauteile	207
10.1.2.1	Makrofraktographische Bruchmerkmale	207
10.1.2.2	Mikrofraktographische Bruchmerkmale	208
10.1.3	Plastographische Untersuchungen	210
10.2	Langfaser- und Gewebeverbundwerkstoffe	213
10.2.1	Äußere Beurteilung	213
10.2.2	Fraktographie	213
10.2.2.1	Gewaltbrüche	215
10.2.2.2	Schwingungsbrüche (Dauerbrüche)	219
10.2.3	Plastographische Untersuchungen	219
10.3	Technische Keramik	220
10.3.1	Fraktographie	222
10.3.1.1	Transkristalliner Bruch	222
10.3.1.2	Interkristalliner Bruch	223

10.3.2 Versagensarten	223
10.3.2.1 Spontanes Versagen	223
10.3.2.2 Unterkritisches Rißwachstum	225
10.3.2.3 Kriechen	226
10.3.3 Weibullanalyse	226
10.3.4 Fraktographische Untersuchungsmethoden	227
10.3.5 Methoden zur Qualitätskontrolle	229
Weiterführende Literatur	229
11 Werkstoffcharakterisierung	231
11.1 Chemische Analyse	232
11.1.1 Integrative chemische Analyse (Stückanalyse)	232
11.1.1.1 Absorptionsspektroskopie	232
11.1.1.2 Emissionspektroskopie	233
11.1.1.3 Chromatographie	233
11.1.1.4 Naßanalytische Verfahren	233
11.1.1.5 Stellung der integrativen chemischen Anaytik in der Schadenklärung	234
11.1.2 Feinbereichsanalyse	234
11.2 Festigkeitseigenschaften	238
11.2.1 Zugfestigkeit	239
11.2.2 Bruchverhalten	243
11.2.3 Zeitstandfestigkeit	247
11.2.4 Festigkeit unter mechanischer Wechselbeanspruchung	248
11.3 Korrosionsverhalten	250
11.3.1 Bewertung der elektrochemischen Korrosion (Feuchtekorrosion)	251
11.3.2 Bewertung der Hochtemperaturkorrosion	253
11.4 Werkstoffanpassung und -Fehlpassungen	254
Weiterführende Literatur	256
12 Simulationsuntersuchungen	259
Weiterführende Literatur	265
13 Abfassung des Schadengutachtens	267
13.1 Gutachtenauftrag	268
13.1.1 Schadenaufnahme an der Anlage oder Anlaß zur Schadenuntersuchung	268
13.1.1.1 Feststellung, Befunde	268
13.1.1.2 Schlußfolgerungen aus der Schadenaufnahme	268
13.2 Untersuchungsmaterial	269

13.3 Äußere Beurteilung (vgl. Abschn. 9.1)	269
13.3.1 Feststellungen, Befunde	269
13.3.2 Schlußfolgerungen aus der äußeren Beurteilung	270
13.4 Spezifische Vertiefungsuntersuchungen zur Erfassung von Schadenmerkmalen	270
13.5 Vergleich zwischen Eigenschaften von Werkstoff und Bauteil mit den Anforderungen aus dem Betrieb	271
13.6 Schlußfolgerungen zur Schadenursache und Maßnahmen zur Schadenverhütung	272
14 Fallbeispiele zur Durchführung von Schadenanalysen	273
14.1 Prinzip der Darstellung der Fallbeispiele	273
14.2 Untersuchungs- und Entscheidungsschritte bei der Schadenklärung an Praxisfällen	275
14.2.1 Klärung der Verantwortlichkeit beim Radnabenbruch eines Nutzfahrzeugs	275
14.2.1.1 Vorbemerkung	275
14.2.1.2 Veranlassung	276
14.2.1.3 Informationen zum Fahrzeug	276
14.2.1.4 Vorgeschichte	276
14.2.1.5 Ziel der Untersuchung	276
14.2.1.6 Untersuchungsmaterial	276
14.2.1.7 Äußere Beurteilung	277
14.2.1.8 Makrofraktographische Untersuchung	280
14.2.1.9 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	280
14.2.1.10 Metallographische Untersuchung	281
14.2.1.11 Ergebniszusammenstellung und Schadenrekonstruktion	282
14.2.2 Untersuchung der Bruchursache an Rotorarmen von Laborzentrifugen	282
14.2.2.1 Vorbemerkung	282
14.2.2.2 Schadenssituation und Anlaß zur Untersuchung	283
14.2.2.3 Angaben zum Gerät	283
14.2.2.4 Untersuchungsmaterial	283
14.2.2.5 Äußere Beurteilung	284
14.2.2.6 Makrofraktographie	284
14.2.2.7 Mikrofraktographische Untersuchung	285
14.2.2.8 Metallographie	286
14.2.2.9 Chemische Analyse	288
14.2.2.10 Härtmessungen	288
14.2.2.11 Ergebniszusammenstellung und Schadenrekonstruktion	289

14.2.3 Ursache plötzlich auftretender Falzungengenauigkeiten an einem Falzapparat einer Rollenoffsetmaschine	289
14.2.3.1 Vorbemerkung	289
14.2.3.2 Schadensituation und Anlaß zur Untersuchung	289
14.2.3.3 Rundlaufmessungen	291
14.2.3.4 Äußere Beurteilung des Falzklappenzylinders	292
14.2.3.5 Metallographische Untersuchungen	293
14.2.3.6 Abschätzung der Deformationskräfte	294
14.2.3.7 Zusammenfassung und Schlußfolgerung	294
14.2.4 Widerspruchsklärung verschiedener Schadenuntersuchungen an einem Tragring	295
14.2.4.1 Vorbemerkung	295
14.2.4.2 Angaben zum Objekt	295
14.2.4.3 Informationen zum Schaden	297
14.2.4.4 Unterlagen zur Beurteilung	297
14.2.4.5 Ergebnisse der Bewertung	297
14.2.4.6 Ergebnisse eigener Schadenuntersuchung	299
14.2.4.7 Zusammenfassende Bewertung zum Schadenvorgang	302
14.2.5 Klärung einer Schadenserie bei Slicern in der Wurstwarenfabrikation	304
14.2.5.1 Vorbemerkung	304
14.2.5.2 Gegenstand der Untersuchungen	304
14.2.5.3 Konzeption und konstruktive Gestaltung des Schadengegenstands	305
14.2.5.4 Anlaß zur Untersuchung	306
14.2.5.5 Untersuchungsmaterial	306
14.2.5.6 Äußere Beurteilung	307
14.2.5.7 Mikrofraktographische Untersuchung	309
14.2.5.8 Auslegung und konstruktive Gestaltung	310
14.2.5.9 Ergebniszusammenstellung und Schadenrekonstruktion	311
14.2.6 Schäden an Wärmetauscherplatten eines Luftvorwärmers	311
14.2.6.1 Vorbemerkung	311
14.2.6.2 Gegenstand	311
14.2.6.3 Untersuchungsanlaß	312
14.2.6.4 Untersuchungsziel	312
14.2.6.5 Untersuchungsmaterial	313
14.2.6.6 Äußere Beurteilung	313
14.2.6.7 Mikromorphologische Untersuchungen der Oberfläche	314
14.2.6.8 Metallographische Untersuchung	315

14.2.6.9	Simulationsversuch	316
14.2.6.10	Ergebniszusammenfassung, Schadenrekonstruktion und Abhilfe	317
14.2.7	Kausalität zwischen einem Störfall an einem Kraftwerkskessel und Schäden an Sammler und Berohrung	317
14.2.7.1	Vorbemerkung	317
14.2.7.2	Informationen zur schadengegenständlichen Kesselanlage	318
14.2.7.3	Informationen zum Störfall	320
14.2.7.4	Äußere Beurteilung	321
14.2.7.5	Metallkundliche Untersuchungen	321
14.2.7.6	Temperaturberechnung über die thermodynamischen Zustände und über die Wärmeübertragungsgleichung	322
14.2.7.7	Zeitverlauf bis zur Durchwärmung des Sammlers	323
14.2.7.8	Dehnungen und Spannungen im Sammler unter Übertemperatur	324
14.2.7.9	Wasserstoffwerte im Dampfkreislauf	326
14.2.7.10	Ergebniszusammenstellung und Schadenrekonstruktion	326
14.2.8	Klärung der Ursache von Verformungen am Flammrohr eines Kessels Bauart Fox	326
14.2.8.1	Vorbemerkung	326
14.2.8.2	Veranlassung zur Untersuchung	327
14.2.8.3	Ziel der Untersuchung	327
14.2.8.4	Angaben zum Kessel und Betrieb	327
14.2.8.5	Äußere Beurteilung des Flammrohres (Wellrohres)	328
14.2.8.6	Mikromorphologische Untersuchung	328
14.2.8.7	Metallographische Untersuchung	330
14.2.8.8	Ergebniszusammenfassung und Rekonstruktion des Schadenablaufs	332
14.2.9	Ursache von Undichtheiten an seewassergekühlten Ölkuhlern	332
14.2.9.1	Vorbemerkung	332
14.2.9.2	Veranlassung	333
14.2.9.3	Untersuchungsgegenstand	333
14.2.9.4	Konstruktive Ausführung	333
14.2.9.5	Äußere Beurteilung	334
14.2.9.6	Mikromorphologische Untersuchung	336
14.2.9.7	Chemische Analyse	336
14.2.9.8	Elektrochemische Messung	337
14.2.9.9	Metallographische Untersuchung	337

14.2.9.10 Ergebniszusammenstellung und Schadenrekonstruktion	338
14.3 Ergebnisdarstellung aus Untersuchungen weiterer Schadenfälle	338
14.3.1 Ursache von Maßinstabilitäten im Walzspalt eines YankeeTrockenzylinders einer Papiermaschine	339
14.3.1.1 Vorbemerkung	339
14.3.1.2 Informationen zum Trockenzylinder	339
14.3.1.3 Untersuchungsanlass	340
14.3.1.4 Messungen am Zylinder	341
14.3.1.5 Bewertung der Innenoberfläche des Zylinders	341
14.3.1.6 Folgerungen	341
14.3.2 Zusammenhang zwischen korrosionsinduzierten Brüchen an Saugwalzen und Stranggußparametern	343
14.3.2.1 Vorbemerkung	343
14.3.2.2 Informationen zu den Saugwalzen	343
14.3.2.3 Äußere Beurteilung	343
14.3.2.4 Metallographische Untersuchungen	344
14.3.2.5 Rekonstruktion der Gefügeentstehung	345
14.3.2.6 Schlussbetrachtung	346
14.3.3 Altersbestimmung einer Wasserleitung	347
14.3.3.1 Vorbemerkung	347
14.3.3.2 Untersuchungsablauf und Ergebnis	347
Weiterführende Literatur	349
15 Folgenschwere Schadenfälle	351
15.1 Getriebeschäden bei Inbetriebnahme einer Gasturbinenanlage	351
15.2 ICE-Entgleisung durch Bruch eines Radkranzes	354
15.3 Der Deckeneinsturz eines Schwimmbads durch Spannungsrisskorrosion	357
15.4 Schäden durch verzögerten Bruch hochfester Stähle	360
15.5 Fehler bei der Betriebsgenehmigung einer Papiermaschine	362
15.6 Einfluss von Betriebsbedingungen auf die Beständigkeit warmfester Werkstoffe in Brennwertkesseln	366
Weiterführende Literatur	369
16 Schlußbetrachtung	371
Sachverzeichnis	373