

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Geschichte der Technik – Geschichte der Versagens- und der Schadenfälle</b>	<b>1</b>
	Weiterführende Literatur	6
<b>2</b>	<b>Erkenntnisgewinn aus dem System technischen Versagens</b>	<b>7</b>
	Weiterführende Literatur	9
<b>3</b>	<b>Evolution und Selektion in der Technik</b>	<b>11</b>
3.1	Vorbild Natur	11
3.2	Autonomes technisches Design	14
	Weiterführende Literatur	20
<b>4</b>	<b>Ereignisketten von Pannen zu Katastrophen</b>	<b>21</b>
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
<b>5</b>	<b>Strategischer Standort der Schadenanalyse</b>	<b>33</b>
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
<b>6</b>	<b>Begriffe und Sequenzen bei Versagensprozessen .....</b>	<b>57</b>
6.1	Begriffsdefinition .....	57
6.2	Begriffsbewertungen .....	58
6.3	Ursache – Wirkungszusammenhang .....	60
	Weiterführende Literatur .....	62
<b>7</b>	<b>Systematik der Schadenklärung .....</b>	<b>63</b>
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
<b>8</b>	<b>Voraussetzungen und Planung werkstoffkundlicher Untersuchungen ....</b>	<b>81</b>
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
<b>9</b>	<b>Beanspruchungsreaktionen und Schadenmerkmale .....</b>	<b>93</b>
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
<b>10</b>	<b>Schadenmerkmale an nichtmetallischen Werkstoffen .....</b>	<b>203</b>
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
<b>11</b>	<b>Werkstoffcharakterisierung</b>	<b>231</b>
11.1	Chemische Analyse	232
11.1.1	Integrative chemische Analyse (Stückanalyse)	232
11.1.1.1	Absorptionsspektroskopie	232
11.1.1.2	Emissionsspektroskopie	233
11.1.1.3	Chromatographie	233
11.1.1.4	Naßanalytische Verfahren	233
11.1.1.5	Stellung der integrativen chemischen Analytik 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
<b>12</b>	<b>Simulationsuntersuchungen</b>	<b>259</b>
	Weiterführende Literatur	265
<b>13</b>	<b>Abfassung des Schadengutachtens</b>	<b>267</b>
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
<b>14 Fallbeispiele zur Durchführung von Schadenanalysen .....</b>	<b>273</b>
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 Nutzfahrzeuges .....	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 Schadensituation 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 Härtemessungen .....	288
14.2.2.11 Ergebniszusammenstellung und Schadenrekonstruktion .....	289

14.2.3	Ursache plötzlich auftretender Falzungenauigkeiten 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 Falzklappenzyinders .....	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 Schadensvorgang .....	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 Ölkühlern ...	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
<b>15</b>	<b>Folgenschwere Schadenfälle</b>	<b>351</b>
15.1	Getriebschaden 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
<b>16</b>	<b>Schlußbetrachtung</b>	<b>371</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>373</b>

Integrierte Schadenanalyse

Technikgestaltung und das System des Versagens

Schmitt-Thomas, K.G.

2015, XX, 388 S. 301 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-46133-4