

# Inhaltsverzeichnis

---

## Herausgeber-Vorwort

### Vorwort

<b>1</b>	<b>Einführung in die Methodik der Schadensuntersuchung ....</b>	<b>1</b>
	<i>Johann Grosch</i>	
1.1	Definitionen und Abgrenzungen .....	1
1.2	Ablauf einer Schadensuntersuchung.....	2
1.3	Literatur .....	4
<b>2</b>	<b>Untersuchungsverfahren .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Makroskopische und lichtmikroskopische Untersuchungen .....</b>	<b>5</b>
	<i>Johann Grosch</i>	
2.1.1	Makroskopische Untersuchungen – Sichtprüfung .....	5
2.1.2	Lichtmikroskopische Untersuchungen .....	8
2.1.3	Literatur .....	18
<b>2.2</b>	<b>Schadensuntersuchungen durch Röntgenfeinstrukturanalysen .....</b>	<b>19</b>
	<i>Wolfgang Zinn, Thomas Hirsch</i>	
2.2.1	Einleitung .....	19
2.2.2	Grundlagen .....	20
2.2.3	Ermittlung der Phasenzusammensetzung durch Feinstrukturanalysen .....	25
2.2.4	Grundlagen der Eigenspannungsanalyse .....	27
2.2.5	Anwendungsbeispiele .....	31
2.2.6	Weitere röntgenographische Untersuchungsverfahren .....	38
2.2.7	Literatur .....	39
<b>2.3</b>	<b>Rasterelektronenmikroskopische und elektronenstrahlmikroanalytische Untersuchungen .....</b>	<b>41</b>
	<i>Johann Grosch</i>	
2.3.1	Wechselwirkung Elektronenstrahl / metallischer Festkörper .....	41
2.3.2	Wirkungsweise des Rasterelektronenmikroskops .....	43
2.3.3	Elektronenstrahlmikroanalyse .....	48
2.3.4	Literatur .....	53

<b>3</b>	<b>Schadenanalyse bei Polymerwerkstoffen .....</b>	<b>54</b>
	<i>Wolfgang Janzen</i>	
3.1	Einleitung .....	54
3.2	Spezifische Eigenschaften der Polymerwerkstoffe .....	56
3.2.1	Mechanisches Verhalten .....	56
3.2.2	Thermo-mechanisches Verhalten .....	60
3.2.3	Physikalisch-chemisches Verhalten .....	60
3.3	Schadensanalyse bei Polymerwerkstoffen .....	61
3.3.1	Prinzipielle Gesichtspunkte .....	61
3.3.2	Optische Begutachtung – Makroskopische Betrachtung .....	62
3.3.3	Mikroskopische Untersuchung .....	63
3.3.4	Differentialkalorimetrische Untersuchung .....	65
3.3.5	Physikalische Untersuchungen .....	66
3.4	Wertung der einzelnen Untersuchungsmethoden am Beispiel einiger Schadensfälle .....	67
3.5	Schlussbemerkung .....	78
3.6	Literatur .....	79
<b>4</b>	<b>Schadensuntersuchung und Schadensverhütung an spröden Werkstoffen, insbesondere Keramiken und Gläsern .....</b>	<b>80</b>
	<i>Axel Roßmann</i>	
4.1	Einleitung .....	80
4.2	Keramische Konstruktionswerkstoffe und Gläser .....	85
4.2.1	Werkstofftypen und wichtige Herstellungsprobleme .....	85
4.2.2	Werkstoffverhalten .....	87
4.3	Untersuchungsmethoden bei Schäden .....	89
4.3.1	Bauteilversuche .....	89
4.3.2	Rekonstruktion des Schadens .....	89
4.3.3	Bauteilberechnung .....	90
4.3.4	Bruchflächenuntersuchung .....	93
4.3.4.1	Makroskopische Untersuchung .....	93
4.3.4.2	Mikroskopische Bruchflächenuntersuchung .....	93
4.3.4.3	Kritische Fehlergröße .....	95
4.3.5	Keramografie .....	97
4.3.6	Zerstörungsfreie Prüfungen .....	98
4.4	Schadensverhütung .....	98
4.5	Literatur .....	99
<b>5</b>	<b>Brüche bei metallischen Werkstoffen.....</b>	<b>100</b>
	<i>Johann Grosch</i>	
5.1	Gewaltbruch metallischer Werkstoffe .....	102
5.1.1	Makroskopisch verformungsloser Gewaltbruch .....	103
5.1.2	Verformungsbruch .....	109
5.1.3	Einflussgrößen auf die Bruchausbildung .....	113
5.1.4	Literatur .....	119

5.2	Ermüdungsbruch metallischer Werkstoffe .....	120
5.2.1	Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe .....	120
5.2.2	Makroskopische Merkmale von Ermüdungsbruchflächen .....	123
5.2.3	Rasterelektronenmikroskopische Merkmale von Ermüdungsbruchflächen .....	129
5.2.4	Beispiele .....	132
5.2.5	Literatur .....	143

## **6 Schäden als Folge thermischer Beanspruchung ..... 145**

*André Werner, Axel Roßmann*

6.1	Einleitung .....	145
6.2	Schadensbilder und Schadensmechanismen infolge thermischer Beanspruchung .....	146
6.2.1	Schäden unter Temperatureinwirkung ohne weitere Beanspruchung ...	147
6.2.2	Schäden als Folge mechanisch-thermischer Beanspruchung .....	148
6.2.2.1	Kurzzeitbelastung (mechanisch-thermisch) .....	148
6.2.2.2	Zeitstandbelastung (mechanisch-thermisch) .....	152
6.2.2.3	Belastung bei niedriger Lastwechselzahl (Low Cycle Fatigue, LCF) ....	155
6.2.2.4	Belastung bei hoher Lastwechselzahl (High Cycle Fatigue, HCF) .....	158
6.2.3	Schäden als Folge chemisch-thermischer Beanspruchung .....	158
6.2.3.1	Hochtemperaturkorrosion (HTK) .....	158
6.2.3.2	Metallbrände .....	160
6.2.4	Schäden als Folge metallphysikalisch-thermischer Beanspruchung .....	161
6.3	Hinweise zur Schadenuntersuchung bei thermisch bedingten Schäden .....	163
6.3.1	Makroskopischer Befund .....	163
6.3.2	Metallografischer Befund .....	164
6.3.3	Elektronenoptischer Befund (REM) .....	164
6.4	Schadensverhütung, -vorbeugung und abhelfende Maßnahmen .....	165
6.5	Literatur .....	166

## **7 Schadenskunde der Schweißverbindungen ..... 167**

*Lothar Issler, Rolf Sinz*

7.1	Einführung .....	167
7.2	Gefügeausbildung beim Schweißen .....	169
7.3	Beanspruchungszustand an Schweißverbindungen .....	181
7.3.1	Spannungskategorien .....	181
7.3.2	Versagensanalyse .....	184
7.3.3	Eigenspannungen .....	186
7.4	Schweißfehler .....	189
7.4.1	Risse .....	189
7.4.2	Imperfektionen .....	200
7.5	Schäden im Betrieb .....	205
7.5.1	Sprödbruch .....	205
7.5.2	Schwingfestigkeitsversagen .....	207
7.5.3	Zeitstandversagen .....	208
7.5.4	Korrosionsschäden .....	209
7.6	Vermeidung von Schäden an Schweißverbindungen .....	210
7.7	Literatur .....	212

<b>8</b>	<b>Schäden an wärmebehandelten Bauteilen .....</b>	<b>214</b>
	<i>Johann Grosch</i>	
8.1	Allgemeines .....	214
8.2	Fehlerbereiche und Beispiele .....	215
8.3	Literatur .....	226
<b>9</b>	<b>Schadensanalysen in tribologischen Systemen an einem Beispiel aus der Automobilindustrie .....</b>	<b>227</b>
	<i>Andreas Vogt</i>	
9.1	Einleitung .....	227
9.2	Kurze Einführung in die Tribologie .....	227
9.2.1	Begriffe und Definitionen .....	227
9.2.2	Das tribologische System .....	228
9.3	Verschleiß als Schadensursache .....	230
9.3.1	Verschleißerscheinungsformen, Verschleißmechanismen und Verschleißarten .....	230
9.3.2	Abrasion .....	231
9.3.3	Adhäsion .....	232
9.3.4	Oberflächenzerrüttung oder Ermüdung .....	232
9.3.5	Tribochemische Reaktionen .....	234
9.4	Schadensanalyse bei tribologischen Schäden .....	235
9.4.1	Beispielsystem für eine Schadensanalyse: Kugelventil in einem Common Rail Injektor .....	236
9.4.2	Fehlerbeschreibung .....	238
9.4.3	Erfassung und Beschreibung des Tribosystems .....	239
9.4.4	Einzeluntersuchungen an den Elementen des Tribosystems .....	241
9.4.5	Maßnahmen zur Schadenshilfe .....	245
9.5	Zusammenfassung .....	245
9.6	Literatur .....	246
<b>10</b>	<b>Methoden für die Schadensanalytik in der Tribologie .....</b>	<b>247</b>
	<i>Jeanette Kopp</i>	
10.1	Einleitung .....	247
10.2	Methoden zur Charakterisierung von Verschleiß .....	247
10.2.1	Mikroskopie .....	250
10.2.2	Topografie .....	252
10.2.3	Chemische Analysen .....	255
10.2.4	Bestimmung mechanischer Eigenschaften und Gefügeanalyse .....	258
10.3	Beispiele für Verschleißmechanismen .....	261
10.3.1	Abrasion .....	262
10.3.2	Adhäsion .....	264
10.3.3	Zerrüttung, plastische Deformation und Kavitationserosion .....	265
10.3.4	Tribochemische Reaktionen .....	269
10.4	Abschließende Gedanken .....	271
10.5	Empfehlenswerte, weiterführende Literatur .....	271

<b>11</b>	<b>Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen .....</b>	<b>272</b>
<i>Bernd Thoden</i>		
11.1	Allgemeines .....	272
11.2	Grundlagen der Korrosion metallischer Werkstoffe .....	273
11.3	Korrosionsarten ohne mechanische Belastung .....	277
11.3.1	Gleichmäßige Flächenkorrosion .....	278
11.3.2	Muldenkorrosion .....	279
11.3.3	Lochkorrosion .....	279
11.3.4	Spaltkorrosion.....	285
11.3.5	Kontaktkorrosion (Bimetallkorrosion).....	286
11.4	Korrosionsarten mit mechanischer Belastung .....	288
11.4.1	Spannungsrisskorrosion (SpRK).....	288
11.4.2	Schwingungsrisskorrosion .....	294
11.5	Literatur .....	296
<b>Verzeichnis von Autorin und Autoren .....</b>		<b>298</b>