

Herausgegeben von Günter Lange und Michael Pohl

Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle

Sechste Auflage



*Herausgegeben von
Günter Lange und
Michael Pohl*

**Systematische Beurteilung
technischer Schadensfälle**

**Beachten Sie bitte auch weitere interessante Titel
zu diesem Thema**

Biermann, H., Krüger, L. (Hrsg.)

**Moderne Methoden der
Werkstoffprüfung**

2014

978-3-527-33413-1

Fischer, K., Günther, W.

**Technische Mechanik
Zweite Auflage**

2013

978-3-527-33381-3

Callister, W. D., Rethwisch, D. G.

**Materialwissenschaften und
Werkstofftechnik**

Eine Einführung

2012

978-3-527-33007-2

Worch, H., Pompe, W.,
Schatt, W. (Hrsg.)

Werkstoffwissenschaft

Zehnte Auflage

2011

978-3-527-32323-4

Oettel, H., Schumann, H. (Hrsg.)

Metallografie

**Mit einer Einführung in die
Keramografie
15. Auflage**

2011

978-3-527-32257-2

Krzyzanowski, M., Beynon, J.H.,
Farrugia, D.C.

**Oxide Scale Behavior in
High Temperature Metal
Processing**

2010

978-3-527-32518-4

Christ, H.-J.

**Ermüdungsverhalten
metallischer Werkstoffe**

Zweite Auflage

2009

978-3-527-31340-2

Krenkel, W. (Hrsg.)

Verbundwerkstoffe

**17. Symposium Verbundwerkstoffe
und Werkstoffverbunde**

2009

978-3-527-32615-0

Herausgegeben von

*Günter Lange und
Michael Pohl*

Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle

Sechste Auflage

WILEY-VCH
Verlag GmbH & Co. KGaA

Autor

Prof. Günter Langej
38106 Braunschweig

Prof. Michael Pohl
Ruhr-Universität Bochum
Inst.Werkstoffe, Geb. IA 1/152
Universitätsstr. 150
44801 Bochum

6. Auflage 2014

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung

**Bibliografische Information
der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2014 Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Satz Reemers Publishing Services GmbH, Krefeld
Druck und Bindung Markono Print Media Pte Ltd, Singapore
Umschlaggestaltung Formgeber

Print ISBN: 978-3-527-32530-6
oBook ISBN: 978-3-527-68316-1
ePDF ISBN: 978-3-527-68322-2
ePub ISBN: 978-3-527-68321-5
mobi ISBN: 978-3-527-68320-8

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 6. Auflage XIII

Vorwort zur 1. Auflage XV

1	Vorgehensweise bei der Bearbeitung eines Schadensfalles	1
1.1	Aufgaben und Ziele der Schadensanalyse	1
1.2	Vorgehensweise	2
1.3	Schadensaufnahme und Beweissicherung	2
1.4	Informationen über den Schadensfall	3
1.5	Durchführung	4
2	Einteilung, Ursachen und Kennzeichen der Brüche	13
2.1	Brucharten	13
2.2	Definitionen der Brucharten	14
2.3	Bruchursachen	18
2.4	Allgemeine Kennzeichen für Bruch- und Beanspruchungsart	20
3	Werkstoffuntersuchungen	25
3.1	Mechanische Werkstoffprüfung	26
3.2	Metallografische Werkstoffuntersuchungen	35
3.3	Chemische Werkstoffuntersuchungen	39
3.4	Zerstörungsfreie Werkstoffuntersuchungen	39
3.5	Bewertung und Messungen von Eigenspannungen	44
4	Elektronenmikroskopie bei der Schadensanalyse	49
4.1	Systematik elektronenmikroskopischer Schadensanalyse	49
4.2	Grundlagen der Elektronenmikroskopie	50
4.3	Geräte	52
4.3.1	Transmissionselektronenmikroskop (TEM)	52
4.3.2	Rasterelektronenmikroskop (REM) und Mikrosonde (MS)	54
4.3.3	Elektronenstrahlmikroanalyse (ESMA)	56
4.3.3.1	Wellenlängendispersive Spektrometer	56

4.3.3.2	Energiedispersive Spektrometer (EDS)	58
4.3.3.3	Anwendung der ESMA	58
4.3.4	Rückstreu-Elektronenbeugung (Electron Backscattered Diffraction, EBSD)	59
4.3.5	Weitere Analyseverfahren	62
4.3.6	Abbildungsverfahren	65
4.3.6.1	Sekundärelektronenabbildung	65
4.3.6.2	Rückstreuelektronenabbildung	66
4.4	Präparations- und Untersuchungsverfahren	68
4.4.1	Oberflächenuntersuchungen	69
4.4.2	Untersuchungen des Werkstoffinneren	69
4.4.3	Fraktografische Untersuchungen	72
4.4.4	Focussed Ion Beam (FIB)	73
4.4.5	Untersuchung von Pulvern	73
4.4.6	TEM-Untersuchungen	75
4.4.7	Quantitative Bildanalyse	76
4.4.8	Quantitative Elektronenstrahlmikroanalyse	76
4.5	Zusammenfassung	77
5	Mikroskopische und makroskopische Erscheinungsformen des duktilen Gewaltbruches (Gleitbruch)	79
5.1	Definition und Erscheinungsformen	79
5.2	Trichter-Kegel-Bruch	81
5.3	Fräserförmiger Bruch	90
5.4	Scherbruch	91
5.5	Ausziehen zur Spitze	96
5.6	Einfluss von Werkstoff und Beanspruchung auf die Wabenform	97
6	Makroskopische und mikroskopische Erscheinungsformen des Spaltbruches	103
6.1	Einleitung	103
6.2	Phasen des Bruchvorganges	103
6.3	Kennzeichnung von Spaltbrüchen	104
6.4	Makroskopische Bruchmerkmale	104
6.5	Mikroskopische Bruchmerkmale	106
6.5.1	Transkristalliner Spaltbruch	107
6.5.2	Interkristalliner Spaltbruch	113
6.5.3	Mischbrüche	115
6.5.4	Spaltbrüche in martensitischen Werkstoffzuständen	115
6.5.5	Verwechslungsmöglichkeiten	116
6.5.6	„Quasi-Spaltbruch“	118
6.6	Bauteilversagen durch Spaltbruch	120

- 7 Makroskopisches und mikroskopisches Erscheinungsbild des Schwingbruches 127**
 - 7.1 Definition und generelle Bemerkungen 127
 - 7.2 Makroskopisches Erscheinungsbild 128
 - 7.2.1 Anriss 128
 - 7.2.2 Schwingungsriß 136
 - 7.2.3 Restbruch 137
 - 7.2.4 Charakteristische Bruchflächen 138
 - 7.3 Abhilfemaßnahmen 139
 - 7.4 Mikroskopische Mechanismen und Topografien 140
 - 7.5 Beispiele 159
 - 7.5.1 Steifigkeitssprünge 159
 - 7.5.2 Oberflächenfehler 176
 - 7.5.3 Schwingbrüche an ausgewählten Bauteilen 191
 - 7.5 Anhang 219
 - 7.5.3 Analyse von 250 Schadensfällen an Luftfahrzeugen 219

- 8 Thermisch induzierte Brüche 221**
 - 8.1 Anforderungen an Werkstoffe für den Einsatz bei erhöhter Betriebstemperatur 221
 - 8.2 Warmfestigkeit 221
 - 8.2.1 Brandschäden 223
 - 8.3 Kaltrisse 225
 - 8.3.1 Aufhärtungsrisse 225
 - 8.3.2 Unterplattierungsrisse 226
 - 8.4 Heißrisse 228
 - 8.4.1 Erstarrungsrisse 228
 - 8.4.2 Aufschmelzungsrisse 228
 - 8.4.3 Heißrisserverursachende Phasen 231
 - 8.5 Zeitstandfestigkeit 231
 - 8.5.1 Gefügeveränderungen 233
 - 8.5.2 Zeitstandporen 237
 - 8.5.3 Zeitstandbrüche 241
 - 8.5.4 Restlebensdauer 243
 - 8.6 Härterisse 245
 - 8.7 Thermische Ermüdung 245
 - 8.8 Zusammenfassung 248

- 9 Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen ohne mechanische Belastung 251**
 - 9.1 Einleitung 251
 - 9.2 Korrosion 252
 - 9.3 Korrosionserscheinungsformen ohne mechanische Belastung 261
 - 9.3.1 Gleichmäßige Flächenkorrosion 261
 - 9.3.2 Muldenkorrosion 262

- 9.3.3 Lochkorrosion 262
- 9.3.4 Spaltkorrosion 265
- 9.3.5 Kontaktkorrosion (galvanische Korrosion) 266
- 9.3.6 Taupunktkorrosion 267
- 9.3.7 Stillstandskorrosion 267
- 9.3.8 Sauerstoffkorrosion 268
- 9.3.9 Selektive Korrosion 268
- 9.3.9.1 Interkristalline Korrosion 268
- 9.3.9.2 Spongiose 271
- 9.3.9.3 Entzinkung 272
- 9.3.10 Mikrobiologische Korrosion 272
- 9.4 Untersuchungen zum Korrosionsverhalten 272

10 Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen bei überlagerter mechanischer Beanspruchung 277

- 10.1 Einleitung 277
- 10.2 Rissbildende Korrosionsarten 277
- 10.2.1 Anodische Spannungsrisskorrosion 278
- 10.2.1.1 Schadensbeispiele 281
- 10.2.2 Schwingungsrisskorrosion 287
- 10.2.2.1 Schadensbeispiel 288
- 10.2.3 Dehnungsinduzierte Spannungsrisskorrosion 289
- 10.2.3.1 Schadensbeispiel 290
- 10.2.4 Lotrissigkeit 291
- 10.2.4.1 Schadensbeispiel 291
- 10.2.5 Kathodische Spannungsrisskorrosion 292
- 10.2.5.1 Schadensbeispiele 294
- 10.3 Erosionskorrosion 296
- 10.3.1 Strömungsbeeinflusste Korrosion 296
- 10.3.2 Flüssigkeitsaufprallerosion, Tropfenschlag 298
- 10.4 Kavitationskorrosion 299
- 10.4.1 Schadensbeispiele 300
- 10.5 Reibkorrosion 302
- 10.6 Schlussbemerkung 304

11 Schäden durch Wasserstoff 307

- 11.1 Vorbemerkung 307
- 11.2 Atomarer und molekularer Wasserstoff 307
- 11.2.1 Thermodynamische Gleichgewichte 307
- 11.2.2 Kinetik 310
- 11.2.3 Effusion 311
- 11.3 Schadensarten 313
- 11.3.1 Verzögerter Bruch und Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion (H-ind. SCC) 314
- 11.3.2 Fischaugen und Flocken 318

- 11.3.3 Beizblasen und HICs 323
- 11.3.4 Methanbildung 323
- 11.4 Beispiele 323
- 11.5 Verwechslungsmöglichkeiten 337
- 11.6 Wasserstoffempfindlichkeit verschiedener metallischer Werkstoffe 339
- 11.6 Anhang (Verwendete Größen und Gleichungen) 343

- 12 Schäden durch Hochtemperaturkorrosion 345**
 - 12.1 Allgemeine Bemerkungen 345
 - 12.2 Thermodynamik und Kinetik 346
 - 12.2.1 Gleichgewichte 346
 - 12.2.2 Wachstum und Struktur 349
 - 12.3 HTK in heißen Gasen 350
 - 12.3.1 Oxidation 350
 - 12.3.1.1 Zunderbeständigkeit durch Legieren 354
 - 12.3.1.2 Innere Oxidation 356
 - 12.3.2 Aufkohlung (Innere Karbidbildung) 357
 - 12.3.2.1 Aufkohlende Gase 358
 - 12.3.2.2 Selbstaufkohlung 360
 - 12.3.3 Wasserstoffangriff 362
 - 12.3.3.1 Druckwasserstoffangriff oberhalb 200 °C auf Stahl 362
 - 12.3.3.2 Wasserstoffkrankheit bei Kupfer 363
 - 12.3.4 Schwefelung 363
 - 12.3.4.1 Schwefelaktivität von Gasen 363
 - 12.3.4.2 Stabilisierung der oxidischen Schutzschicht 364
 - 12.4 HTK unter Ablagerungen 365
 - 12.4.1 HTK an Überhitzerberohrungen steinkohlengefeuerter Dampferzeuger 366
 - 12.4.2 HTK an Gasturbinenschaufeln 369
 - 12.5 HTK in Metallschmelzen 371

- 13 Werkstoffschäden durch Verschleiß 375**
 - 13.1 Grundlagen zum Verschleißverhalten von Werkstoffen 375
 - 13.2 Tribosystem 376
 - 13.3 Verschleißarten und Verschleißmechanismen 380
 - 13.3.1 Verschleiß durch Abrasion 381
 - 13.3.2 Verschleiß durch Adhäsion 384
 - 13.3.3 Verschleiß durch tribochemische Reaktion 385
 - 13.3.4 Verschleiß durch Oberflächenermüdung 394
 - 13.4 Verschleißschutzschichten 395
 - 13.4.1 Verfahren zur Untersuchung von Verschleißschutzschichten 398
 - 13.4.2 Galvanisch abgeschiedene Chromschichten 399
 - 13.4.3 Außenstromlos abgeschiedene Nickelschichten 399
 - 13.5 Zusammenfassung 401

14	Schäden an Schweißnähten	405
14.1	Einleitung	405
14.2	Werkstoffbeeinflussung durch den Schweißprozess	406
14.3	Rissbereiche in Schweißkonstruktionen	406
14.3.1	Schwachstellen	407
14.3.2	Risslagen	409
14.4	Rissarten in Schweißverbindungen	410
14.4.1	Fertigungsrisse	410
14.4.1.1	Heißrisse	411
14.4.1.2	Kaltrisse	417
14.4.1.3	Lamellenrisse	424
14.4.1.4	Relaxationsrisse	430
14.4.2	Betriebsrisse	436
14.4.2.1	Betriebsrisse infolge Überbeanspruchung	436
14.4.2.2	Betriebsrisse – ausgehend von Schweißfehlern	441
14.5	Schlussbetrachtung	442
15	Bruchmechanik in der Schadensanalyse	447
15.1	Einleitung	447
15.2	Stabile, instabile und unterkritische Rissausbreitung	447
15.3	Spannungsintensitätsfaktor	449
15.3.1	Definition	449
15.3.2	Die wirksamen Spannungen	450
15.3.3	Oberflächenrisse	451
15.3.4	Spannungsintensitätsfaktoren für beliebige Belastungen	452
15.4	Anwendungsbereich der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM)	453
15.5	Zusammenhang zwischen kritischer Risslänge und kritischer Spannung	453
15.6	Unterritisches Risswachstum bei wechselnder Belastung	454
15.7	Unterritisches Risswachstum bei konstanter Belastung und aggressiver Umgebung	456
15.8	Lebensdauerberechnung	456
15.9	Korrelation Bruchlinienabstand – mittlere Rissgeschwindigkeit	457
15.10	Korrelation Bruchlinienabstand $-\Delta K$	458
15.11	Versagen durch plastische Instabilität	459
15.12	Die Zwei-Kriterien-Methode	461
15.13	Anwendungsbeispiel: Behälter unter Innendruck	462
15.14	Bruchmechanische Schadensbewertung	465
16	Schäden an Druckbehältern	469
16.1	Zusammenfassung	469
16.2	Problemstellung	469
16.3	Risikobewertung mittels Bruchmechanik	473
16.4	Fallstudien	476

- 16.4.1 Unfall mit Sauerstoffflasche 476
- 16.4.2 Unfall mit Acetylenflasche 480
- 16.4.3 Katastrophe mit Flüssiggastankwagen 482
- 16.5 Folgerungen 485

- 17 Schadensuntersuchungen und Problemlösungen mit Oberflächenanalytik 487**
- 17.1 Einleitung 487
- 17.2 Oberflächenempfindliche Untersuchungsmethoden 487
- 17.3 Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES) 489
 - 17.3.1 Physikalische Grundlagen 489
 - 17.3.2 Scanning Auger Microscope (SAM) 491
- 17.4 Röntgen-Fotoelektronen-Spektroskopie (XPS, ESCA) 492
 - 17.4.1 Physikalische Grundlagen 492
 - 17.4.2 ESCA-Anlage 493
- 17.5 Anwendungsbeispiele 494
 - 17.5.1 Kadmium-Versprödung der Bolzen aus der Triebwerksaufhängung eines Großraumflugzeugs 494
 - 17.5.2 Beschädigter Drucksensor 496
 - 17.5.3 Oberflächenkontamination bei einer Hochfrequenz-Empfangsspule 500
 - 17.5.4 Haftung von diamantartigen Kohlenstoffschichten auf Implantaten 502
 - 17.5.5 Oberflächenanalyse einer Hüftgelenkprothese 505
- 17.6 Zusammenfassung 507

- 18 Schwingungsrisse bei der dynamischen Prüfung von Seilbahnkomponenten 511**
- 18.1 Einleitung 511
- 18.2 Seilbahnsysteme 511
- 18.3 Fahrzeugkomponenten bei Umlaufseilbahnen 513
- 18.4 Betriebsbelastungen 514
- 18.5 Europäische Normen für Seilbahnfahrzeuge 515
- 18.6 Beispiele aus der Praxis 517
 - 18.6.1 Beispiele zu Spannungskonzentrationen 518
 - 18.6.1.1 Kuppelbare Seilklemme 518
 - 18.6.1.2 Gehängestange 520
 - 18.6.1.3 6-Personen-Kabinenstruktur 520
 - 18.6.1.4 3-Personen-Sesselfahrzeug 521
 - 18.6.2 Beispiele zu Schweißeigenstressspannungen und Steifigkeitsänderungen 522
 - 18.6.2.1 6-Personen-Kabinenfahrzeug 522
 - 18.6.2.2 4-Personen-Kabinenfahrzeug 524
 - 18.6.2.3 Gehängerahmen eines Seilbahnfahrzeuges 525
 - 18.6.3 Versagensbeispiele infolge Reibkorrosion 526
 - 18.6.3.1 Allgemeines 526
 - 18.6.3.2 4-Personen-Sesselfahrzeug 527

XII | *Inhaltsverzeichnis*

- 18.6.3.3 8-Personen-Seilbahnkabine 529
- 18.6.4 Versagensbeispiel infolge Montagespannungen 531
- 18.6.5 Versagensbeispiel infolge Spannungsrisskorrosion 534

Stichwortverzeichnis 539

Vorwort zur 6. Auflage

Der technische Fortschritt, aber auch die Weiterentwicklung der Schadensanalyse bieten Anreize für Neuauflagen dieses Buches.

Meinem Freund Günter Lange, mit dem ich rd. 100 Schadensanalyse-Seminare in Europa sowie in Brasilien, USA, China und Korea abgehalten habe, war es ein großes Anliegen, das Buch stets aktuell zu halten. Leider hat er die Fertigstellung dieser vollständig überarbeiteten Auflage, an der er bis zuletzt gearbeitet hat, nicht mehr erleben können. Er verstarb am 1. Dezember 2012 in Braunschweig.

Für die 6. Auflage wurden die Beiträge analog zu der Weiterentwicklung des gleichnamigen Seminars in unterschiedlichem Maße überarbeitet und erweitert, wofür z. T. nun andere Autoren verantwortlich zeichnen. Bewährtes bleibt erhalten, Neues wurde hinzugefügt.

Möge dieses Buch seinen Nutzern eine hilfreiche Informationsquelle sein. Dem Neueinsteiger diene es als Leitfaden durch den Dschungel der Schadensanalyse und dem Etablierten als gern benutztes Nachschlagewerk. Mancher Besitzer der 1. bis 5. Auflage könnte sich veranlasst sehen, sein geschätztes Buch zu aktualisieren.

Bochum, Januar 2014

Michael Pohl

Vorwort zur 1. Auflage

Verstöße gegen grundlegende Regeln für den Einsatz metallischer Werkstoffe verursachen einen erheblichen Teil der technischen Schadensfälle. Seltener versagen Bauteile infolge eines komplexen Zusammenwirkens unvorhersehbarer Einflüsse. Auch Werkstofffehler führen – entgegen einer weitverbreiteten Ansicht – nur vereinzelt zur Funktionsunfähigkeit von Maschinen, Anlagen oder Konstruktionselementen.

Um die Grenzen bei der Verwendung von Metallen und Legierungen zu verstehen und ggf. modifizieren zu können, müssen die werkstoffkundlichen Vorgänge bekannt sein, die bei Überbeanspruchung und Zerstörung eines Materials ablaufen. Diese Kenntnisse über den Werkstoff sind gleichermaßen für den Konstrukteur wie für den Bearbeiter von Schadensfällen wichtig. Einerseits kann dadurch die Zahl der auftretenden Schäden von vornherein begrenzt werden, andererseits schließen die umfassende Aufklärung und die gezielte Rückwirkung auf Konstruktion, Werkstoffwahl, Fertigung, Prüfung und Beanspruchungsbedingungen weitere Fälle ähnlicher Art weitgehend aus.

Das Schwergewicht dieses Buches liegt auf der Erläuterung werkstoffkundlicher Zusammenhänge. Nach einer Einführung in die Methodik der Schadensanalyse und in die verschiedenen Untersuchungsverfahren werden die Bildungsmechanismen der einzelnen Brucharten sowie die Zerstörungsvorgänge bei Korrosion und Verschleiß in Abhängigkeit von Werkstoff- und vom Beanspruchungszustand dargestellt. Die makroskopischen und die mikroskopischen Erkennungsmerkmale werden aus den Mechanismen abgeleitet. Spezielle Kapitel sind der Bruchmechanik, den Schäden an Schweißnähten und dem Wasserstoff gewidmet. Beispiele sollen die Materie veranschaulichen und den direkten Bezug zur Praxis herstellen.

Braunschweig, Januar 1983

G. Lange

1

Vorgehensweise bei der Bearbeitung eines Schadensfalles

Günter Lange

1.1

Aufgaben und Ziele der Schadensanalyse

Die Schadensanalyse soll in erster Linie die Ursachen für das Versagen eines Bauteils klären und die dabei ablaufenden Mechanismen aufdecken. Sie dient darüber hinaus der Verhütung weiterer Schäden durch ihre Rückwirkung auf Konstruktion, Werkstoffwahl, Fertigungsprozesse, Prüfverfahren und Betriebsbedingungen sowie durch Inspektion und ggf. Austausch gefährdeter Bauteile im Betrieb befindlicher Maschinen, Apparate, Geräte und Anlagen. Unerwartetes Materialverhalten kann gelegentlich Forschungsaktivitäten anregen (Abb. 1.1).

Aufgrund der außerordentlichen Vielfalt der Schadensursachen und -erscheinungsformen können im vorliegenden Rahmen nur grundsätzliche Bearbeitungsrichtlinien und Beurteilungskriterien behandelt werden. Sinngemäß für das jeweilige Einzelereignis modifiziert, dürften sie sich für die größte Zahl der Schadensfälle erfolgreich anwenden lassen.

Aufgaben und Ziele

Aufklärung eines bestimmten Falles (post-mortem)

Schadensverhütung (ante mortem)

- ⇒ Konstruktion, Werkstoffwahl, Fertigung,
Prüfung, Betriebsbedingungen
- ⇒ Inspektion, Austausch

Anregungen für **Forschungsaktivitäten**

Abb. 1.1 Aufgaben und Ziele der Schadensanalyse.

1.2

Vorgehensweise

Die Vorgehensweise gleicht der in der Medizin: Anamnese, Diagnose, Therapie (Tab. 1.1). Wird ein detaillierter Leitfaden gewünscht, so empfiehlt sich die VDI-Richtlinie 3822 [1]. Sie führt in logischen Schritten von Schadensbeschreibung und Bestandsaufnahme über Schadenshypothese(n), Instrumentelle Analysen und Untersuchungsergebnisse zu Schadensursache(n), Abhilfe und Bericht mit abschließendem Wissensmanagement. Unabhängig davon hat der Verfasser in den nachfolgenden Abbildungen 1.2 bis 1.4 sowie Tabelle 1.1 eine Reihe von Punkten zusammengestellt, die sich im Rahmen seiner 50-jährigen Gutachtertätigkeit als maßgeblich erwiesen haben.

1.3

Schadensaufnahme und Beweissicherung

Als erster Schritt sollten die Spuren des Schadensfalles gesichert werden (Abb. 1.2). Nicht nur bei Flugzeugabstürzen, Explosionen usw. sollte man möglichst sämtliche Bruchstücke bergen. Auch beim üblichen „2-Teile-Schaden“ empfiehlt es sich, beide Bruchflächen einzubeziehen, vertretbarer Aufwand für deren Ausbau vorausgesetzt. Eine der Bruchflächen (Datenträger!) enthält nicht selten Topografie- oder Gefügehinweise, die auf der Gegenfläche fehlen (Ausscheidungen, Lunker u. a. m.). Weitaus gravierende Differenzen beider Seiten resultieren aus nachträglichen mechanischen Beschädigungen oder unterschiedlichen Korrosionszuständen.

Frische Bruchflächen sind reaktionsfreudig und müssen vor (weiterer) Korrosion geschützt werden: Exsikkator, zumindest trockene Raumluft, Sprühlack (sofern später keine Korrosionsprodukte zu analysieren sind). Bruchflächen niemals berühren! Rostbeläge lassen sich zwar mit Desoxidationsmitteln (Wardox, warme

Tabelle 1.1 Vorgehen bei der Schadensfallbearbeitung.

VORGEHENSWEISE *)

Anamnese	Diagnose	Therapie
<u>Beweissicherungsverfahren</u>	<u>Bestimmung der Bruchart</u> (SEP 1100, VDI 3822)	<u>Abhilfeempfehlungen</u>
(Artefakte)	+ ggf. <u>metallografische</u> <u>mechanische</u> <u>chemische</u> <u>zerstörungsfreie</u> Prüfverfahren	

* bauteilunabhängig, auftraggeberunabhängig

Zitronensäure u. a. m.) ablösen, die Original-Topografie wird jedoch infolge des lokal unterschiedlichen Korrosionsangriffes bestenfalls näherungsweise reproduziert.

Fotografische Aufnahmen („Schadensteil in Anlieferungszustand“) sind fast immer erforderlich (Maßstab, charakteristische Bauteilabmessungen festhalten). Sie dienen nicht nur der Dokumentation (Untersuchungsbericht); nicht selten werden im Verlauf der Untersuchung nach Zerschneiden des Bauteils Erkenntnisse gewonnen, die eine erneute Beurteilung des Original-Schadenzustandes nahelegen. Ein zusätzlicher Ausdruck erweist sich häufig als nützlich, um die Entnahmepositionen von Proben oder Schnittstellen einzuzeichnen.

Wird der Schaden unmittelbar am Entstehungsort inspiziert – im Gegensatz zu einem eingereichten Schadensteil –, so ist das makroskopische Erscheinungsbild des augenblicklichen Bruchzustandes zu bewerten. Gesamteindruck und Begleitumstände des Schadens sowie Zeugenaussagen sind festzuhalten. Kann der Gutachter das Schadensteil bzw. den betroffenen Abschnitt nicht mitnehmen, sind detaillierte Anweisungen für den Ausbau oder das Herausarbeiten von Teilen für die Untersuchung erforderlich, um nachträgliche Veränderungen zu vermeiden (z. B. Schnitte mit Schneidbrenner oder Trennscheibe nur in genügendem Abstand von der Bruchfläche, evtl. Kühlung ohne Benetzung der Bruchflächen). Die Kennzeichnung herauszutrennender Bauteilabschnitte mit dem Schlagstempel schützt gegen Vertauschen der Teile; bei Bedarf sollte der Entnahmebereich in Skizze oder Zeichnung festgehalten werden.

1.4

Informationen über den Schadensfall

Ausführliche, zuverlässige Informationen vereinfachen die Schadensuntersuchung erheblich und verhindern häufig Fehlbeurteilungen. Die Richtigkeit einer garantierten Eigenschaft lässt sich zudem meist leicht überprüfen; nach-

Beweissicherung

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Beide (sämtliche) Bruchflächen sicherstellen - Korrosionsanfällige Bruchflächen schützen <ul style="list-style-type: none"> → Exsikkator, Sprühlack (Vorsicht bei Korrosionsprodukten) | <ul style="list-style-type: none"> - Fotografische Aufnahmen anfertigen, notfalls Skizzen. Maßstab ! - Makroskopische Beurteilung der Brüche - Gesamteindruck, Begleitumstände, Zeugenaussagen - Genaue Anweisungen zum Ausbau von Teilen oder zur Entnahme von Proben → keine Veränderungen ! - Kennzeichnung zu entnehmender Teile |
|--|---|
- ⇒ Bruchflächen nie berühren !

Abb. 1.2 Beweissicherung.

Information über den Schadensfall

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – Werkstoffart – Wärmebehandlung – Herstellung, Fertigung, Abnahme – Konstruktion, Arbeitsweise, Belastung, Dimensionierung, Änderungen, ... – Funktion und Position des Bauteils im Gesamtsystem → „Fernwirkung“ beachten | <ul style="list-style-type: none"> – Betrieblicher Lebenslauf: Alter, Betriebsdauer, Vorschäden, Reparaturen, Inspektionen, Änderungen, Stillstand, ... – Umgebungsbedingungen – Betriebsbedingungen bei Schadenseintritt – Unfallablauf – Folgeereignisse: Folgeschäden, Lagerung, Voruntersuchung |
|--|--|

Abb. 1.3 Informationen über den Schadensfall.

trägliche Bestimmungen unbekannter Größen sind dagegen aufwendig (und werden gelegentlich angezweifelt).

Als nützlich haben sich die in Abbildung 1.3 zusammengestellten Angaben erwiesen (fehlerhafte Auskünfte einkalkulieren). Erfahrungsgemäß steht dem Gutachter meist nur ein bescheidener Teil dieser Angaben zur Verfügung. Häufig sind daher verschiedene dieser Punkte Gegenstand der Untersuchung. (Zwei bezeichnende Fälle werden am Schluss dieses Kapitels erläutert.)

1.5

Durchführung

Vorgehensweise und Umfang sollten mit dem Antragsteller abgestimmt werden (Abb. 1.4). Vielfach wird vom Gutachter ein rasch und kostengünstig erarbeiteter Abhilfeschlag erwartet, jedoch keine fundamentale Klärung aller Schadensumstände. Auf die Grenzen der Verfahren ist hinzuweisen, besonders bei Wünschen nach speziellen Untersuchungsmethoden. Rückfragen ergeben im Übrigen häufig, dass sich die geforderte Prüfung zur Klärung des vorliegenden Schadensfalles in keiner Weise eignet. Einzeluntersuchungen, die ohne Erläuterung des Gesamtzusammenhangs verlangt werden, erweisen sich gewöhnlich als nutzlos (beantragt wird eine chemische Analyse, tatsächlich gesucht werden die Ursachen eines Schwingbruches).

Das Untersuchungsprogramm ist – unter Beachtung des gesamten Umfeldes – sorgfältig zu planen, so dass keine Indizien zerstört werden, die man zu einem späteren Zeitpunkt noch benötigen könnte. Das Verfahren muss sich auch dann noch fortsetzen lassen, wenn ein Test die aktuelle Arbeitshypothese nicht bestätigt und neue Möglichkeiten in Betracht gezogen werden müssen. (Aus dem Kopf

Durchführung

Abb. 1.4 Durchführung der Schadensanalyse.

Abstimmung mit dem Auftraggeber

Strategie (Fließbilder, Programme, ...)

- ⇒ **konservative (indizienschonende)
Vorgehensweise**
- ⇒ **negative Teilresultate einkalkulieren
(Iterationsprozess)**
- ⇒ **keine Veränderung durch
Untersuchung (Probenahme !)**
- ⇒ **gesamtes Umfeld beachten
(Fernwirkung)**

einer herausgearbeiteten Zugprobe lässt sich ein metallografischer Schliff anfertigen, aus einem Schliff kein Zugstab.) Fließbilder und Programme in der Literatur ignorieren häufig die begrenzte Masse des Schadensteiles.

Die Entnahme von Proben erfordert besondere Sorgfalt. Die Probe muss repräsentativ für die zu untersuchende Eigenschaft sein und darf diese beim Herauslösen nicht verändern (Gefügeänderung durch Erwärmen, Verlust von Graphit beim Herausarbeiten von Analysespänen aus Gusseisen usw.). Mehrere Proben müssen wegen latenter Verwechslungsgefahr deutlich gekennzeichnet und penibel verwahrt werden (z. B. einzeln in beschrifteten Klarsichttüten; niemals zwei Proben gleichzeitig aus ihren Tüten entnehmen). Bei moderater Probenzahl vereinfachen unterschiedliche geometrische Formen und Abmessungen die Zuordnung. Die Entnahmestellen sollten auf der Zeichnung oder auf Fotos markiert werden.

Besonders fehlinterpretationsgefährdet sind Proben für rastermikroskopische Untersuchungen; so kann z. B. energiedispersiv auf der Bruchfläche nachgewiesener Schwefel aus der Sparbeize vom Reinigen stammen, Titan oder Barium aus Farbresten (Markierungsstifte) und Kupfer von der Elektrode bei funkenerosiv herausgetrennten Abschnitten. Wegen der Gefahr des Überbeizens (Lochfraßteppich!) entrostet man sinnvoller Weise nicht gleichzeitig beide Bruchflächen; erhöhte Vorsicht erfordern verzinkte Stahlteile.

Bevor man sich mit dem Schadensteil im Einzelnen auseinandersetzt, sollte man sein Zusammenwirken mit anderen Bauteilen überprüfen. Mitunter werden einwandfreie Komponenten durch andere Teile eines Systems geschädigt, vgl. z. B. das Flugturbinenlaufrad in Abschnitt 7.5.3, „Schwingbrüche an ausgewählten Bauteilen“.

Die *Bestimmung der Bruchart* bildet in den meisten Fällen das Kernstück der Untersuchungen. Nicht selten reicht sie zur Klärung des Schadens aus. Art und individuelle Ausbildung des Bruches geben Hinweise auf den Beanspruchungszustand – teilweise auch auf den Werkstoffzustand – und damit auf die Ursachen

des Versagens. Vielfach erlaubt die Bruchart darüber hinaus, zwischen primärem Bruch und Folgeschäden zu unterscheiden.

In jedem Fall sollte man den Bruch zunächst *makroskopisch* beurteilen (Betrachtung mit bloßem Auge, Lupe oder mäßig vergrößerndem Stereomikroskop). Oftmals gestatten deutlich ausgeprägte makroskopische Merkmale, die Bruchart zweifelsfrei zu identifizieren (vgl. Kapitel 2, Abb. 2.7). Auch bei einer großen Zahl zerstörter Teile (z. B. Flugzeugabsturz, Explosion) können die möglicherweise unfallauslösenden Brüche nur durch eine makroskopische Betrachtung eingegrenzt werden. Abbildung 1.5 zeigt ein derartiges Beispiel, Abbildung 1.6 gibt die potenziell schadensverursachenden Teile mit mehr als 70 Bruchstellen wieder.

Erlaubt das makroskopische Bild keine oder nur eine unsichere Bestimmung der Versagensart, so schließt sich eine *mikroskopische Bruchbeurteilung* – normalerweise im Rasterelektronenmikroskop (REM) – an. Das trifft insbesondere zu für Teile mit kleinem Querschnitt oder dünnen Wandungen sowie für nachträglich



Abb. 1.5 Trümmer eines Hubschraubers. Im Hintergrund gleiches Modell im flugfähigen Zustand.



Abb. 1.6 Teile des Steuerungssystems, deren Versagen einen Absturz bewirkt haben könnte.

zerstörte Bruchflächen. Gelegentlich wünscht der Kunde entsprechende Aufnahmen. Über die Bestimmung der Bruchart hinaus liefert das Rasterelektronenmikroskop häufig wertvolle Zusatzinformationen, beispielsweise über Besonderheiten am Bruchausgangspunkt, den Ausbreitungsverlauf von Rissen oder über den Gefügestand. (Eine statistische Auswertung von ca. 400 Schadensuntersuchungen an Luftfahrzeugen ergab z. B. folgende Verteilung: bei 28 % aller Fragmente ließ sich die Bruchart anhand makroskopischer Merkmale eindeutig ermitteln, bei 41 % der Fälle wurde eine bestimmte Bruchart aufgrund des makroskopischen Bildes vermutet und durch die rastermikroskopische Untersuchung abgesichert, bei 30 % der Schäden erlaubte die makroskopische Betrachtung nur eine unsichere Aussage, so dass der Bruchtyp im Rasterelektronenmikroskop bestimmt werden musste. Zusätzliche Erkenntnisse wurden in 39 % aller Fälle gewonnen.)

Im Idealfall bestätigt das Ergebnis der mikroskopischen Untersuchungen den makroskopischen Befund. Befriedigen die Resultate nicht, so können *Simulationsversuche* weiterhelfen. Man entnimmt dem Schadensteil (notfalls mit angemessenem Vorbehalt einem Ersatzteil) Proben, zerstört sie unter betriebsähnlichen Bedingungen und vergleicht die Bruchmerkmale im REM mit dem Original. Gleichzeitig gewinnt man charakteristische Topografien für den vorliegenden Werkstoff im aktuellen Wärmebehandlungszustand. Bei unbekanntem Betriebsbedingungen erzeugt man an mehreren Proben die in Betracht kommenden Brucharten.

Je nach Art des Schadensfalles können verschiedene *Werkstoffuntersuchungen* erforderlich sein (Tab. 1.1). Sie geben Auskunft über Art und Zustand des Werkstoffes, insbesondere über Fehler und Abweichungen von garantierten Werten. Die wichtigsten Verfahren sind die *metallografische* Untersuchung, die *mechanische* Prüfung, die *chemische* Untersuchung und die *zerstörungsfreie* Prüfung. Fehlen Angaben über den vorschriftsmäßigen bzw. über den angestrebten Zustand, so empfehlen sich parallele Untersuchungen an gleichartigen Teilen anderer Anlagen bzw. an Ersatzteilen. Man entkräftet auf diese Weise das Argument, der Werkstoff sei zugegebenermaßen minderwertig, jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall ausreichender Qualität (s. Beispiel „Gewehr“ am Schluss dieses Kapitels).

Die routinemäßige Eingangskontrolle der chemischen Zusammensetzung hält der Verfasser für nicht erforderlich. Die Analyse ist meist korrekt und nur in Ausnahmefällen für den Schaden verantwortlich. Eventuelle Verdachtsmomente kristallisieren sich im Verlauf der Untersuchung heraus; im Rasterelektronenmikroskop überprüft man parallel zur Bruchbetrachtung ohnehin das energiedispersive Verteilungsdiagramm.

Vorgehensweise, Untersuchungsergebnisse und Schlussfolgerungen werden üblicherweise in einem *Schadensbericht* zusammengefasst. Der Bericht sollte (vorsichtig formulierte!) Empfehlungen für *Abhilfemaßnahmen* enthalten.

Zwei Beispiele sollen die schadensauslösende Wirkung nebensächlich erscheinender Einflüsse verdeutlichen. Die Axialverdichterräder langjährig bewährter Hubschrauberturbinen wurden scheinbar unwesentlich konstruktiv verändert: Am Rand der Scheibe wurde ein umlaufender Wulst angedreht, um beim Auswuchten auf einfache Weise Material abarbeiten zu können (Abb. 1.7 und 1.8).

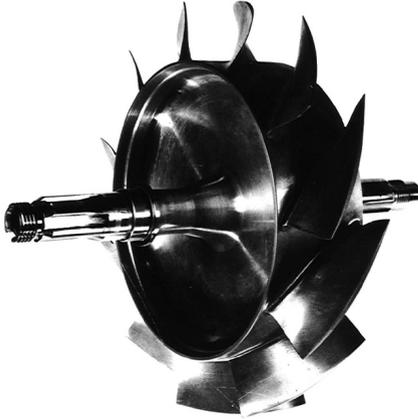


Abb. 1.7 Axialverdichterrad, gefertigt aus einem Stück. Außendurchmesser 180 mm.

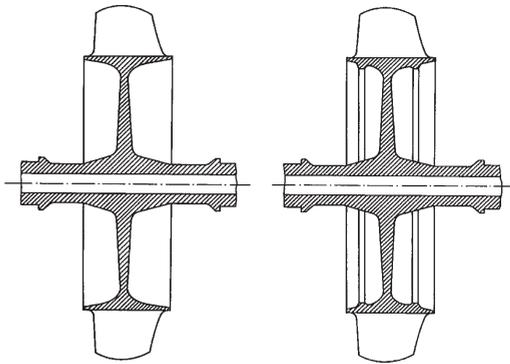


Abb. 1.8 Älteres, bewährtes Verdichterrad (links); nach Andrehen zweier Wuchtringe anfälliges Verdichterrad (rechts).



Abb. 1.9 Größeres Bruchstück eines Axialverdichterrades. Korrosionsspuren auf der Innenseite des Wuchtringes. Scheibendurchmesser 130 mm.

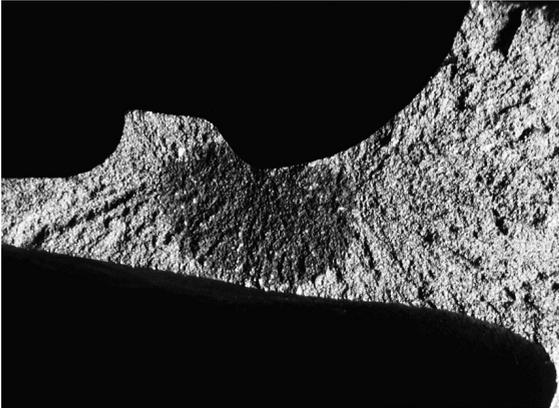


Abb. 1.10 Detail aus der Bruchfläche eines Verdichterrades. Dunkle Linse der interkristallinen (Spannungsriß-)Korrosion, ausgehend von der Senke neben dem Wuchtring.

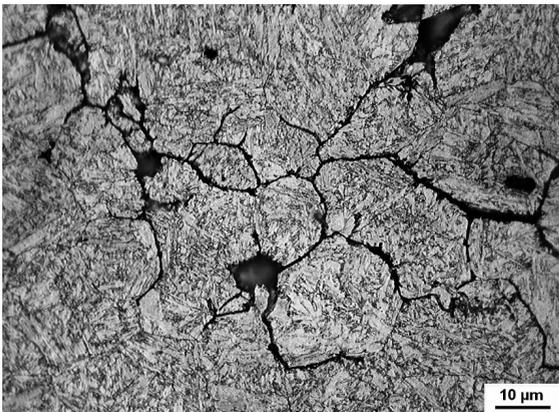


Abb. 1.11 Metallografischer Schliff, dicht neben der Bruchfläche. Interkristalline (Spannungsriß-)Korrosion. Vilella.

Nach ca. 1000 Betriebsstunden brachen in zwei Triebwerken diese mit 44 000 U/min umlaufenden Räder infolge interkristalliner Spannungsrißkorrosion (Abb. 1.9 bis 1.11); die übrigen geänderten Räder zeigten starke Angrifferscheinungen und wurden ausgetauscht. Der verwendete Stahl X15Cr13 war nicht normgerecht auf 700–750 °C, sondern zugunsten erhöhter Festigkeit nur auf 540 °C angelassen worden. Bei dieser relativ niedrigen Anlasstemperatur scheiden derartige ferritische Stähle Chromkarbide aus, die entlang der Korngrenzen zu zusammenhängenden chromverarmten Zonen führen. Der Stahl geht in einen extrem korrosionsanfälligen Zustand über (Sensibilisierung). Die aus der anströmenden Luft niedergeschlagene Feuchtigkeit wurde nach dem Andrehen des Wuchtringes nicht mehr abgeschleudert. Sie stauete sich auf der Innenseite des Wulstes und zerstörte

den sensibilisierten Stahl in diesem Bereich; vgl. [2]. Ein ähnlicher Schaden wird in [3] und [4] beschrieben.

Beim Schießen mit einer Repetierbüchse brachen mehrere Teile des Schlosses (Abb. 1.12 und 1.13), wodurch der Schütze schwer verletzt wurde. Aus dem Gewehr waren bereits etwa 50 Schüsse abgegeben worden, darunter mindestens einer mit ca. 30 % Überlast beim Hersteller. Der für die Beteiligten unverständliche Unfall konnte wie folgt aufgeklärt werden: Alle Schlossteile waren durch Spaltbrüche zerstört worden; der Werkstoff befand sich aufgrund fehlerhafter Wärmebehandlung in einem extrem spaltbruchanfälligen Zustand (Abb. 1.14). Die Waffe war im Juni erworben worden, der Unfall ereignete sich im November desselben Jahres bei einer Temperatur von +1 °C. Der Temperaturrückgang hatte die ohnehin geringe Duktilität des Werkstoffes nochmals erheblich vermindert (Steilabfall der Kerbschlagzähigkeit) und damit die Voraussetzungen für die verformungslosen Brüche geschaffen. Das Untersuchungsergebnis wurde durch metallografische Schliffe sowie durch Kerbschlagbiegeversuche bei 20 °C und bei 1 °C an den Schadensteilen und an Vergleichsstücken aus einem anderen Gewehr gleichen Typs abgesichert (Abb. 1.15); vgl. [5]. Die Aufklärung war durch eine unsachgemäße Voruntersuchung – Abschroten eines gehärteten Bolzenstückes nach Aufheizen mit dem Schweißbrenner zwecks chemischer Analyse (Abb. 1.13, rechts) – extrem erschwert worden.



Abb. 1.12 Nachbau einer historischen Unterhebel-Repetierbüchse (Winchester).

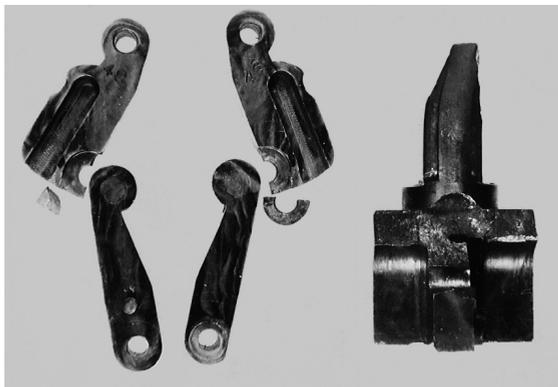


Abb. 1.13 Verformungslos gebrochene Schlossteile einer Unterhebel-Repetierbüchse. Abgeschroteter Bolzen (rechts).

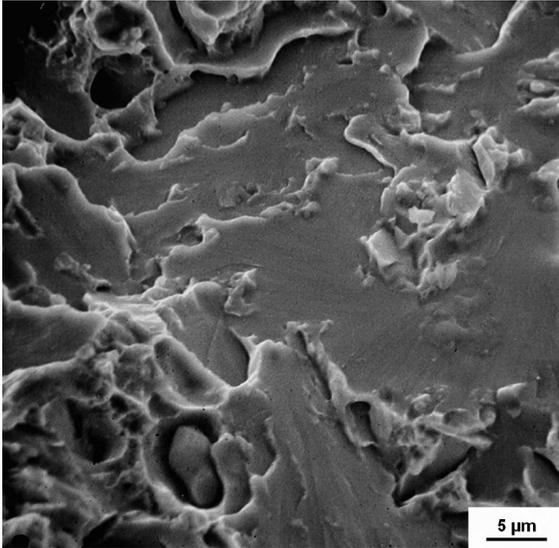


Abb. 1.14 Spaltbruch, repräsentativ für sämtliche Brüche in Abbildung 1.13.

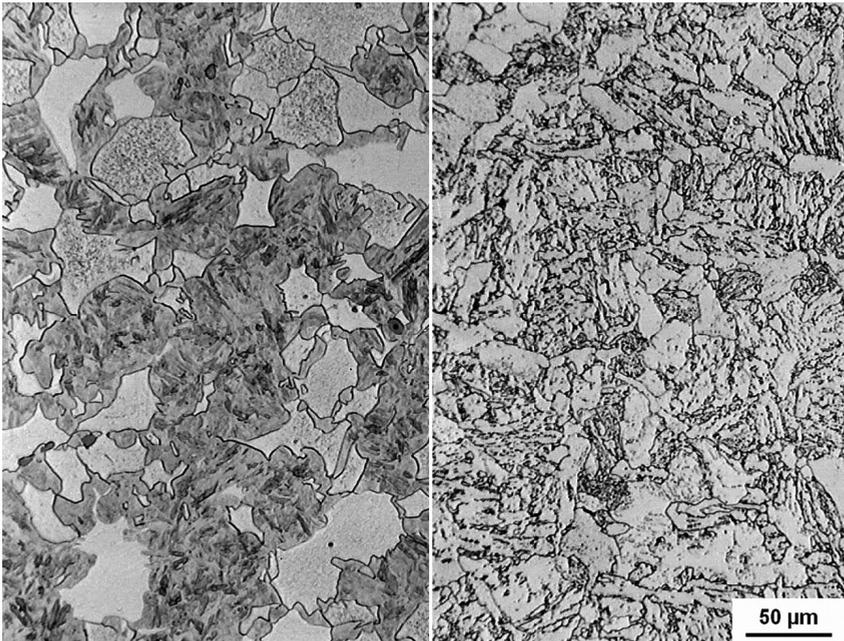


Abb. 1.15 Mangelhaftes (links) und korrektes (rechts) Vergütungsgefüge der Schlossstücke des Schadensteiles und eines Vergleichsgewehres.

Literatur

- 1 VDI-Richtlinien 3822: Schadensanalyse, Beuth-Verlag, Berlin.
- 2 Lange, G. (1974) Zerstörung von Hub-schrauberturbinen durch Einsatz eines Stahles in korrosionsanfälligen Zustand bei gleichzeitig nicht werkstoffgerechter Konstruktion. *Z. f. Werkstofftechnik* 5, 9–13.
- 3 Lange, G. (1984) Probleme der Schadensanalyse – dargestellt am Beispiel eines zerstörten Axialverdichters. *Z. Metallkde*, 75 401–406.
- 4 Lange, G. (1984) Schaden an einer Hub-schrauberturbine infolge kritischer Wärmebehandlung, in G. Petzow (Hrsg.), Sonderbände der Praktischen Metallographie, Bd. 15, S. 527–536, Riederer-Verlag, Stuttgart.
- 5 Lange, G. (1982) Bruch eines Gewehr-geschosses infolge fehlerhafter Wärmebehandlung. *Härterei-Techn. Mitt.*, 37, 284–285.