

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 Lange**  
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

<b>1</b>	<b>Vorgehensweise bei der Bearbeitung eines Schadensfalles</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Einteilung, Ursachen und Kennzeichen der Brüche</b>	<b>13</b>
2.1	Brucharten	13
2.2	Definitionen der Brucharten	14
2.3	Bruchursachen	18
2.4	Allgemeine Kennzeichen für Bruch- und Beanspruchungsart	20
<b>3</b>	<b>Werkstoffuntersuchungen</b>	<b>25</b>
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
<b>4</b>	<b>Elektronenmikroskopie bei der Schadensanalyse</b>	<b>49</b>
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
<b>5</b>	<b>Mikroskopische und makroskopische Erscheinungsformen des duktilen Gewaltbruches (Gleitbruch)</b>	<b>79</b>
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
<b>6</b>	<b>Makroskopische und mikroskopische Erscheinungsformen des Spaltbruches</b>	<b>103</b>
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

<b>7</b>	<b>Makroskopisches und mikroskopisches Erscheinungsbild des Schwingbruches</b>	<b>127</b>
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
<b>8</b>	<b>Thermisch induzierte Brüche</b>	<b>221</b>
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	Heißrisser verursachende 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
<b>9</b>	<b>Korrosionsschäden an metallischen Werkstoffen ohne mechanische Belastung</b>	<b>251</b>
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
<b>12</b>	<b>Schäden durch Hochtemperaturkorrosion</b>	<b>345</b>
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 Überhitzerbohrungen steinkohlengefeuerter Dampferzeuger	366
12.4.2	HTK an Gasturbinenschaufeln	369
12.5	HTK in Metallschmelzen	371
<b>13</b>	<b>Werkstoffschäden durch Verschleiß</b>	<b>375</b>
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

<b>14</b>	<b>Schäden an Schweißnähten</b>	<b>405</b>
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
<b>15</b>	<b>Bruchmechanik in der Schadensanalyse</b>	<b>447</b>
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	Unterkritisches Risswachstum bei wechselnder Belastung	454
15.7	Unterkritisches 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
<b>16</b>	<b>Schäden an Druckbehältern</b>	<b>469</b>
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
<b>17</b>	<b>Schadensuntersuchungen und Problemlösungen mit Oberflächenanalytik</b>	<b>487</b>
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
<b>18</b>	<b>Schwingungsrisse bei der dynamischen Prüfung von Seilbahnkomponenten</b>	<b>511</b>
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 Schweißeigenspannungen 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

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

<b>Stichwortverzeichnis</b>	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 \*)**

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

Abb. 1.2 Beweissicherung.

### Information über den Schadensfall

- |   |  |
|---|--|
| – Werkstoffart  | – Betrieblicher Lebenslauf:                            |
| – Wärmebehandlung   | Alter, Betriebsdauer, Vorschäden,                      |
| – Herstellung, Fertigung, Abnahme   | Reparaturen, Inspektionen, Änderungen, Stillstand, ... |
| – Konstruktion, Arbeitsweise, Belastung, Dimensionierung, Änderungen, ...     | – Umgebungsbedingungen                                 |
| – Funktion und Position des Bauteils im Gesamtsystem → „Fernwirkung“ beachten | – 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 Abhilfевorschlag 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 Heraus-trennen 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 verwaltet 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 Fluturbinenlaufrad 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 Rastermikroskop bestimmt werden musste. Zusätzliche Erkenntnisse wurden in 39 % aller Fälle gewonnen.)

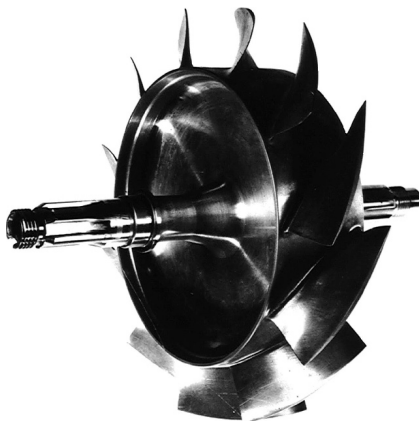
Im Idealfall bestätigt das Ergebnis der mikroskopischen Untersuchungen den makroskopischen Befund. Befriedigen die Resultate nicht, so können *Simulationsversuche* weiterhelfen. Man entnimmt dem Schadensteil (notfalls mit angemessenem Vorbehalt einem Ersatzteil) Proben, zerstört sie unter betriebsähnlichen Bedingungen und vergleicht die Bruchmerkmale im REM mit dem Original. Gleichzeitig gewinnt man charakteristische Topografien für den vorliegenden Werkstoff im aktuellen Wärmebehandlungszustand. Bei unbekannten 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 minder, jedoch für den vorliegenden Anwendungsfall ausreichender Qualität (s. Beispiel „Gewehr“ am Schluss dieses Kapitels).

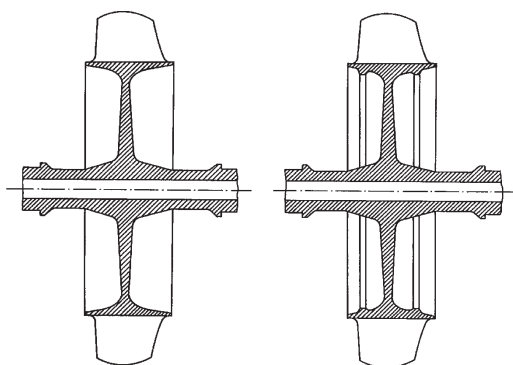
Die routinemäßige Eingangskontrolle der chemischen Zusammensetzung hält der Verfasser für nicht erforderlich. Die Analyse ist meist korrekt und nur in Ausnahmefällen für den Schaden verantwortlich. Eventuelle Verdachtsmomente kristallisieren sich im Verlauf der Untersuchung heraus; im Rastermikroskop 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).



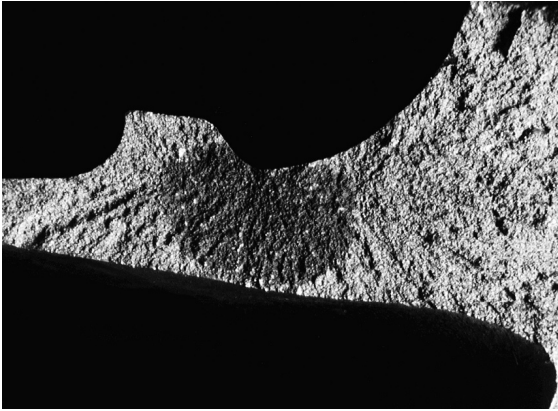
**Abb. 1.7** Axialverdichterrad, gefertigt aus einem Stück. Außendurchmesser 180 mm.



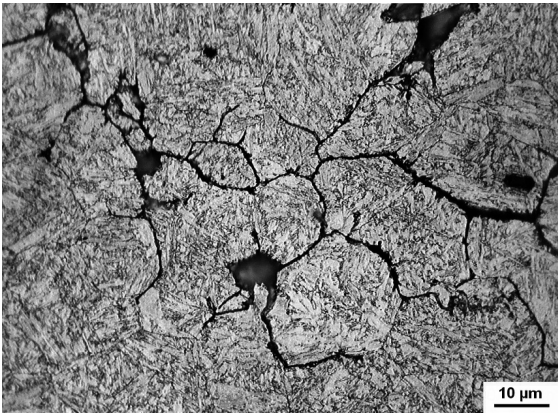
**Abb. 1.8** Älteres, bewährtes Verdichterrad (links); nach Andrehen zweier Wuchtringe anfälliges Verdichterrad (rechts).



**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.

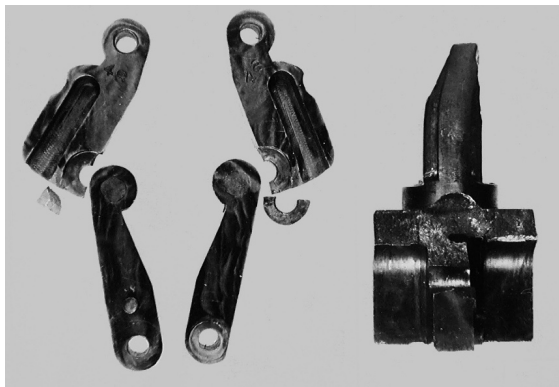
Nach ca. 1000 Betriebsstunden brachen in zwei Triebwerken diese mit 44 000 U/min umlaufenden Räder infolge interkristalliner Spannungsrißkorrosion (Abb. 1.9 bis 1.11); die übrigen geänderten Räder zeigten starke Angrifferscheinungen und wurden ausgetauscht. Der verwendete Stahl X15Cr13 war nicht normgerecht 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 staute 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.

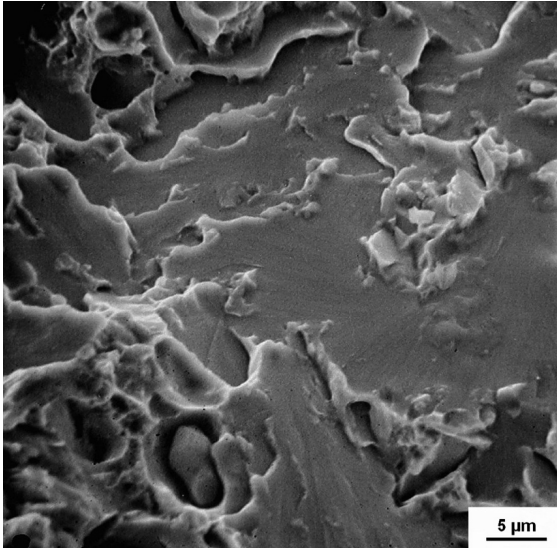


**Abb. 1.12** Nachbau einer historischen Unterhebel-Repetierbüchse (Winchester).

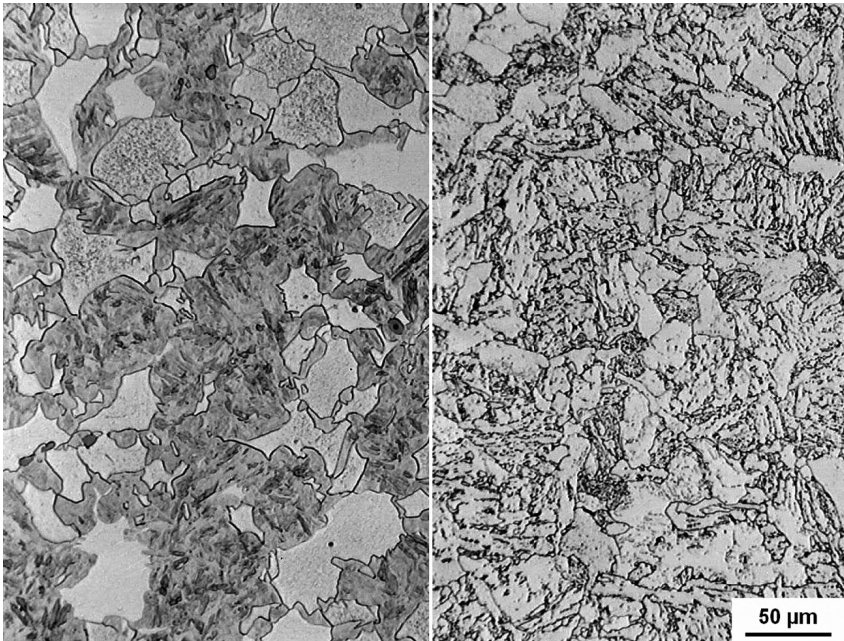


**Abb. 1.13** Verformungslos gebrochene Schlossteile einer Unterhebel-Repetierbüchse. Abgeschroteter Bolzen (rechts).





**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 korrosionsanfälligem 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.