

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 erfolgversprechend 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>	<u>Abhilfeempfehlungen</u>
(Artefakte)	(SEP 1100, VDI 3822)	
	+ 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

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| – Werkstoffart | – Betrieblicher Lebenslauf: |
| – Wärmebehandlung | Alter, Betriebsdauer, Vorschäden, |
| – Herstellung, Fertigung, | Reparaturen, Inspektionen, |
| Abnahme | Änderungen, Stillstand, ... |
| – Konstruktion, Arbeitsweise, | – Umgebungsbedingungen |
| Belastung, Dimensionierung, | – Betriebsbedingungen bei |
| Änderungen, ... | Schadenseintritt |
| – Funktion und Position des | – Unfallablauf |
| Bauteils im Gesamtsystem → | – Folgeereignisse: |
| „Fernwirkung“ beachten | 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 Abhilfenvorschlag 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 Gefügezustand. (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).

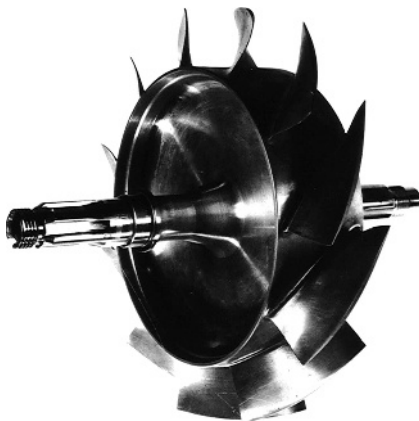


Abb. 1.7 Axialverdichterrad, gefertigt aus einem Stück. Außendurchmesser 180 mm.

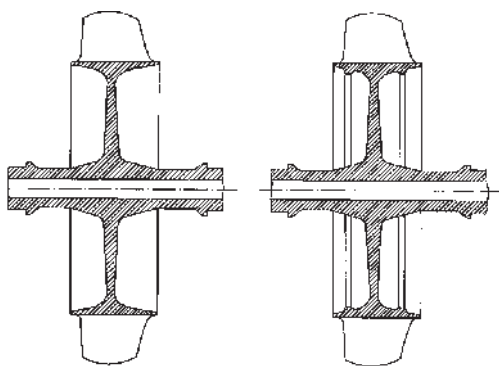


Abb. 1.8 Älteres, bewährtes Verdichterrad (links); nach Andrehen zweier Wuchtringe anfälliges Verdichterrad (rechts).



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

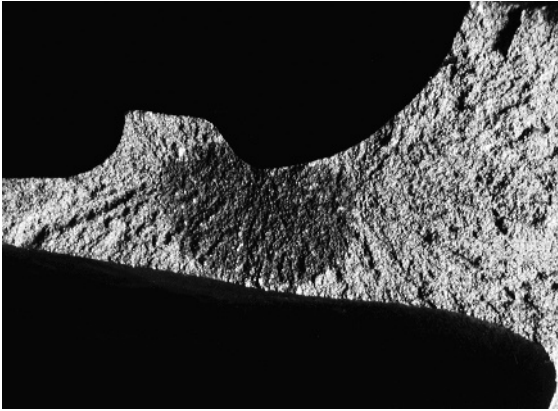


Abb. 1.10 Detail aus der Bruchfläche eines Verdichterrades. Dunkle Linse der interkristallinen (Spannungsriß-)Korrosion, ausgehend von der Senke neben dem Wuchtring.

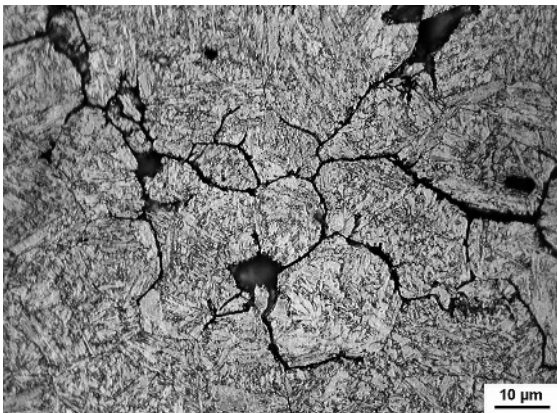


Abb. 1.11 Metallografischer Schliff, dicht neben der Bruchfläche. Interkristalline (Spannungsriß-)Korrosion. Vilella.

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).

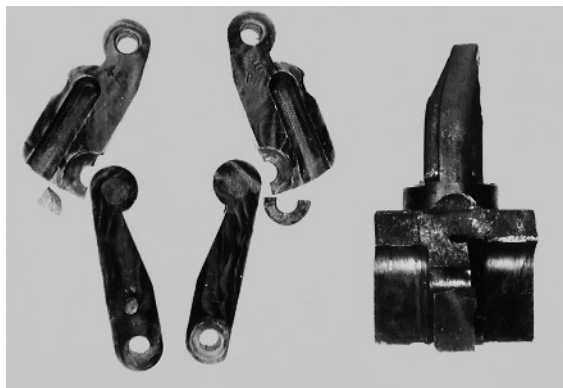


Abb. 1.13 Verformungslos gebrochene Schlossteile einer Unterhebel-Repetierbüchse. Abgeschroteter Bolzen (rechts).

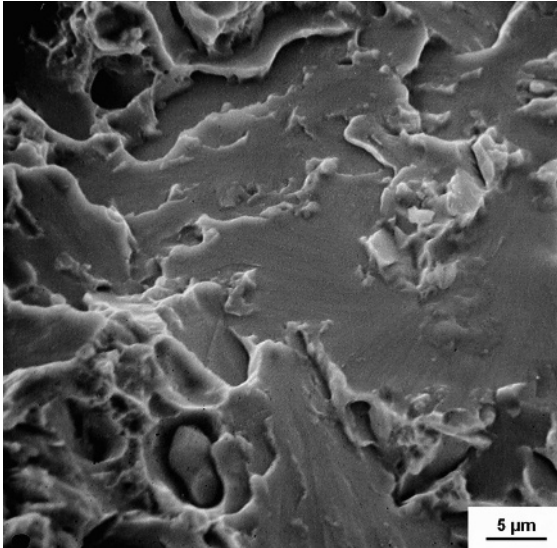


Abb. 1.14 Spaltbruch, repräsentativ für sämtliche Brüche in Abbildung 1.13.

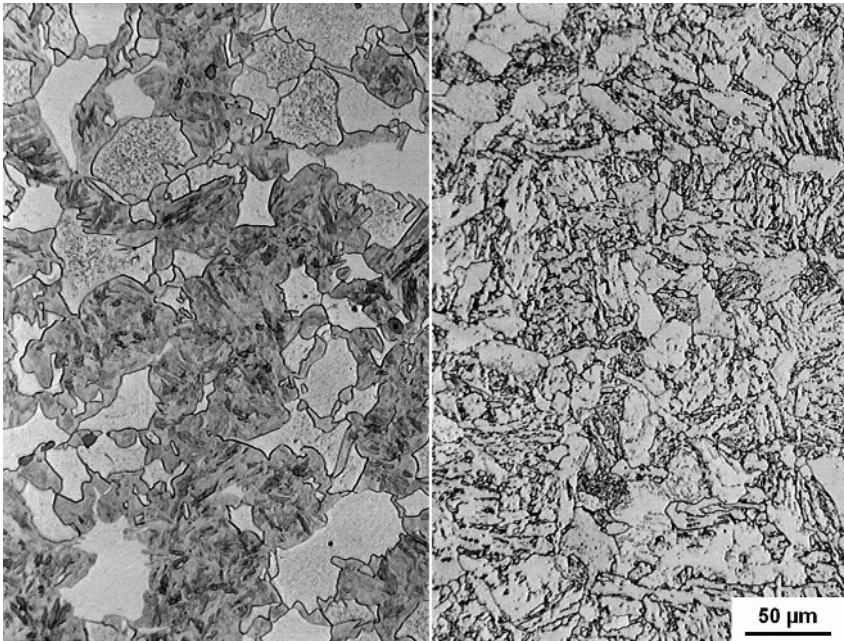


Abb. 1.15 Mangelhaftes (links) und korrektes (rechts) Vergütungsgefüge der Schlossstücke des Schadensteiles und eines Vergleichsgewehres.

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.