

# Systematische Schadensanalysen – eine Einführung

>> Dieser Beitrag vermittelt einen Einblick in die Grundlagen der systematischen Schadensanalyse. Er befasst sich einerseits mit den verschiedenen Brucharten, wie sie jeweils bedingt durch die dominierende Beanspruchung auftreten können. Andererseits wird auch gezeigt, wie nur ein systematisches Vorgehen, mit welchem der aufgetretene Schadensfall umfassend analysiert wird, zur eigentlichen Schadensursache führt.

Technische Schadensfälle können grundsätzlich bei jedem Produkt und zu jedem Zeitpunkt d.h. in der Produktion, bei der Montage, in der Testphase des Prototyps oder erst im Betrieb des Produkts auftreten.

## Beispiele untersuchter Schadensfälle

Hier eine Auswahl aus der Vielzahl vom Autor bisher untersuchter Schadensfälle:

- Bruch von Wellen
- Einsturz eines Kranes / einer Hebebühne
- Bruch von Sanitärverlängerungsstücken
- Armierungseisen mit Rissen
- Brüche von Kupplungen zu Vorspannelementen in Beton
- Bruch der Weichenzunge einer Tramschiene
- Risse in Wicklungsstäben von Bahnmotoren
- Bruch oder Versagen diverser Maschinenelemente
- Risse in geschweissten höchstfesten Platten
- Welle bricht beim Richten
- Schraubenbrüche beim Anziehen, nach Tagen, Wochen oder im Betrieb
- Seilbruch eines Stahlwerkskranes
- Brüche und Risse in Lampenaufhängungen in einem Hallenbad
- Korrosion in einer Filteranlage
- Brüche und Risse bei Schweissverbindungen.

Im Zentrum der Untersuchungen standen Bauteile und Maschinen aus metallischen Werkstoffen. Dieses grosse Spektrum an Schadensfällen – kleinstes Bauteil ein Spannstift mit einigen Millimetern Abmes-

## Mechanisch bedingte Risse und Brüche

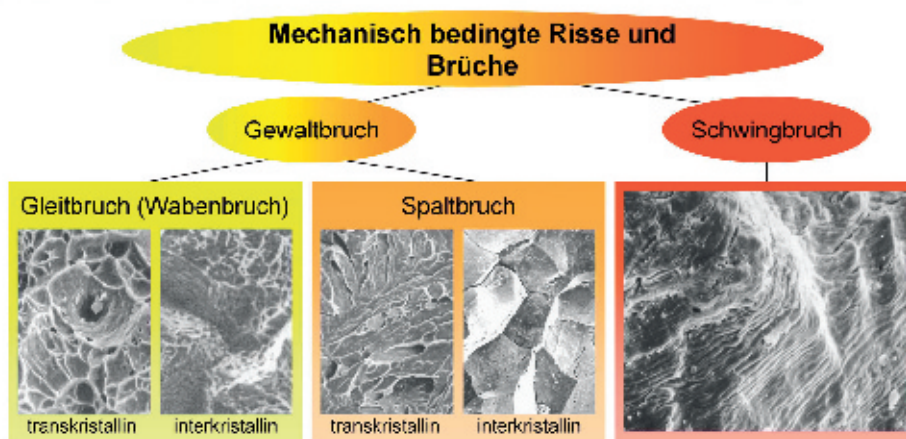


Bild 1: Mikrostruktur der Bruchfläche mechanisch bedingter Risse und Brüche.

sungen, grösstes Bauteil eine Filteranlage mit Abmessungen wie ein Mehrfamilienhaus – kann nur bewältigt werden, weil die Grundlagen (Brucharten und ihre Einflussfaktoren, Schadensmechanismen und das systematische Vorgehen) bei allen Schadensfällen gelten.

## Durch Beanspruchung bedingte Bruchstruktur

Die Ausbildung der Riss- oder Bruchfläche enthält Informationen über die Beanspruchung, welche zum Riss oder Bruch des Bauteiles geführt hat. Die Bestimmung der Bruchart ist deshalb ein wichtiger Bestandteil einer Schadensanalyse. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der makroskopischen Bruchbeurteilung mit blossem Auge, Lupe oder Stereomikroskop und der mi-

roskopischen Beurteilung mit dem Rasterelektronenmikroskop.

Ausgehend von der dominierenden Beanspruchung unterscheidet man mechanisch, thermisch oder korrosiv bedingte Brüche. Die Feinunterteilung innerhalb dieser drei Hauptgruppen ist in Kasten 1 dargestellt.

Als Beispiel für mechanisch bedingte Risse und Brüche ist in Bild 1 die mikrofraktographische Bruchstruktur dargestellt. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem Gewaltbruch, entstanden durch eine einmalige Überbelastung und dem Schwingbruch – der sich infolge einer Belastung die in ihrer Grösse und/oder in ihrer Richtung wechselt – im Laufe der Zeit entwickelt. Bei duktilen Werkstoffen treten beim Schwingbruch oft sogenannte Schwingungstreifen auf.

Beim Gewaltbruch muss unterschieden werden zwischen dem Gleit- oder Wabenbruch, der sich unter lokaler plastischer Verformung (Entstehung von Waben) ausbildet und dem Spaltbruch, der nahezu verformungslos senkrecht zu den Zug-Normalspannungen auftritt. Bei beiden Gewaltbruchtypen kann der Rissverlauf im Gefüge jeweils transkristallin (durch die Körner hindurch) oder interkristallin (zwischen den Körnern, d. h. entlang den Korngrenzen) erfolgen.

Beim Untersuchen einer Bruchfläche liegt die umgekehrte Aufgabenstellung vor, indem der Schadensanalytiker die vorliegende Bruchstruktur bestimmen muss (soweit das noch möglich ist) und davon ausgehend auf den Schadensmechanismus, d. h. die dominierende Beanspruchung

schliesst. Dabei treten zwei Schwierigkeiten auf. Einerseits tritt bei einem bestimmtem Werkstoff (eine bestimmte Legierung) je nach Herstellungszustand, Wärmebehandlungszustand, Gefügestand, mehr-

achsiger Spannungszustand, hohe Belastungsgeschwindigkeit oder tiefe Temperatur eine andere Bruchstruktur auf.

Andererseits treten bei mechanisch bedingten, korrosionsbedingten und ther-

## EN BREF

### Analyses systématiques de défaillance – une introduction

Cet article donne un aperçu des bases concernant l'analyse systématique de défaillance.

Il explique d'abord les différents types de rupture résultant d'une sollicitation dominante. Ensuite, il démontre l'importance d'une analyse complète et systématique d'une défaillance pour déterminer le fait générateur.

## KURZINTERVIEW ZUM THEMA

### Fragen an den Schadensexperten Dr. Ernst Moor

**Bei der Bestimmung der Bruchart von gebrochenen Materialien liegt man mit der Aussage «Es ist ein Schwingbruch» angeblich mehrheitlich richtig. Trifft das tatsächlich zu und warum?**

*Dr. Ernst Moor:* Bei den mechanisch bedingten Brüchen trifft dies wirklich zu. Gründe dafür gibt es mehrere:

1. Die meisten Bauteile sind aufgrund ihrer Funktion nicht mit einer konstanten, sondern mit einer wechselnden Belastung beaufschlagt. 2. Die meisten konstruktiven und fertigungstechnischen Mängel und Fehler wirken sich kaum auf die statische Bruchlast aus, dagegen oft gravierend auf die Schwingfestigkeit. Beispiele: scharfe Querschnittsübergänge, raue Oberflächen, Zugeigenspannungen im Randbereich, Schweissfehler, Schleifrisse, Korrosionsnarben, Fehler bei der Montage. 3. Die korrekte Auslegung eines Bauteiles bezüglich Schwingbeanspruchung ist wesentlich komplexer als die Auslegung für eine statische Beanspruchung.

**Bei der Dokumentation von Schadensanalysen unterscheiden Sie zwischen «Bericht» und «Gutachten». Worin liegt genau der Unterschied?**

*Moor:* Bereits bei der Auftragsformulierung muss klar sein, ob es um eine «einfache» Schadensanalyse mit einem Bericht oder um ein Gutachten zu einem Schadensfall geht. Ein Gutachten ist im Gegensatz zu einem Bericht aus meiner

Sicht etwas Umfassendes, bei dem keine wesentlichen Aspekte offen gelassen, nur teilweise untersucht oder in der Beurteilung nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wurden. Grosse Schadensforderungen, Entscheidungen von grosser Tragweite und Gerichtsverfahren erfordern die Abwicklung einer Schadensanalyse als Gutachten.

**Bei technischen Schadensfällen sind gemäss Ihren Aussagen nur 5 % auf den Werkstoff zurückzuführen. Welches sind dann die hauptsächlichen Ursachen?**

*Moor:* Im Vordergrund stehen Fehler oder Mängel in den Bereichen Betrieb/Unterhalt, Planung/Berechnung, Konstruktion/Fertigung sowie Montage/Einrichtung.

**Verfügen Sie über eine eigene Infrastruktur, um alle bei der Schadensanalyse anfallenden Laboruntersuchungen und Prüfungen selber durchzuführen?**

*Moor:* Ich bin bestens ausgerüstet für die makroskopische Erfassung des Schadensbildes (digitale Spiegelreflexkamera mit verschiedenen Objektiven, hochwertiges Stereomikroskop mit digitaler Bilderfassung und eine breite Palette an Messmitteln). Die eigentlichen Laboruntersuchungen und Prüfungen, wie sie im Kasten 3 aufgelistet sind, kaufe ich bei verschiedenen Firmen – angepasst an die jeweilige Aufgabenstellung sowie durchgeführt unter meiner Feder-



*Dr. Ernst Moor, Gründer und Geschäftsführer der Moor SchadensManagement GmbH.*

führung oder meiner fachlichen Leitung – ein.

**Wäre es sinnvoll, solche Dienstleistungen bereits vor dem Auftreten von Schadensfällen in Anspruch zu nehmen?**

*Moor:* Zweifellos kann es nur von Vorteil sein, bereits in der Entwicklungsphase oder bei der Auswertung von Versuchen mit Prototypen das Know-how von erfahrenen Schadensexperten mit einfließen zu lassen – genauso wie es üblich ist, Dienstleistungen von Experten für Unternehmens-, Rechts- oder Steuerberatung einzukaufen. Wä

## Systematische Schadensanalysen Zusammenfassung



Bild 2: Einflussfaktoren auf die Sicherheit von Bauteilen und Maschinen.

misch bedingten Brüchen teilweise nahezu identische Bruchstrukturen auf. So kann eine interkristalline verformungslose Bruchstruktur beim mechanisch bedingten interkristallinen Spaltbruch, bei mehreren korrosionsbedingten Brüchen

und mehreren thermisch bedingten Brüchen auftreten. Oft sind deshalb zusätzlich metallographische Untersuchungen, mechanisch technologische, chemische und zerstörungsfreie Prüfungen oder die künstliche Erzeugung von Brüchen unter vor-

gegebenen Bedingungen erforderlich, um den Schadensmechanismus einzuzugrenzen bzw. abschliessend zu klären.

Quantitative Aussagen zu den Ursachen von Schadensfällen sind stark davon abhängig, aus welchem Bereich die untersuchten Schadensfälle stammen. So ist z. B. der Mensch die Hauptursache von Unfällen in der Luftfahrt, wogegen die Technik in den verschiedenen Flugzeugkategorien stets den geringsten Anteil aufweist.

Im allgemeinen Bereich der Technik ist allen Auswertungen von Schadensfällen gemeinsam, dass der Werkstoff nur mit einem geringen Anteil als Ursache vertreten ist. Als Richtwert für die Ursache «Werkstoff» kann man von 5% ausgehen.

### Systematische Schadensanalyse

Immer wieder werden Einzeluntersuchungen verlangt, die wenig oder nichts zur Klärung der Schadensursache beitragen (chemische Analyse und eine Härtemessung). Oder der Gutachter soll schnell (ohne eine systematische Untersuchung) Empfehlungen abgeben, wie der aufgetretene Schadensfall künftig vermieden werden kann.

Oft ist jedoch der Auftraggeber an der fundierten Klärung eines Schadensfalles interessiert und es kann eine systematische Schadensanalyse, mit den in Kasten 2 dargestellten Schritten, durchgeführt werden. In dieser Auflistung der Analyseschritte kommt deutlich zum Ausdruck, dass die Laboruntersuchungen nur einen Bruchteil der Gesamtarbeit darstellen.

Einen sehr hohen Stellenwert haben die Erfassung der gesamten Schadenssituation, die Zusammenstellung der Geschichte des Schadensteiles und das Aufstellen von Hypothesen. Eine sorgfältige Durchführung dieser Schritte bietet gegenüber einer wilden Probenentnahme, meistens noch gepaart mit einer übertriebenen Hektik, Gewähr, dass die richtigen Proben korrekt, d. h. ohne Beeinflussung durch das Heraustrennen und ohne Zerstörung von Indizien, entnommen werden.

Die in der Regel zur Diskussion stehenden Laboruntersuchungen und Prüfungen sind im Kasten 3 aufgelistet. In welchem Umfang diese erforderlich sind hängt von der Komplexität des Schadensbildes ab. Nach sorgfältiger Beurteilung der Ergebnisse sind in der Regel der Schadensmechanismus und mehrheitlich auch die Schadensursache bekannt.

Ab und zu sind jedoch noch weitere Untersuchungen und zusätzliche Abklärungen, Berechnungen, Belastungsversuche oder Simulationen an ganzen Bauteilen er-

#### KASTEN 1

#### Einteilung der Risse und Brüche aufgrund der dominierenden Beanspruchung

##### • Mechanisch bedingte Risse & Brüche

###### 1. Gewaltbruch

- Gleichbruch (Wabenbruch)
  - Transkristalliner Wabenbruch
  - Interkristalliner Wabenbruch
- Spaltbruch
  - Transkristalliner Spaltbruch
  - Interkristalliner Spaltbruch
- Mischbruch

###### 2. Schwingbruch

##### • Korrosionsbedingte Risse & Brüche

###### 1. Ohne Spannungen

- Interkristalline Korrosion

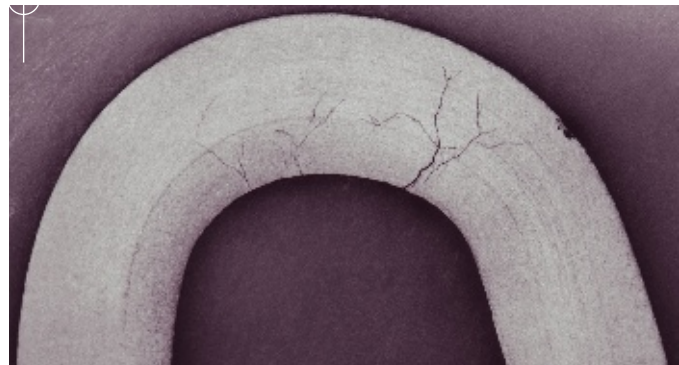
###### 2. Mit Spannungen (aus der Belastung oder Eigenspannungen)

- Interkristalline Spannungsrisskorrosion
- Anodische Spannungsrisskorrosion (vgl. Bild 3)
- Wasserstoffinduzierte Risse und Brüche
- Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion
- Schwingrisskorrosion
- Flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion (Lotbruch)

##### • Thermisch bedingte Risse und Brüche

- Kriechbrüche
- Schweißrisse
- Heissrisse
- Härterisse
- Schleifrisse
- Wärmeschockrisse

forderlich, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen, welche es dann erlauben, die Schadensursache zuverlässig abzuleiten. Mit Blick auf die zukünftige Vermeidung dieser Schadensfälle werden Empfehlungen formuliert. Bei diesen Empfehlungen kann es sich jedoch nur um grundsätzliche Stossrichtungen für Änderungen und Verbesserungen handeln. Deren konkrete Umsetzung erfordert in der Regel sehr viel Detailarbeit des Auftraggebers. Nicht zu unterschätzen ist der Aufwand für die Erstellung eines fundierten, klaren und an-



*Bild 3: Anodische Spannungsrisskorrosion bei Lampenaufhängungen in einem Hallenbad. Bedingt durch eine falsche Materialwahl (kein Werkstofffehler) traten nach weniger als 2 Jahren erste Brüche infolge hohem Gehalt an Chlor und Chlorverbindungen auf.*

## KASTEN 2

### Ablauf einer systematischen Schadensanalyse

- **Erfassung der Schadenssituation**
  - Der eigentliche Schaden (makroskopischer Eindruck)
  - Die Umgebung zum eigentlichen Schadensteil
  - Die Funktion und die Betriebsbedingungen der Maschine
- **Geschichte** der Konstruktion, der Herstellung und des Betriebs
- Aufstellen von **Hypothesen**
  - Zum Schadensmechanismus
  - Zur Schadensursache
- Planung und Durchführung der einzelnen **Laboruntersuchungen**
- **Beurteilung der Ergebnisse** und Ableitung des **Schadensmechanismus** und meistens auch der **Schadensursache**
- Allenfalls Planung und Durchführung von weiteren **Untersuchungen**, zusätzlichen **Abklärungen**, **Berechnungen**, **Belastungsversuchen**, **Simulationen**
- **Beurteilung** der gesamten Untersuchungsergebnisse und Ableitung der **Schadensursache**
- **Empfehlungen** für die zukünftige Vermeidung von Schadensfällen
- Darstellung der gesamten Arbeiten in einem **Bericht oder Gutachten**

genehm lesbaren Berichtes bzw. Gutachtens.

## Stellenwert von Schadensanalysen

Schadensanalysen sind nicht – wie oft aus kaufmännischer Sicht eingeschätzt – reine Vergangenheitsbewältigung. Sie sind vielmehr das Ergebnis von echten Betriebsversuchen. Dabei entsprechen die Belastungen und die Randbedingungen der Realität und nicht allenfalls falschen oder unzureichenden Annahmen. Damit helfen systematische Schadensanalysen das Produkt bzw. die vorhandenen Schwachstellen wirklich zu verstehen und sind so die Basis für verbesserte Produkte und zufriedene Kunden.

Jedermann erwartet bei einem medizinischen Problem, dass der Arzt als erstes eine fundierte Diagnose erstellt über die

Ursache der Beschwerden. Davon ausgehend kann abgeleitet werden, mit welchen Medikamenten, Therapien oder Eingriffen für die Zukunft ein möglichst beschwerdefreier Zustand erreicht werden kann.

Die gleichen logischen und selbstverständlichen Gesetzmässigkeiten gelten aber auch in der Technik. Eine fundierte Produktverbesserung erfordert daher zwingend die Kenntnis der Ursachen, die zum Schadensfall oder zu Problemen des Bauteiles, der Maschine oder der gesamten Anlage geführt haben.

## Schlussbetrachtung

Problem- und Schadensfälle sind oft die Ursache des Zusammentreffens verschiedener Umstände. Scheinbar Naheliegenderes oder Offensichtliches sind vielfach nicht die eigentliche Ursache des Schadens. Deshalb sind eine ganzheitliche Be-

trachtung und ein systematisches Vorgehen unumgänglich, um voreilige Fehlbeurteilungen und damit die Einleitung von nicht zielführenden Verbesserungs- und Änderungsmaßnahmen zu vermeiden.

Ausgehend vom Begriff der Produktsicherheit kann man sagen, dass bei einem Problem oder einem Schadensfall offenbar die Sicherheit des Produktes nicht ausreichend hoch war. Bild 2 gibt einen Überblick zu den verschiedenen Faktoren, welche die Sicherheit eines Bauteiles, einer Maschine oder einer gesamten Anlage bestimmen.

Wichtig ist, dass alle relevanten Einflüsse bekannt und entsprechend berücksichtigt wurden. Denn in der Regel können nicht berücksichtigte Schadensmechanismen (z. B. Spannungsrisskorrosion infolge falsch eingeschätzter Korrosionsbedingungen) nicht mittels Reserven bei anderen Einflussgrössen (z. B. grosszügige Lastannahmen) kompensiert werden. Aus diesem Blickwinkel kann man auch sagen, dass systematische Schadensanalysen einen wichtigen Pfeiler darstellen bei der Entwicklung, Konstruktion und Herstellung von sicheren Produkten. <<

*Autor*

Dr. sc. techn. Ernst Moor  
Moor SchadensManagement GmbH  
5210 Windisch

*Information*

Moor SchadensManagement GmbH  
Technopark Aargau  
Dorfstrasse 69  
5210 Windisch  
Tel. 056 450 28 50  
Fax 056 450 28 51  
moor@moorschaden.ch  
www.moorschaden.ch

Bilder: **1** Moor/IWM, **2** Moor, **3** IWM

### KASTEN 3

#### Laboruntersuchungen und Prüfungen

- Makroskopische Beurteilung der Bruchfläche
- Bestimmung der mikroskopischen Bruchstruktur mittels Rasterelektronenmikroskop (REM)
- Erzeugen von Brüchen unter definierten Bedingungen
- Metallographische Untersuchungen (Gefügeausbildung, Randschichten, Randeffekte)
- Analytische Untersuchungen (Werkstofftyp, Ablagerungen)
- Härtemessungen (Oberfläche, Kern, Randschichten)
- Zugversuche, Kerbschlagbiegeversuche
- Bestimmung der Bruchzähigkeit
- Ermittlung von Eigenspannungen
- Ermittlung der Schwingfestigkeit
- Bestimmung der Rissfortschrittskurve (da/dN) in Abhängigkeit von  $\Delta K$
- Zerstörungsfreie Prüfungen (PT, MT, UT, RT)