Axel Rossmann

Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen

unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus.

für

- Studierende
- Konstrukteure
- Betreiber
- Qualitätssicherung
- Wartung und Kundendienst
- Untersucher
- Gutachter

Band 1A: Problemanalysen, Leichtbau, hochfeste Werkstoffe. Rissverhalten, Bruchflächen, Restlebensdauer.

© Axel Rossmann - Turboconsult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

1. Auflage
(Serie 1.1)

Bei der Erstellung dieses Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

© 2010 by A.Rossmann, Turbo Consult, Karlsfeld

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung von Turbo Consult unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Bestellung dieses Buches:

- über die Home Page: www.turboconsult.de
- per E-Mail: turboconsult@gmx.de
- mit Fax Nr. (Deutschland) 08131 50 50 67

ISBN 978-3-00-034550-0

Vorwort

Diese Buchreihe ist als **Ergänzung der Standardwerke** zur Auslegung und Berechnung von Maschinenelementen gedacht. Es befasst sich mit Gesichtspunkten, die für Bauteile moderner Maschinen immer mehr an Bedeutung gewinnen. Ein Anliegen ist die Anwendungsorientierung, d.h. die Praxisrelevanz. Dafür ist

das Bewusstsein der Probleme wichtiger als das reine Wissen.

Energieeffizienz, Ressourcenschonung und Umweltschutz führen zu höheren Belastungen, Festigkeitsauslastung und Gewichtsreduzierung. Entsprechend steigen Anforderungen an die Maschinenelemente und deren Sicherheit. Dies hat sich die Auslegung der Maschinenelemente, mit Hilfe der Standardwerke zur Aufgabe gemacht. Trotzdem muss mit **Problemen und Schäden im Betrieb** gerechnet werden. Unbekannte bzw. unberücksichtigte Betriebsbeanspruchungen und Bauteileigenschaften zeigen sich erst mit der anwendungsspezifischen **Betriebserfahrung**. Hoffentlich rechtzeitig in geeigneten **Erprobungen und Nachweisen**. Um in Zukunft Schäden gezielt zu **vermeiden und Abhilfen** für Probleme bereits verbauter Maschinenelemente zu finden, ist die **Ursachenfindung** entscheidend. Ein Schritt, der in der Fachliteratur zur Auslegung von Maschinenelementen nicht Schwerpunkt ist. Er soll mit diesem Buch ergänzt werden. Die Literatur zu Schadensanalysen ist besonders werkstofforientiert. Dabei geht es vorrangig um Untersuchungsverfahren, deren Auswertung und Fallstudien. So erfolgt eine **Bewertung des Schadensbilds und die Zuordnung zum Schadensmechanismus**. Das sind aber nur Teilaspekte einer systematischen Problemanalyse. Es handelt sich lediglich um eine sog. **Faktensammlung,** zu der eine Vielzahl weiterer Gebiete wie Betriebsdaten und -atmosphäre sowie zeitliche Abläufe gehören. Hier sind Konstrukteur und Praktiker gefragt. Sie fordern in Fällen einer umfangreichen Problemklärung auch Laboruntersuchungen an.

Auf den Ursachen geklärter Probleme und Schäden baut die **Erfahrung und damit das Problembewusstsein**. Das erfordert wiederum Erfahrung. Hilfreich ist eine **systematische Problemanalyse**. Darin folgt auf die Faktenermittlung die Hypothesenerarbeitung und als letzter Schritt die Überprüfung der Hypothesen anhand der Fakten.

Anzustreben ist es, **erste Versagensanzeichen zu erkennen** und richtig zu **deuten**. Das gelingt nur an der richtigen Stelle des Bauteils. Dazu ist die Kenntnis der **Versagensmechanismen und Schadensbilder** betroffener Maschinenelemente Voraussetzung. So lassen sich **Schwachstellen bzw. Mängel der Auslegung** identifizieren. Das anwenderspezifische **Know How** und **Know Why** steigt, das ist ein wichtiger Wettbewerbsvorteil.

Entgegen der Annahme, die heute zur Verfügung stehenden **Computer und Berechnungsprogramme** würden die Sicherheit der Maschinenelemente bereits ausreichend gewährleisten, ist bei Betriebsproblemen eher das Gegenteil zu beobachten. Zunächst geht es darum, alle relevanten **Effekte zu identifizieren**. Dazu sollen Zusammenstellungen typischer betroffener Bauteile dienen. Steigende Anforderungen bzw. verringerte Sicherheitsabstände verlangen die Berücksichtigung **einer Rechnung kaum zugänglicher Effekte**. Aus diesem Grund wurde auf diese und ihre Mechanismen besonderer Wert gelegt. Typisch sind herstellungsspezifische **Fehl- und Schwachstellen** sowie **Betriebseinflüsse** in Form von Verschleiß, Korrosion und Alterung. Kombinationen erschweren die Aufgabe weiter. Eine Berechnung kann nur so gut sein, wie sie bauteilspezifisch, lebensdauer- und sicherheitsrelevant ist. So bleibt die betriebsnahe Erprobung oft unerlässlich. Für das, was sich der Berechnung entzieht gilt: „The engine will tell us“. Hier soll das Verständnis dieser ‘Sprache einer Maschine’ gefördert werden. Man muss sich aber immer bewusst sein, wenn die Maschine ‘schweigt’, ist bei Änderungen im Rahmen von Leistungssteigerung oder Reparaturen trotzdem die Möglichkeit eines Ausfalls gefährlich nah.

Axel Rossmann

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Was mit der besonderen Form dieses Buchs erreicht werden soll.

Motivation: Interessierende und überraschende Überschriften zu den Bildern.
Interesse wecken: Schnell erfassbare Bilder typischer Maschinenelemente mit inhaltsbezogenen Merkmalen.
Sinnhaftigkeit und Notwendigkeit des theoretischen Unterbaus im Studium erkennen.
Praxisrelevanz mit dem Bezug zur allgemeinen eigenen technischen Erfahrung. Der behandelte Stoff sollte bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums den Lernenden für die Industrie interessieren.
Erklärungen möglichst einfach mit Hilfe der Vernetzung (Bildangaben) im Text zu finden.
Praxistauglichkeit. Auch nach dem Studium soll das Buch als ein Ratgeber dienen. Es unterstützt dafür insbesondere das Erkennen auslegungsrelevanter Einflüsse.
Vertiefungsmöglichkeit mit Hilfe von Literaturhinweisen.

Zur Gestaltung:

Am Anfang jeden Kapitels wird in einem 'Fließtext' eine Übersicht gegeben. Der fachliche Inhalt stützt sich jedoch überwiegend auf **Bilder mit ausführlichen Erklärungen** in einem **zugeordneten Text**. Dies ist eine Situation ähnlich einer Vorlesung. Wert wird auch auf die Einschätzung durch den 'Vortragenden' gelegt. Das soll Problematiken der Materie aufzeigen und nicht zuletzt ein Gefühl persönlichen Kontakts vermitteln.

Um diese Ziele zu erreichen wurde ein **Netzwerk** gewählt. Es verbindet die Bildbeschreibung mit **Hinweisen auf andere Bilder** die ohne ermüdendes Suchen eine Vertiefung ermöglichen. Dies ist besonders bei Fachbegriffen und Schadensmechanismen nützlich. Literaturangaben sollen, falls erwünscht, der Vertiefung dienen. Dabei handelt es sich auch um Web-Inhalte die direkt aus den angegebenen Adressen erreicht werden können.

Ein sehr umfangreiches **Sachregister** ist für die Nutzung als Nachschlagewerk in der Praxis gedacht. In Pdf-Form ist dies mit einer **Suchmaschine** im Reader auch in tragbaren elektronischen Geräten hervorragend möglich.

Beispiel:
Bild 1-0 *(entsppricht Bild 4.3-22, Lit. 4.3-21)****:*** *Die* ***Abschätzung des Risikos*** *einer ganzen betroffenen Flotte gleicher Maschinen bei akuten Schadensfällen ist von großer Bedeutung für einzuleitende Maßnahmen bzw. die Risikominimierung. Hierzu gehört die Identifikation betroffener Bauteile, die* ***Festlegung von Inspektionsintervallen****, die Definition der anzuwendenden Verfahren und die Erarbeitung bzw. Einleitung von Abhilfen. Für dieses Vorgehen muss die Chance abgeschätzt werden, den Anriss rechtzeitig vor dem Versagen des Bauteils (meist dem Bruch)* ***abzufangen*** *(Bild 4.3-24). Das ermöglicht den Austausch des schadhaften Bauteils. In den Skizzen A,B,C und D sind dem Risiko eines Bruchs, trotz einer Rissüberwachung, typische Belastungsmerkmale zugeordnet.*
Kriterien:
*-****Spannungsgradient*** *(siehe Bild 4.3-1)*
- ***Spannungsausschlag*** *(LCF, HCF, siehe Bild 5.4-5)*
- ***Mittelspannung***
- ***Spannungskonzentration*** *(Einfluss vorhandener Kerben und Anrisse).*
- ***Risszähigkeit*** *des Werkstoffs (Bild 4.3-4 und Bild 4.3-8)*

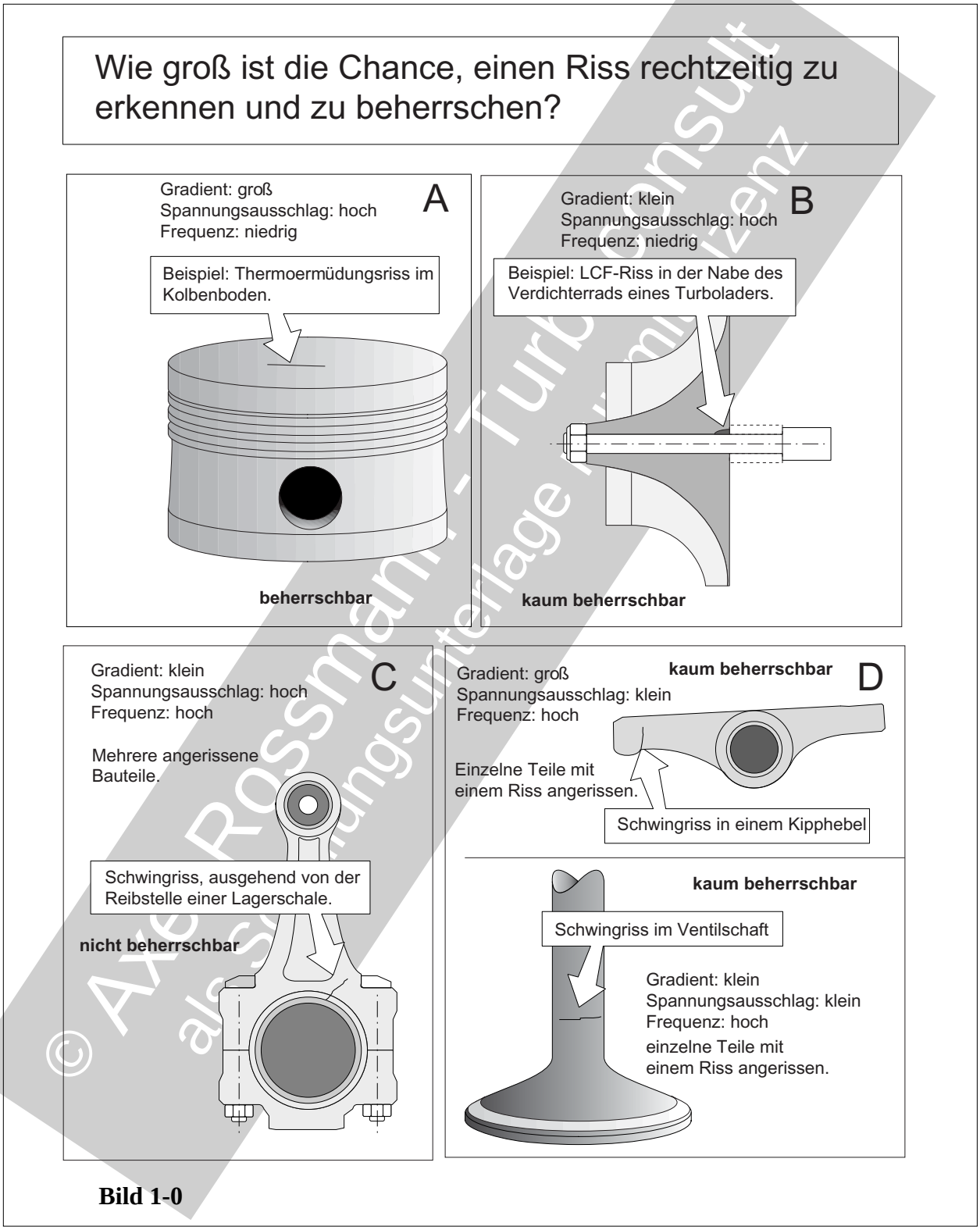


Bild 1-0

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage Lizenz

- ***Belastungsfrequenz**: Bei hohen Frequenzen wird in kürzester Zeit (z.B. Sekunden) infolge der vielen Lastwechsel sehr viel Schädigung akkumuliert und das zeitliche Risswachstum unkontrollierbar.*
- ***Zahl der angerissenen Bauteile** (siehe Bild 4.3-20 und Bild 4.3-21).*
- ***Erfahrungen** mit schadensrelevanten Bauteilen.*

Mein besonderer Dank für die Korrekturarbeiten gilt

dem Lektor, Herrn Dipl.-Dokumentar Reinhard Glander,

und

Herrn A.o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.Dr.techn. Heinrich Hochleitner für die Durchsicht. mit dem Schwerpunkt des Verständnisses des Lesers für das Verhaltens der Maschinenelemente.
Herrn Dr. Andreas Marn für die Durchsicht mit dem Schwerpunkt ‘Schwingungen’.
Herrn Reinhold Gräter für die Fachdiskussionen mit Schwerpunkt Praxisbezug in Werkstofftechnik und Werkstoffverhalten.
Frau Dipl Ing. Katrin Friedberger für die Durchsicht mit Schwerpunkt Werkstoffkunde und Schadensanalyse.

© Axel Rossmann - TU/DC consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Inhalt

Vorliegender Band 1A mit grauem Feld gekennzeichnet

Vorwort

Problemanalysen

1. Einführung
- 1.1 Die Gefahr unberücksichtigter Betriebsbedingungen

2. Strategien und Vorgehen zur Vermeidung von Problemen
- 2.1 Vorbeugende Analysen
- 2.2 Analysen akuter Probleme - Technische Problemanalysen
  - 2.2.1 Grundlagen
  - 2.2.2 Vorgehen und Anwendung
    - 2.2.2.1 Praktische Beispiele
    - *2.2.2.2 Konzept eines Praktikums zur technischen Problemanalyse*
      - *2.2.2.2.1 Untersuchungsobjekte*
      - *2.2.2.2.2 Ausstattung*
      - *2.2.2.2.3 Vorgehen*
    - *2.2.2.3 Konzept eines Praktikums zur Maschinenelementkunde*
      - *2.2.2.3.1 Untersuchungsobjekte*
      - *2.2.2.3.2 Ausstattung*
      - *2.2.2.3.3 Lernerfolg*
    - *2.2.2.4 Mikroskopische Untersuchungen*
    - *2.2.2.5 Reproduktion von Schäden*
- 2.3 Risikoanalysen

Leichtbau

3. Vom Maschinenbau zum Leichtbau
- 3.1 Mini- und Mikromaschinen
- 3.2 Einfluss der Betriebsbelastungen
  - 3.2.1 Anforderungen an die Werkstofftechnik
  - 3.2.2 Das Verhalten hochbelasteter Bauteile
- 3.3 Bauteilverhalten, Messung, Überwachung, Diagnose

Werkstoffverhalten

4. Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
4.1 Der Einsatz hochfester Werkstoffe
4.2 Der Einfluss von Beschichtungen
4.3 Anriss und Rissfortschritt
4.4 Auswertung von Bruchflächen und Rissbildern
4.5 Lebensdauerabschätzung.
4.5.1 Veränderung der Werkstoffeigenschaften im Betrieb
4.5.1.1 Relaxation und 'Setzen'
4.5.2 Lebensdauerabschätzung aus Betriebsdaten

'Mechanische' Belastungen

5. Effekte und Mechanismen der Betriebseinflüsse
5.1 Wechselseitige Beeinflussung von Effekten
5.2 Verhalten bei Bruch und hoher Belastungsgeschwindigkeit
5.2.1 Gewaltbrüche
5.2.2 Werkstoffverhalten unter Hochgeschwindigkeitsbelastung
5.2.3 Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität von Flüssigkeiten (Rheologie)
5.2.4 Druckstöße in Flüssigkeiten und Gasen
5.2.5 Stoßwellen in Gasen
5.3 Temperatur und Umgebungseinflüsse
5.3.1 Betriebsatmosphäre
5.3.1.1 Einfluss der Betriebsatmosphäre auf Kunststoffe
5.3.1 Zeitstand und Kriechen (Statische Belastung)
5.4 Dynamische Belastung und Schwingermüdung
5.4.1 Zyklische Ermüdung im plastischen Bereich (LCF)
5.4.1.1 Grundlagen zum LCF-Schadensmechanismus
5.4.1.2 Schäden durch LCF
5.4.1.3 Abhilfen bei Schäden durch LCF
5.4.2 Thermoermüdung
5.4.2.1 Grundlagen der Thermoermüdung
5.4.2.2 Abhilfen gegen Schäden durch Thermoermüdung
5.4.3 Schwingermüdung im Dauerfestigkeitsbereich (HCF)
5.4.3.1 Schwingungsanregung und Schwingbeanspruchung
5.4.3.2 Werkstoffeinfluss auf das HCF-Verhalten
5.4 3.3 Abhilfen bei HCF-Schäden
5.4.4 Kerben

© Axel Rossmann T
als Schulungsunterlagen

5.4 3.3 Abhilfen bei HCF-Schäden
5.4.4 Kerben

Betriebseinflüsse

5.5 Erosion
5.5.1 Erosionsmechanismen
5.5.1.1 Partikelerosion
5.5.1.2 Tropfenschlag und Regenerosion
5.5.1.3 Kavitation
Dieseleffekt
5.6 Korrosion
5.6.1 Korrosion ohne mechanische Belastung
5.6.1.1 Grundlagen
'Bimetallkorrosion'
Biofilme
5.6.1.2 Schäden
5.6.1.3 Maßnahmen gegen Schäden
5.6.1.4 Hochtemperaturkorrosion/Heißgaskorrosion (HTK)
5.6.1.4.1 Schäden durch HTK
5.6.1.4.2 Maßnahmen gegen Schäden durch HTK
5.6.2 Verschleißbeschleunigte Korrosion
5.6.3 Korrosion bei mechanischer Belastung
5.6.3.1 Korrosion bei statischer Belastung - Spannungsrisskorrosion
5.6.3.1.1 Grundlagen, Schäden, Abhilfen der Spannungsrisskorrosion
5.6.3.2 Korrosion bei dynamischer Belastung - Schwingungsrisskorrosion
5.6.3.2.1 Grundlagen der Schwingungsrisskorrosion
5.6.3.2.2 Schäden durch Schwingungsrisskorrosion
5.6.3.2.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Schwingungsrisskorrosion
5.7 Wasserstoffinduzierte Risse, Wasserstoffversprödung
5.7.1 Grundlagen der wasserstoffinduzierten Rissbildung
5.7.2 Schäden durch wasserstoffinduzierte Rissbildung
5.7.3 Maßnahmen gegen Schäden durch wasserstoffinduzierte Rissbildung
5.8 Versprödung durch Kontakt verschiedener Metalle
5.8.1 Versprödung durch Kontakt mit Metallschmelzen
5.8.2 Versprödung durch Kontakt mit einem anderen Metall im festen Zustand
5.9 Tribologie (Reibung und Verschleiß)
5.9.1 Grundlagen
5.9.2 Kaltverschweißen (Fressen)
5.9.3 Schwingverschleiß (Fretting)
5.9.4 Schlupf
5.10 Metallfeuer/Metallbrand
5.10.1 Grundlagen
5.10.2 Schäden durch Metallfeuer/Metallbrand
5.10.3 Abhilfen gegen Metallfeuer

© Axel Rosshirt - Turboconsult
Weitergabe nur mit Lizenz

5.10.3.1 Konstruktionen gegen Metallfeuer
5.10.3.2 Löschen von Metallfeuern
5.11 Staubexplosionen
5.11.1 Grundlagen und Schäden
5.11.2 Abhilfen gegen Staubexplosionen
5.12 Elektrische und magnetische Effekte
5.12.1 Elektrische Einflüsse und Effekte
5.12.2 Magnetische Einflüsse und Effekte

Sachregister

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Problemanalysen

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

1. Einführung

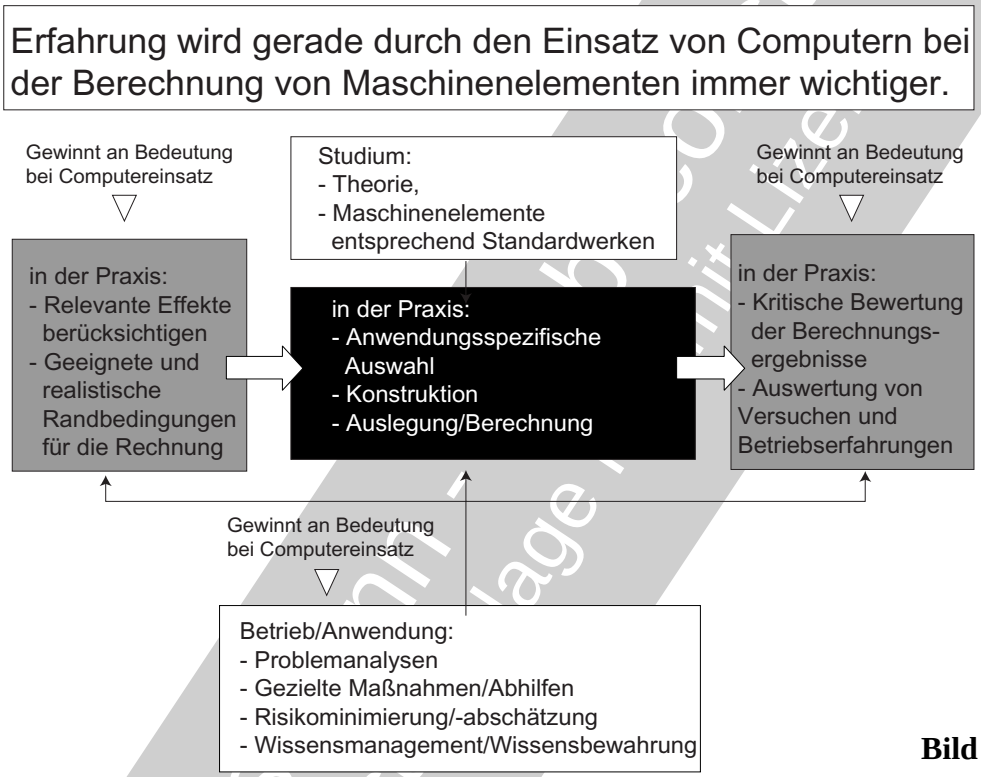


Bild 1-1

Wie konnte es zu bekanntgewordenen spektakulären Schäden kommen? Ein Beispiel ist das Problem gebrochener Radachsen und Radreifen an Hochgeschwindigkeitszügen. Bei genauerer Betrachtung kommt man zu dem Schluss, dass offenbar Konstruktion und Auslegung vor katastrophalen Ausfällen von Maschinenelementen nicht schützten. Offenbar waren wichtige **Einflüsse nicht bekannt oder nicht bewusst**. Damit ist die Aufgabe dieses Buchs umrissen. Neben der hervorragenden Spezialliteratur (z.B. Lit. 1-1 bis Lit. 1-3) zur Auslegung und Berechnung der Maschinenelemente gibt es Handbücher für Ingenieure und Techniker (z.B. Lit. 1-4 bis Lit. 1-6). Darüber hinaus sind jedoch besondere, betriebs- und bauteilspezifische Effekte zu berücksichtigen (Bild 1-2). Beeinflussen sich diese auf unterschiedliche Weise verstärkend (Bild 1-3) oder abschwächend, entziehen sich die Auswirkungen der exakten Berechnung. Einen solchen Mangel gilt es zu mildern.

Oft zeigt sich dieser erst mit **Problemen und Schäden in Herstellung und Betrieb**. Daraus sind die richtigen Schlüsse zu ziehen und in der Auslegung iterativ zu berücksichtigen.

Dazu soll dieses Buch anleiten und so die Standardwerke, die sich mit der Auslegung von Maschinenelementen beschäftigen, ergänzen. In vielen Fällen sind in Fachbüchern Probleme indirekt oder, zumindest für den Nichtexperten, ‘versteckt’ in **Kennwerten, Sicherheitsbeiwerten und Diagrammen** angesprochen. Sie müssen erkannt und für eine Lösung verstanden werden. Das gilt besonders für den **Schadensfall**. Hier gibt es umfangreiche Fachliteratur (Lit. 1-7 bis Lit. 1-9) und Weiterbildungsgelegenheit (Lit. 1-7). Sie ist eher auf Untersuchungen von Schäden fokussiert. Weiter gibt es Bücher zu bestimmten Maschinen wie Motoren bzw. deren Elementen (Lit. 1-10).

Wichtige Literatur behandelt makroskopische (Lit.1-11) und mikroskopische (Lit.1-12 bis 1-14) Bruchflächenauswertung sowie Metallografie (Lit. 1-12 und Lit. 1-14) und ist auf Laboruntersuchungen wie Rasterelektronenmikroskopie und Metallografie fokussiert.

So steht eine Vielfalt eher **werkstoffbezogener Literatur für die Schadensklärung** zur Verfügung. Sie ist üblicherweise mehr der Metallografie zugeordnet. Für eine echte Problemanalyse ist das aber deutlich zu einseitig. Darüber hinaus spielen Auslegung, Betriebsbelastungen Betriebsverhalten und konstruktive Besonderheiten eine entscheidende Rolle. Die Erfahrung zeigt, dass es einem Maschinenbauer leichter möglich ist sich in Werkstofftechnik einzuarbeiten, als das dem Werkstoffspezialisten für den Maschinenbau gelingt. Der Maschinenbauer, insbesondere der Konstrukteur der häufig auch die **Problembeseitigung** verantwortet, vermisst bisher ein **geeignetes Lehrbuch.**

Diese Lücke soll mit dem vorliegenden Werk geschlossen werden. Der Autor greift auf seine langjährige Erfahrung, insbesondere bei Flugtriebwerken*[1]) und davon abgeleiteten stationären Gasturbinen *[2]) zurück. Sie gelten nicht ohne Grund als Spitzentechnologien des Maschinenbaus. Probleme und zur Lösung geeignete Strategien dieser Turbomaschinen gelten immer mehr auch für den allgemeinen Maschinenbau, der zum **Leichtbau** wird. Somit sind sie erfahrungsgemäß bereits in einer frühen Phase des Studiums und später in der beruflichen Tätigkeit von Nutzen. Gewichtseinsparung, Leistungssteigerung, Effizienz, Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung sind die treibenden Einflüsse. Es liegt nahe, von diesen über Jahrzehnte gesammelten und bewährten Erfahrungen zu lernen.

Dem Leser, insbesondere **Studierenden**, sollten Vorgehensweisen und Kenntnisse der präventiven (Entwurf, Konstruktion und Auslegung) und reagierenden (akute Probleme und Schadensfälle) Problem- und Schadensverhütung vermittelt werden. Dies bietet sich als Schwerpunkt des Lehrstoffs zu **Beginn des Studiums** an. Am besten im Rahmen des Fachs ‘Maschinenelemente’. Dabei ist eine möglichst enge Zusammenarbeit mit der „Werkstoffkunde“ anzustreben. So entsteht zusätzliche Motivation und lässt den praktischen Nutzen des umfangreichen angebotenen Wissens erkennen.

*[1]) Alle Bände 1-5 der Serie „**Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik**“ stehen dem privaten Nutzer, insbesondere Studierenden zum **kostenlosen Download als e-book** (ca. 4300 Seiten) **an der Technischen Universität Graz** (TUG), Lehrstuhl Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik zur Verfügung. Ein Link besteht auch von der Home Page des Autors **www.turboconsult.de** zur TUG..

*[2]) Das Buch „**Industriegasturbinen** - problemorientierter Ratgeber für Betreiber“ steht privaten Nutzern, und damit gerade Studierenden auf der Home Page des Autors **www.turboconsult.de** als kostenloser Download zur Verfügung.

Schwerpunktsthemen für den Maschinenbauer

Vorliegend ist Band 1, dessen Schwerpunktsthemen für Betrieb und Auslegung von Maschinenelementen von großer Bedeutung sind. Geplant sind insgesamt 3 Bände. Ein Band befasst sich mit Herstellungs-/Fertigungseinflüssen. Ein anderer mit Betriebsproblemen und -schäden wichtiger Maschinenelemente. Dabei wird besonderer Wert auf die Identifikation spezifischer Schadensmechanismen an Maschinenelementen für gezielte Abhilfen gelegt.

Systematische Problemanalyse:

Probleme und Schäden der Maschinenelemente entstehen häufig in einem komplexen Zusammenwirken mehrerer ursächlicher Einflüsse. Um diese effektiv, nachvollziehbar und dokumentiert zu ermitteln, bietet sich eine sog. Problemanalyse an. Das Vorgehen wird heute in externen Schulungen angeboten. Leider scheint dort der Schwerpunkt auf Managementproblemen zu liegen. Den Konstrukteur interessiert jedoch besonders die Klärung technischer Probleme. So besteht die Möglichkeit einer gezielten Abhilfe bei Schadensfällen. Es ist deshalb unerlässlich, dass er die Grundlagen mit Vorteilen und Schwächen einer Problemanalyse beherrscht.

Problemminimierung in Konstruktion und Auslegung.

Die Erfahrung zeigt, dass gerade zu Beginn eines Projekts die besondere Gefahr von Fehlern besteht. Später sind sie, wenn überhaupt, nur mit großem Aufwand korrigierbar. Häufig handelt es sich um trivial erscheinende Effekte, die jedoch nicht berücksichtigt wurden. Beispielsweise das Kippen eines Fahrzeugs bei besonderen Ausweichmanövern.

Ein weiteres Thema ist die sichere Lebensdauer. Hier sind bei hochbelasteten Elementen moderner Maschinen Langzeiteffekte wie Verschleiß und Korrosion auch in ihrer gegenseitigen Beeinflussung zu berücksichtigen. So können Korrosionsnarben auf Grund ihrer Kerbwirkung Schwingrisse auslösen.

Auch sog. einfache Konstruktionen müssen nicht selten mit erhöhtem technologischen Aufwand und hohen Entwicklungskosten erkauft werden.

Besonders gefährlich sind **nachempfundene Konstruktionen,** deren Hintergrund nicht bekannt und/oder nicht verstanden ist. (z.B.Sicherheitsaspekte, Lizenzprodukte)

Sicherheitsrelevante Überlegungen und Effekte.

Dazu gehört im Versagensfall das Auffangen hochenergetischer Bruchstücke (Containment) oder die Vermeidung bzw. Beherrschung einer Staubexplosion nach dem Bersten eines rotierenden Bauteils aus faserverstärktem Kunststoff.

Auch Überlegungen zum Fail Safe-Verhalten sind frühzeitig notwendig. Dafür ist es notwendig, die unterschiedlichen Ansätze und zielführenden Wege zu kennen. Ein typisches Beispiel sind mehrfach bestimmte Fügungen, von denen üblicherweise wegen der statischen Unbestimmtheit in Konstruktionshandbüchern abgeraten wird. Dazu zählen auch doppelt zentrierte Flanschverbindungen. Sie können jedoch notwendig werden, um beispielsweise das Risiko eines katastrophalen Versagens bei Überlast zu minimieren.

© AachenTurboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Neue Technologien

Sie haben sich auf Gebieten technologischer Vorreiter wie stationären Gasturbinen und Flugtriebwerken bewährt und stehen nun vor der Einführung im allgemeinen Maschinenbau mit dem Trend zum Leichtbau. Oft ist eine befriedigende Behandlung in der vorliegenden maschinenelementspezifischen Fachliteratur nicht zu finden. Dazu gehören neben den Vorteilen solcher Technologien auch Probleme, Besonderheiten und Risiken. Als Beispiele seien genannt:

- Einkristallwerkstoffe,
- Hochfeste Titanlegierungen,
- Intermetallische Phasen,
- Hochfeste Sinterwerkstoffe, hergestellt durch Heißisostatisches Pressen (=HIP).
- Wärmedämmschichten (Thermobarrieren).

Technologiebedingte Entwicklungsrisiken

Oft ist nicht bewusst, welche gefährlichen Auswirkungen scheinbar kleine, **nicht vollständig abgeschlossene Entwicklungsschritte** für Realisierbarkeit und Aufwand bedeuten. So kann eine Nietverbindung an einem Flugzeugrumpf ein Milliardenprojekt gefährden oder als „Show Stopper“ sogar zum Scheitern bringen. Ein weiteres Feld lässt sich unter dem Stichwort „**Verschlimmbesserung**“ zusammenfassen.

Werkstoffverhalten, auch unter Berücksichtigung von Verbunden und Beschichtungen.

Typisch sind:

- Beanspruchungsspezifische Werkstoffbesonderheiten (Hochgeschwindigkeitsverformung, Dwell Time). Kriecheffekte und Auswirkungen. Als Beispiel dienen Ti-Legierungen: Schwingfestigkeitsabfall bei Fretting, SpRK in Salz ab 450°C, Lötrissigkeit im Kontakt mit Silber.
- Auswirkungen bruchmechanischer Effekte auf das Bauteilverhalten (Größeneinfluss, Wanddicke, Korrosion, kritische Fehlergröße, Qualitätssicherung, Rissfortschrittsgeschwindigkeit).
- Kombination von Betriebseinflüssen.
- Erprobungen und Nachweise.
- Systematische Problemanalysen.
- Bauteilspezifische Schadensformen.
- Überwachung von Maschinen.
- Verfügbarkeit von Halbzeug. (Schwachstellen, Fehler, Qualitätssicherung)
- Einfluss von Fertigungsverfahren.
- Reparierbarkeit, Möglichkeit und Grenzen.(Reibschweißung möglich? Entschichtung/-Ätzen?)

Lebensdauerbegrenzte Bauteile:

Hierzu gehören Begriffe/Effekte die oft unter einer englischen Fachbezeichnung verwendet werden.

- Belastungen mit merklicher plastischer Verformung („Low Cycle Fatigue“ = LCF).
- Auslegung unter Berücksichtigung von Risswachstum („Damage Tolerant Design“).
- Thermische Ermüdung („Thermal Fatigue“, „Thermal Mechanical Fatigue“)
- Bauteilüberwachung („Monitoring“).
- Kriechen von Heißteilen.
- Abschätzung der Schädigung bzw. der Restlebensdauer.

© AVIO Graenn Turbocon lt
ausschließlich für Unterlagen nur mit Lizenz

- Wieder-/Weiterverwendung („Retirement for Cause“).

Reparaturfähigkeit:

Komplexere und/oder teure Bauteile sowie Ressourcen- und Umweltaspekte fordern eine verstärkte Berücksichtigung der Reparierbarkeit. Ein Beispiel sind Tauschteile von Kraftfahrzeugen. Zu berücksichtigen sind

- Kosten.
- Verfahren:
  - Eignung,
  - Verfügbarkeit,
  - Zeitaufwand.
- Werkstoff:
  - Veränderungen im Betrieb,
  - Schweißeignung,
  - Art der Schädigung,
  - Werkstoffkombinationen, z.B. bei Beschichtungen.
- Zugänglichkeit am Bauteil (z.B. galvanische oder thermische Beschichtung, Lackierung).
- Maßanforderungen.
- Einfluss auf das Betriebsverhalten (z.B. Schwingfestigkeit, Korrosion).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

***Bild 1-2**: **Das Betriebsverhalten eines Maschinenelements** ergibt sich aus dem wechselseitigen **Zusammenwirken** der äußeren Einflüsse mit dessen ‘Antwort’. Die äußeren Einflüsse sind oft sehr vielseitig und bei weitem nicht nur von mechanischen Belastungen gekennzeichnet. Dazu gehören Verschleiß und Erosion. Sie können die Auswirkungen äußerer Kräfte, z.B. über eine Veränderung der Krafteinleitung an Auflageflächen beeinflussen. Das Zusammenspiel wird noch komplexer, wenn die äußeren Einflüsse zusammenwirken (Bild 1-2, Kapitel 5.1 und Kapitel 5.6.2). Es ist nicht immer damit zu rechnen, dass der Werkstoff seine, in der Auslegung zugrundegelegten, Eigenschaften über die gesamte Betriebszeit beibehält. Das gilt nicht nur für mögliche Schädigungen wie Rissbildung. Auch das Gefüge und damit die Festigkeitseigenschaften können sich, insbesondere unter Temperatureinwirkung verändern (Kapitel 5.3, Bild 5.3.2-6 und Bild 5.6.1.4.2-2). **Natürlich ist trotz dieser Problematik eine rechnerische Auslegung von Maschinenelementen bzw. bei der Auswahl von Normteilen unabdingbar**. Die Standardwerke der Maschinenelemente (eine Auswahl zeigt Lit. 1-1 bis Lit. 1-6) enthalten bereits über Jahre gesammelte, umfangreiche, erfahrungsbasierte Auslegungsdaten. Diese werden in Diagrammen und Kennwerten für die Berechnung zur Verfügung gestellt. Sie geben oft eine Streubreite an, in welcher der Konstrukteur nach Einschätzung der Anwendung auswählt. Es besteht eine häufig vorhandene Möglichkeit, diese mit einer anwendungsrelevanten Berücksichtigung der Betriebseinflüsse zu ergänzen. Der Schlüssel ist **Betriebserfahrung**. Sie ist deshalb systematisch auszuwerten und muss in **Konstruktionshandbüchern**, meist firmenintern, Eingang finden. Hier kommt es darauf an, die tatsächlich relevanten Betriebseinflüsse mit den zugehörigen Schadensmechanismen möglichst sicher zu identifizieren. Dafür ist die technische Problemanalyse (Kapitel 2) ein unverzichtbares Hilfsmittel. Äußerst hilfreich*

Die Einflüsse auf das Betriebsverhalten eines Maschinenelements sind derart vielfältig und ihr Zusammenwirken so komplex, dass sich die Auswirkungen der exakten Berechnung entziehen.

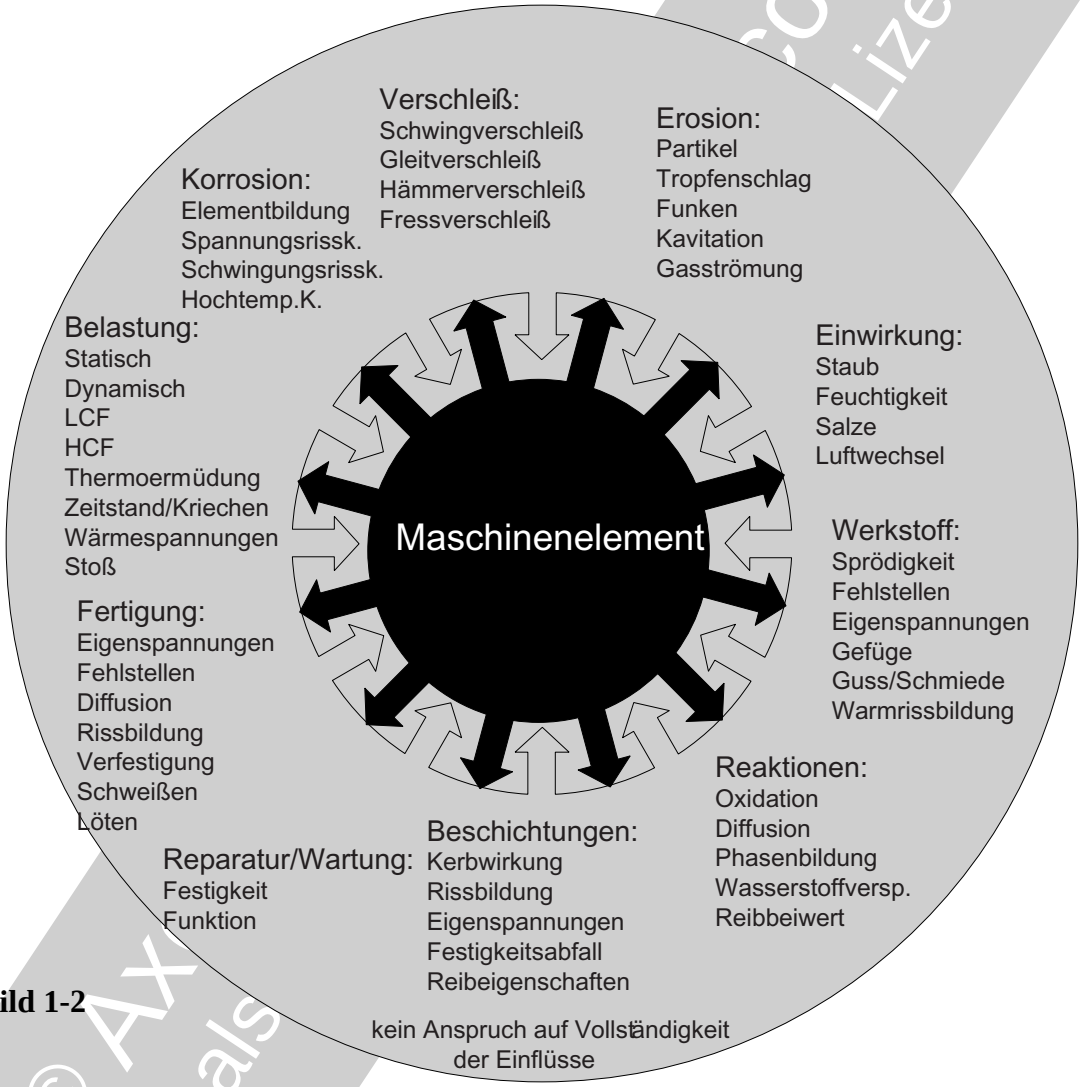


Bild 1-2

ist Literatur, die sich mit ***Schadensuntersuchungen*** *befasst (Lit. 1-7 bis Lit. 1-14). Mangelt es an Erfahrung, besteht die Möglichkeit diese in* ***ausreichend betriebsnahen Versuchen*** *zu erarbeiten. Dabei ist es notwendig, dass auch Besonderheiten des Betriebs/ Betreibers wie Nutzungsintervalle (z.B. mit Einfluss auf Korrosion) und Wartungsbesonderheiten berücksichtigt werden. Natürlich ist Erfahrung zeit- und kostenaufwändig.*

Bild 1-3*: Häufig und in ihrer Wirkung überraschend kann sich ein Zusammenwirken mehrerer Betriebseinflüsse auf eine verkürzte Lebensdauer auswirken (Kapitel 5.1 und Kapitel 5.6.2) wie die folgenden Beispiele zeigen.*

*„****A****“: Erhöhte Gastemperaturen verlangen an Bauteilen moderner Kraftwerke wie Rohrleitungen von Dampfkesseln oder Schaufeln von Gasturbinen eine intensive* ***Innenkühlung****. Tritt nun in einem besonders heißen Wandbereich auf der Seite des Kühlmediums ver-*

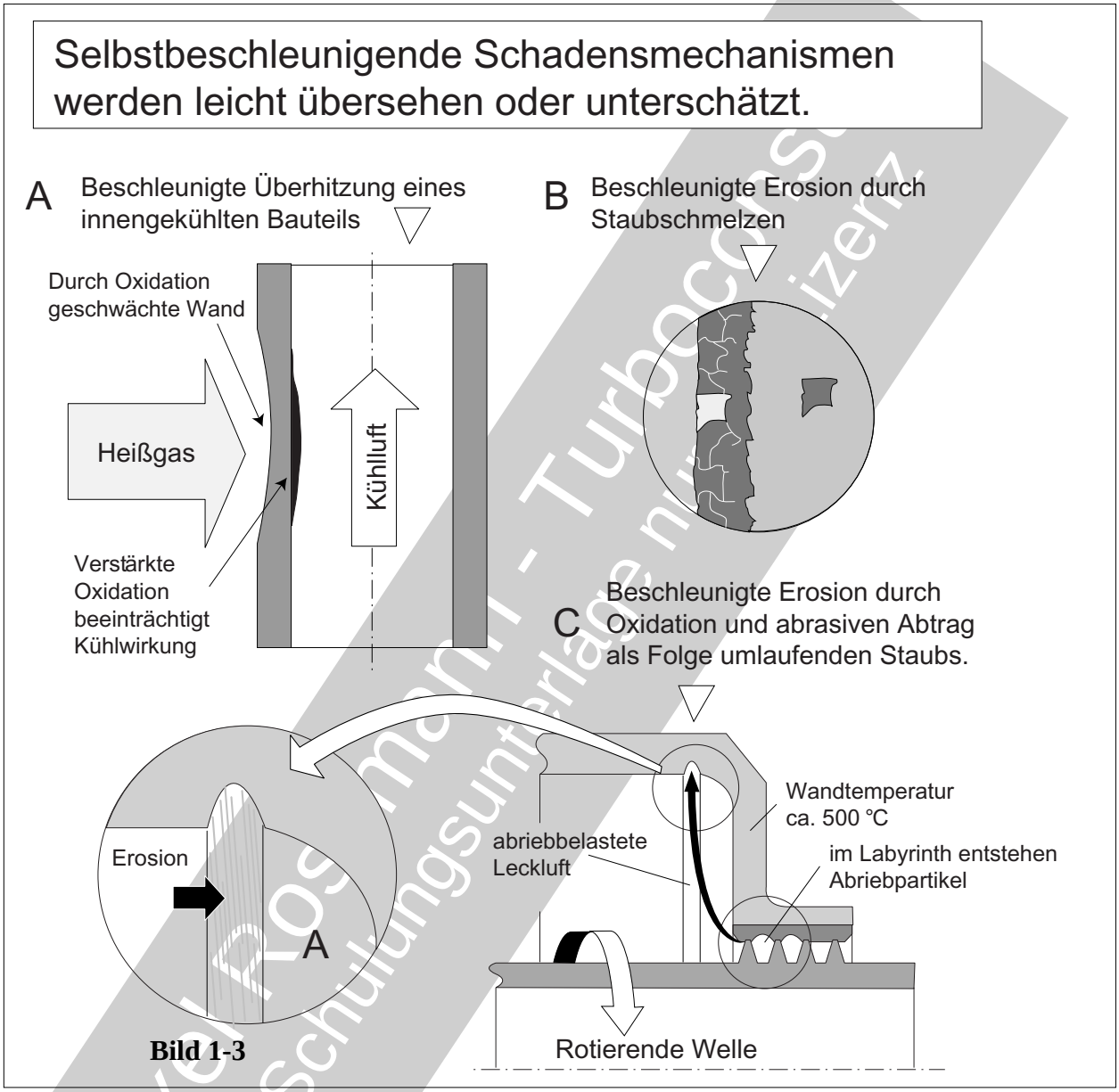


Bild 1-3

*stärkt **Oxidation** auf oder bilden sich **Ablagerungen,** wirken diese **wärmeisolierend**. Dies führt zur weiteren Temperatursteigerung der Wandung und entsprechend verstärkter Oxidation. So wächst die Gefahr eines Versagens durch Überhitzung exponentiell (Bild 5.3.2-4).*

*„**B**“: Kommt es zum Schmelzen mitgeführten Staubs im Heißgas, kann dieser auf kälteren, gekühlten Bauteilen wie Rohren erstarren und festbacken. **Reaktionen mit der vorhandenen, schützenden Oxidschicht** führen beim **Abkühlen und Abplatzen der Ablagerungen** zum Freilegen der reaktiven metallischen Oberfläche (Bild 5.1-2). Wiederholt sich dieser Vorgang, ist eine unerwartet hohe Abtragsgeschwindigkeit zu beobachten. Eine von der Wandungsdicke bestimmte Lebensdauer wird so deutlich verkürzt.*

*„**C**“: Dieser Schadensmechanismus ähnelt dem in „B“. Zum Unterschied entstehen hier reaktive Metalloberflächen durch **Partikelerosion**. Aus einem Labyrinth tretender harter Abrieb fängt sich im benachbarten Hohlraum und wird von einer intensiven umlaufenden **Luftströmung mitgerissen** (Bild 5.5.1.1-6). Bei ausreichend hoher Bauteiltemperatur kommt es zum beschleunigten Abtrag durch die Kombination von **Verschleiß und Oxidation**.*

© Axel Rosemann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur Lizenz

Literatur 1

1-1 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, ISBN 3-540-25125-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005.

1-2 G.Niemann, H.Winter, „Maschinenelemente Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe“, ISBN 3-540-11149-2 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.

1-3 G.Niemann, H.Winter, „Maschinenelemente Band 3: Schraubrad-, Kegelrad-, Schnecken-Ketten-, Riemen-, Reibradgetriebe, Kupplungen, Bremsen, Freiläufe“, ISBN 3-540-10317-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1983.

1-4 H.Czichos, M.Hennecke (Herausgeber), „Hütte-Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften“, 33. Auflage, ISBN 3978-3-540-71851-2, Springer-Verlag, Berlin 2007.

1-5 K.-H.Grote, J.Feldhusen (Herausgeber), „Dubbel- Tascchenbuch für den Maschinenbau“, 22. Auflage, ISBN 3540-6-8191-4 Springer-Verlag 2007.

1-6 A.Böge, „Das Techniker Handbuch, Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbautechnik“, ISBN 3528440538 Verlag Friedr. Vieweg + Sohn Braunschweig

1-7 J.Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau, Charakteristische Schadensursachen-Analyse und Aussage von Schadensfällen“, ISBN 3 - 8169 - 1202 - 8 TAE Kontakt&Studium Band 308, Expert Verlag.

1-8 „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11 Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-017-4 Verlag American Society For Metals (ASM), Metals Park, Ohio, 1986.

1-9 „Handbuch der Schadenverhütung“, Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1972.

1-10 E.Greuter, „Motorschäden Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen“, ISBN 3-8023-1515-4 Vogel Buchverlag, 1994.

1-11 E.J.Pohl, „Das Gesicht des Bruches“ Engl. Ausgabe „The Face of Metallic Fractures, Volume I und II“, Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, 1964.

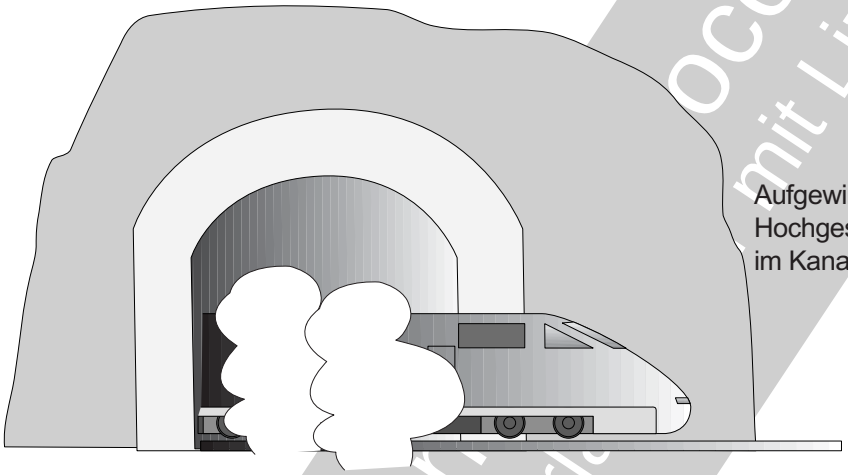
1-12 „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 12 Fractography“, ISBN 0-87170-007-7 Verlag American Society for Metals (ASM), Metals Park, Ohio 1987.

1-13 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, ISBN 3-446-13416-6 Carl Hanser Verlag München Wien, 1982.

1-14 „Erscheinungsformen von Rissen und Brüchen metallischer Werkstoffe“, ISBN 3-514-00463-3 Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997.

© Axel Rossmann - Tutorconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

1.1 Die Gefahr unberücksichtigter Betriebsbedingungen



Aufgewirbelter Schnee bringt Hochgeschwindigkeitszüge im Kanaltunnel zum Stehen.

© AXIOMsmart consulting
Nur zum persönlichen Gebrauch mit Lizenz
Das Kopieren ist untersagt

Selbstverständlich verlangen **Auslegung und Auswahl von Maschinenelementen** die Kenntnis zu erwartender Betriebsbedingungen bzw. Einflüsse. So scheint diese Forderung trivial. Die Praxis in Form vieler bekannt gewordener, oft spektakulärer Probleme und Schäden vermittelt jedoch ein anderes Bild. Oft wurden Effekte nicht berücksichtigt weil sie zwar bekannt, d.h. das erforderliche **Wissen latent vorhanden, aber zum kritischen Zeitpunkt der Auslegung nicht bewusst** war.

Dazu gehört das **Versagen der Elektronik von Zugantrieben** durch Einwirkung der Feuchtigkeit aufgewirbelten Schnees aus Kondenswasser (Lit. 1.1-10 und 1.1-11).

Auch das **Umfallen von PKWs** bei Ausweichmanövern dürfte dazu zählen. Es geht offenbar um simple Überlegungen zur Schwerpunktslage höher gebauter Autos im Bewusstsein extremer Manöver in Notsituationen. In der Entwurfsphase wurde dem anscheinend nicht genügend Aufmerksamkeit gewidmet.

Ein weiteres Beispiel ist der **Bruch von Radachsen** der Bahn (Lit. 1.1-5, Lit. 1.1-6 und 1.1-9). Scheinbar wurde übersehen, dass **höhere Belastungen auch eine entsprechende Steigerung der Werkstoffqualität** (kleinere Schwachstellen) fordern.

Eine besondere Gefahr besteht bei der **Änderung bzw. 'Verbesserung'** langjährig bewährter Konstruktionen, empirisch entwickelter **Lizenzprodukte oder der Übernahme unverstandener Konstruktionen**. Auch hier zeigt die Erfahrung, dass **nur eigene Entwicklung und Erprobung** das notwendige Wissen über sicherheitsrelevante Betriebseinflüsse ermöglicht.

Immer wieder handelt es sich um Einflüsse die scheinbar trivial sind, die aber gerade am **Beginn eines Projekts** nicht betrachtet wurden. Davor sollte ein gezieltes **Wissensmanagement** und eine systematische Vorgehensweise bei Dokumentation und Nutzung von **Erfahrung** schützen. Diese ist oft produkt- bzw. firmenspezifisch und deshalb nicht Gegenstand der Lehre.

Bild 1.1-1 *(Lit. 1.1-5 bis Lit. 1.1-11): Im Zusammenhang mit* ***Problemen aus fehlender Erfahrung*** *wurden eine Vielzahl spektakulärer Fälle bekannt. Diese zeigen die Relevanz des Problems unbefriedigend betriebssicher ausgelegter Bauteile.*

*„**A**“* ***Neigetechnik*** *bei Zügen (Lit. 1.1-7 und Lit. 11-8) die für eine schnelle Durchfahrt von Kurven entwickelt wurden. Die* ***Betriebseinflüsse*** *des problematischen Einsatzes scheinen sich zu unterscheiden. Es kam zu*
- Rissbildung in Radwellen (Lit. 1.1-9),
- Ausfall der Neigetechnik (‘Funktionsfehler’, ‘Konstruktionsfehler’, Lit. 1.1-8) das ein, zumindest zeitweises, Abschalten des Neigesystems an allen vergleichbaren Zügen zur Folge hatte.

*„**B**“* ***Veränderung erprobter Fertigung*** *(Lit. 1.1-2): Der Konstrukteur muss sich auf die* ***erfahrungsbasierten Auslegungsdaten*** *verlassen können. Diese werden entscheidend von der Herstellung beeinflusst. So kann sich die* ***Zerspanung*** *deutlich auf die Schwingfestigkeit des Bauteils auswirken. Werden die relevanten* ***Parameter*** *z.B. wegen des Kostendrucks verändert, kann das gefährliche Auswirkungen auf die Schwingfestigkeit haben. Das gilt natürlich auch für scheinbar ’harmlose’* ***Werkstoffänderungen*** *oder den* ***Umstieg auf andere Fertigungsverfahren****. Müssen beispielsweise gesundheitsbedenkliche Werkstoffe wie Asbest ersetzt werden, ist ein sicherer* ***Tauglichkeitsnachweis****, z.B. bei Bremsbelägen, äußerst zeit- und kostenintensiv, aber trotzdem unerlässlich.*

*„**C**“* ***Nicht ausreichend bekanntes Werkstoffverhalten****: Hier besteht die Gefahr, dass sich erst unter Betriebsbedingungen* ***unerwünschte oder gefährliche Eigenschaften*** *zeigen. Eine typische Situation tritt beim Umstieg von Hilfsstoffen (z.B. Schmiermittel) und Werkstoffen ein. So kann sich bei einer Verschraubung das notwendige Anzugsmoment für die erforderliche Vorspannung ungünstig verändern. Das senkt die Schwingfestigkeit der Verbindung. Auch werkstoffspezifische Langzeitveränderungen durch den Betrieb müssen berücksichtigt werden. Ein Beispiel ist der enorme Schwingfestigkeitsabfall hochfester Titanlegierungen unter Reibverschleiß (Fretting, Bild 5.9.3-4).*

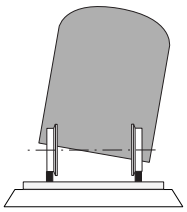
*„**D**“* ***Ungenügende Absicherung von Daten*** *für die Berechnung: Ein typisches Beispiel ist das* ***Crashverhalten*** *von Fahrzeugzellen, der Einschlag von Vögeln (Bild 5.2.4-7 und Bild 5.2.2-12, Lit. 1.1-1) auf Schaufeln von Flugtriebwerken und die Durchschlagswirkung energiereicher Bruchstücke (Bild 3-15, Kapitel 5.2.2, Lit. 1.1-1). So müssen die Programme* ***iterativ anhand von Hardwareversuchen optimiert*** *werden, bis die Rechnung einen realitätsnahen Ablauf darstellt.*

*„**E**“* ***Mangelhafte Kenntnis der Umwelteinflüsse*** *im Betrieb: Sie ist trivial und trotzdem Ursache spektakulärer Probleme. Ein Beispiel sind Züge. Betroffen sind unterschiedlichste Komponenten/Maschinenelemente :*
- ***Ausfall von Elektronik durch Schwitzwasser*** *bei großen Temperaturunterschieden (z.B. innerhalb und außerhalb eines Tunnels).*
Ein vergleichbarer Effekt entsteht im Tunnel bei aufgewirbeltem feinen Schnee der in Lüftungsschlitze dringt (Lit. 1.1-10).
- Probleme mit Klimaanlagen.
- ‘Türschließproblematik’ bei Vereisung.
- Kritisch lange Bremswege durch Laub auf Schienen (Lit. 1.1-7).
- ***Versagen der Klimaanlage*** *wegen zu schwacher Auslegung weil die hohe Temperatur der angesaugten, aufgeheizten Luft über dem Schotterbett nicht ausreichend berücksichtigt wurde.*

*„**F**“ Der* ***Übergang zum Leichtbau*** *ist gewöhnlich ‘schleichend’ über Jahre. Konventionelle Auslegungen werden schrittweise in Leichtbau überführt. In diesem Prozess kann Erfahrung mit schwererer Bauweise für Neu-*

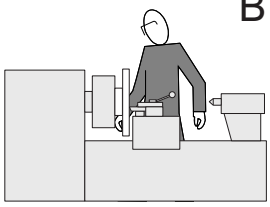
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Beispiele in denen offenbar wichtige Betriebseinflüsse bei der Auslegung/Entwicklung übersehen wurden.

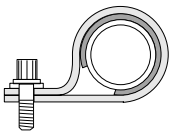


A Nicht ausreichende produkt- und anwendungsspezifische **Erfahrung**

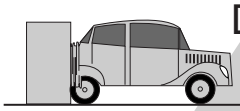
Übernahme **nicht ausreichend verstandener Konstruktionsprinzipien**/ -philosophien.



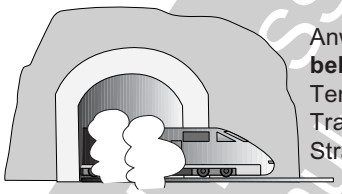
B **Veränderungen in der Fertigung**/Produktion (z.B. zur Kostenminimierung)
Bei eigener Technologie
- 'Fertigungsoptimierung' wie Änderung der Parameter oder Anwendung anderer Werkzeuge und Hilfsstoffe (z.B.Schneidstoff, Kühl-Schneidmittel
- Einführung neuer Verfahren, z.B. Elektrochemie statt Zerspanung.
- Werkstoffwechsel. z.B. mitgeändertem Zerspanungsverhalten oder Umstieg wegen Umweltverträglichkeit (Asbest)
- Bei Lizenzfertigung besteht besondere Gefahr.



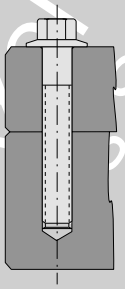
C Produktentwicklung **ohne genügend praxisrelevante Hardwareversuche.** (z.B. bei kombinierten Einflüssen wie Verschleiß und Korrosion)
- Neue Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften (z.B. Frettingeinfluss bei Titanlegierungen, Neigung zum Kaltverschweißen/Fressen)



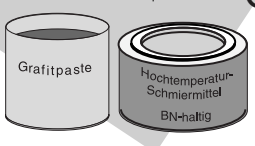
D Anwendung einer **Software mit 'Schwächen'**, die z.B. für ein lediglich ähnliches Problem entwickelt wurde (z.B. Crashprogramm für Aufschlag eines biologischen Körpers).



E Anwendung einer Technologie/Konstruktion in **nicht ausreichend bekannter Umwelt** (Wüste, Große Höhe, Hohe Temperaturen, große Temperaturschwankungen, Wartungsdefizite, korrosive Atmosphäre, Transportbesonderheiten, schlechter Zustand von Transportwegen: Straße, Schiene).



F **Übergang auf Leichtbau**
- Werkstoffänderung (z.B. zu Leichtmetallen wie A,-, Mg-, und Ti-Legierungen)
- Höhere Auslastung (Hoch belastetes Volumen bzw. Oberfläche) von Bauteilen. Z. B. Nutzung hochfester Schrauben. (Schwachstellen werden zu Fehlern, Qualitätssicherung genügt nicht mehr, 'neue' Schadensmechanismen wie SpRK).



G **Wartungsarbeiten**:
- Verlängerung von Wartungsintervallen.
- Änderung von Hilfsstoffen (z.B. Reinigungsmedien, Schmiermittel)
- Änderung von Abläufen

Bild 1.1-1

*entwicklungen an Relevanz verlieren. Sie muss für die Leichtbauvariante erst gesammelt werden. Das gilt gerade für die Einführung neuer, leichterer Werkstoffe. Ein Beispiel sind Schrauben aus Leichtmetallen (Bild 3-15). Großer Wärmedehnungsunterschied zwischen Leichtmetall (z.B. Motorblock aus einer Mg-legierung) und Stahlschrauben führt zu unzulässigen **Wärmespannungen**. Ein weiteres Problem ist **Korrosion** (Elementbildung).*

© Axel Hessmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

*„**G“ Geänderte Wartung**: Sie kann aus dem Gesichtsfeld des Konstrukteurs geraten. Sie muss jedoch in der Auslegung (z.B. **Inspektionsintervalle**, oder **Durchführbarkeit** - Human Factors) berücksichtigt werden.*

© Rossmann - Tuhoconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Literatur 1.1

1.1-1 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1, ISBN 3-00-005842-7, 2000, Kapitel 5.2.2.2.

1.1-2 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 4, ISBN 3-00-017734-5, 2005, Kapitel 16.2.1.1, Kapitel 17.

1.1-3 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, ISBN 978-3-00-025780-3, 2008, Seiten 19.1-4, Kapitel 22.4.1

1.1-4 W.Scheiding, „Verschrauben von Magnesium braucht mehr als Allgemeinwissen - Was Konstrukteure wissen und beachten sollten“, Zeitschrift: „ke konstruktion + engineering“, Juni 2001, Seite 1-8.

1.1-5 „Schadensanalyse Radsatzwelle ICE-3 - Stand 2008-09-29“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Auftragsnummer BAM-V.3/566, Vorab-Präsentation EBA, DB, 2008-09-24.

1.1-6 „Die Gefahren werden ignoriert - Interview mit Prof. Vatroslav Grubisic“ Sonderzeitung des Bündnisses Bahn für Alle - Winter 2008/09, www.bahn-fuer-alle.de, Seite 1-4.

1.1-7 Antwort der Landesregierung auf eine kleine Anfrage zum Thema: „Zuverlässigkeit des Schienenpersonennahverkehrs (PNV) in Sachsen-Anhalt“, KA 5/6940, 23.09.2009, Seite1-4.

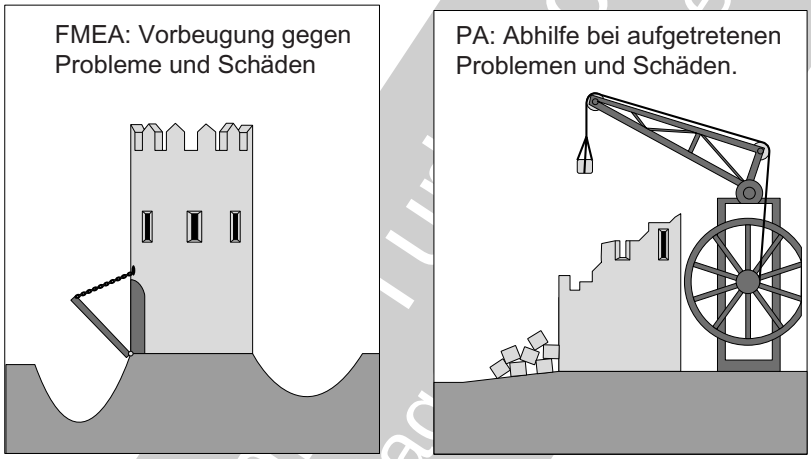
1.1-8 „Neigetechnik in Zügen abgeschaltet“, Stuttgarter Zeitung, 11. März 2010, www.stuttgarter-zeitung.de.

1.1-9 „Verspätete Regionalzüge“, Stuttgarter Nachrichten, 23.10.2009, content.stuttgarter-nachrichten.de.

1.1-10 „Eurotunnel - Abschnitt Unfälle/Pannen“, de.wikipedia.org, 11.03.2010, Seite 6.

1.1-11 „Panne im Ärmelkanal-Tunnel, Wieder steckt ein Eurostar-Zug fest“, Zeitung „Frankfurter Allgemeine“, www.faz.net, 11.03.2010.

2. Strategien und Vorgehen zur Vermeidung von Problemen.



Zunächst wäre nach dem Unterschied zwischen einem **Problem, einem Fehler und einem Schaden** zu fragen. Es folgen für dieses Buch gültige Definitionen.

Problem ist der übergeordnete Begriff. Er umfasst Hardware und Software. Es handelt sich um einen unerwünschten Zustand. Der kann in jeder Phase einer Entwicklung wie Auslegung, Konstruktion, Realisierung, Betrieb und Wartung auftreten.

Ein **Fehler** ist die **Abweichung des Ist vom Soll**. Diese Definition lässt weitere problemspezifische Definitionen zu. Beispielsweise handelt es sich bei einem Überwachungssystem von Maschinen um einen bekannten bzw. erkannten, ungewöhnlichen Zustand (Bild 3.3-4).

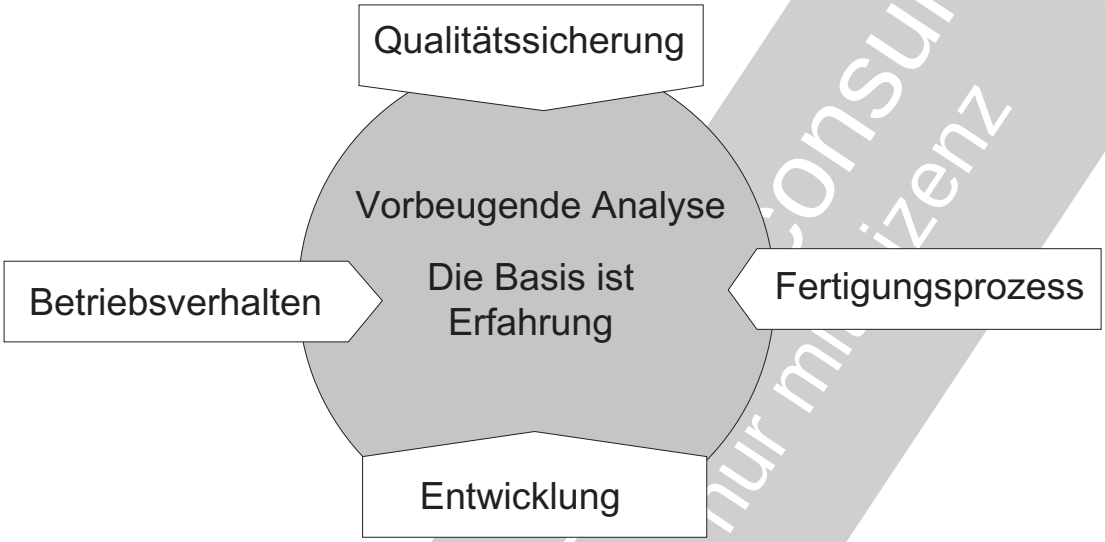
Ein **Schaden** ist bei Hardware der bereits **eingetretene** oder sich **ankündigende Ausfall**.

Für den Konstrukteur und Bauteilverantwortlichen ist von entscheidender Bedeutung, dass er selbst bei Problemen und Schäden tragfähige Entscheidungsgrundlagen schafft. Dazu ist es mit einer Schadensuntersuchung alleine gewöhnlich nicht getan. Für sie bietet sich die Zusammenarbeit mit einer firmeninternen Fachabteilung, meist Metallografie (Bild 5.2.2.4-1) und REM (Bild 5.2.2.4-2) oder einem geeigneten Institut an. Sie können die gesamten Laboruntersuchungen mit Bewertungsunterstützung unter der Koordination und Gesamtverantwortung des Auftraggebers übernehmen. Aus diesem Grund ist es nicht zwingend notwendig, dass der für die Problemanalyse Verantwortliche auch in Schadensuntersuchungen bzw. den zugehörigen Laboraufgaben Fachmann ist.

Dieses Kapitel soll sich in erster Linie mit **Strategien zur vorbeugenden Vermeidung von Fehlern und Problemen** (FMEA, Bild 2-1) oder zur Erarbeitung nachträglicher Abhilfen (PA, Bild 3-2) beschäftigen. Dabei steht die **Bauteilsicherheit** im Vordergrund. Der Kostenaspekt, wie die Minimierung von Ausschuss und höchste Kosteneffizienz, tritt dagegen, anders als in der meisten Fachliteratur aus dem Fertigungsbereich, zurück.

Anschließend werden einige ausgewählte, typische Einflüsse und Situationen behandelt, welche die Häufigkeit von Fehlern beeinflussen.

2.1 Vorbeugende Analysen



‘Vorbeugen ist besser als Heilen’. Deshalb sind solche Analysen (z.B. FMEA) besonders empfehlenswert. Sie zeigen **Schwachstellen** auf und erlauben gegebenenfalls begründete und gezielte **Gegenmaßnahmen**.Vorteilhaft ist, wie auch bei Problemanalysen, wenn ein Moderator, der mit der Vorgehensweise vertraut ist, zumindest anfangs den Ablauf betreut.

Bild 2-1 *(Lit. 2-2 und Lit. 2-4): Die* ***Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*** *(FMEA) stellt in erster Linie, im Gegensatz zur Problemanalyse (Bild 2-2), ein* ***präventives Verfahren*** *dar. Sie dient neben anderen Anwendungszwecken als* ***Vorarbeit einer Risikominimierung****, der* ***Risikoanalyse*** *und der Ermittlung der Risikopriorität. Mit ihr lassen sich* ***potenzielle Fehler systematisch erfassen und vermeiden****. Gerade dieses systematische, nachvollziehbare und dokumentierbare Vorgehen ist ein wichtiges Merkmal der FMEA. Mit einer solchen Analyse lassen sich* ***Fehlerursachen erkennen*** *und man erhält so* ***Hinweise auf Maßnahmen*** *zur Vermeidung der Fehler. Die FMEA ist damit ein äußerst wirksames Werkzeug für Konstrukteure, Entwickler, Fertigungs- und Prüfplaner zur Minimierung potenzieller Probleme. Sie wird besonders effektiv* ***vorbeugend****, bereits parallel zu Entwicklungsphasen, bei sicherheitsrelevanten Bauteilen und/oder Problemteilen eingesetzt.*
Neu entwickelte Bauteile, Verwendung neuer Werkstoffe oder neuer Verfahren *sind typische Anlässe für eine FMEA im Fertigungsbereich.*

Ablauf: *Voraussetzung ist die* ***Klärung der technischen Funktionen*** *zu betrachtender Systeme (Betrachtungseinheiten). Hierzu gehört auch deren Zusammenwirken. Dies lässt sich am besten bei einem Lokaltermin durch das gesamte Analyseteam erreichen. Darüber hinaus müssen den Teammitgliedern* ***alle relevanten Unterlagen bekannt sein und vorliegen****. Diese nicht unerhebliche Vorarbeit ist im* ***Zeit- und Kostenrahmen*** *vorzusehen.*
Auf keinen Fall dürfen Tabus *aufgebaut werden. Das erfordert, dass grundsätzlich nicht von Fehlerfreiheit auszugehen ist. Um diese „Geisteshaltung“ zu erreichen, kann eine Schulung notwendig werden.*

Analyse: *Selbstverständlich geht man nach einem Plan, am besten in Form eines Formblattes vor (mittlerer Rahmen), das für die Anwendung (z.B. Fertigungsprozess oder Konstruktionsprozess) optimiert wurde. Den* ***Betrachtungseinheiten/-merkmalen*** *(hier nur Auflistung für einen Fall dargestellt) werden die* ***potenziellen Fehler*** *zugeordnet. Es han-*

© AvGI Rossmann - consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

FMEA = Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse = Failure Mode and Effects Analysis, eine wichtige Methode zur Fehler- und Risikominimierung.

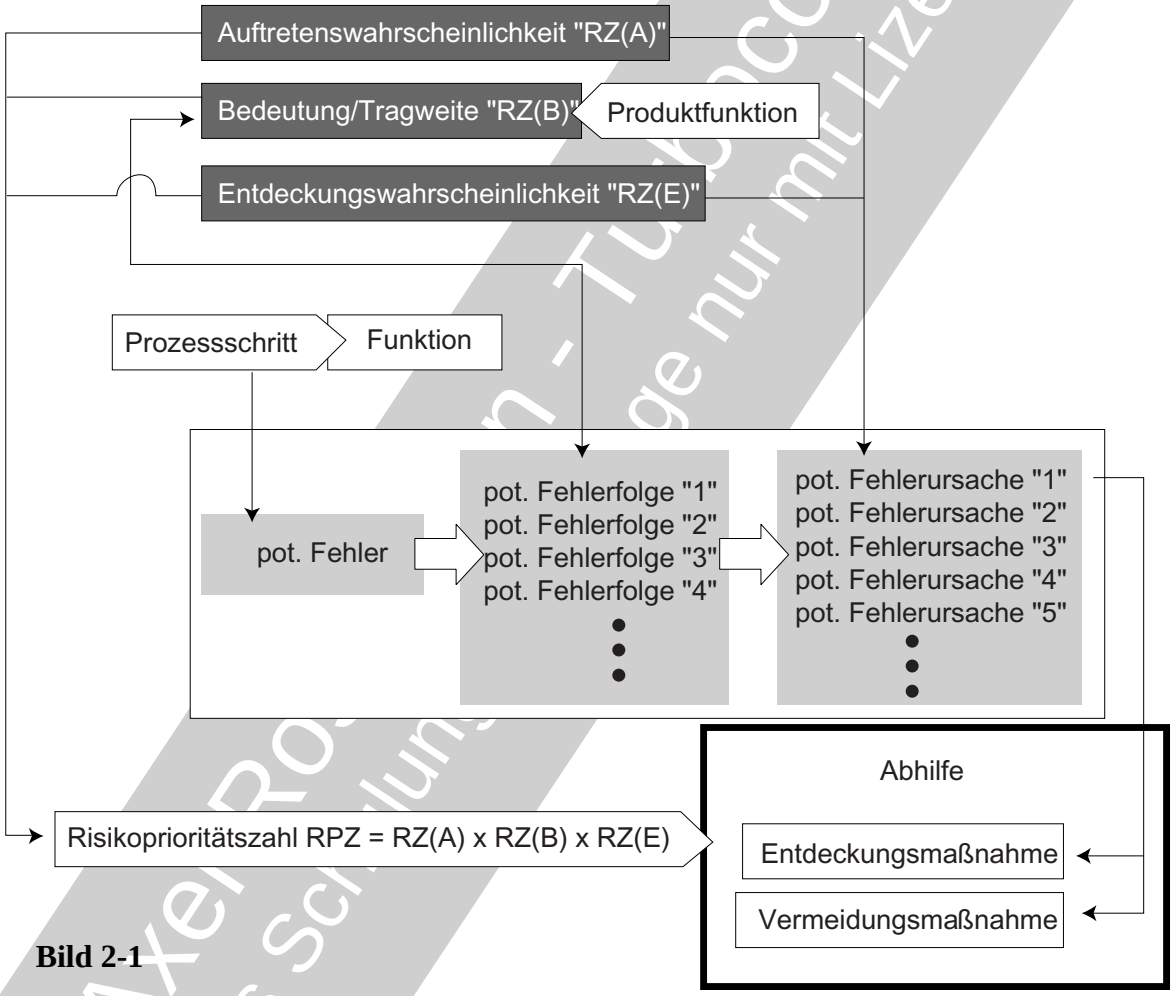


Bild 2-1

delt sich um alle denkbaren Fehler, unabhängig von ihrer Wahrscheinlichkeit.
Die potenziellen Fehler haben ***potenzielle Fehlerfolgen****. Hierzu gehören Folgen auf den anschließenden Fertigungsprozess sowie den späteren Betrieb im verbauten Zustand.*
In einer eigenen Spalte werden zu den Fehlern die ***potenziellen Fehlerursachen*** *aufgelistet.*
Risikobewertung*: Treten in der vorher erklärten Zusammenstellung mehrere Fehlerfolgen auf, was zu erwarten ist, ist* ***die schwerwiegendste der Risikobewertung zu Grunde zu legen****. Für Fehler mit mehreren potenziellen Ursachen sind alle Kombinationen zu berücksichtigen. Die Risikobewertung erfolgt über die Ermittlung der sog.* ***Risikoprioritätszahl*** *(RPZ). Diese ergibt sich aus dem* ***Produkt der Risikozahlen*** *(RZ) die über eine jeweilige Bewertung in einer 10er-Skala ermittelt werden:*

RZ (A) *für die* ***Auftretenswahrscheinlichkeit des Fehlers*** *im Zusammenhang mit der Fehlerursache. Dabei wird vorausgesetzt, dass Fehler und Fehlerursache erst nach auffallenden*

Auswirkungen entdeckt werden. Die Wahrscheinlichkeiten werden geschätzt und tabellarisch in übergeordnete Beurteilungen eingeteilt in:
- unwahrscheinlich,
- sehr gering,
- mäßig,
- hoch
und einzeln den jeweiligen abgeschätzten Häufigkeiten zugeordnet. Diese dienen zur Bewertung der RZ (A) die mit der Auftretenswahrscheinlichkeit bis 10 ansteigt.

***RZ (B)** für die **Bedeutung des Fehlers bewertet die Folgen bzw. Auswirkungen.** Dies kann sich auf den anschließenden **Fertigungsprozess (Prozess-FMEA)** oder Auswirkungen im **späteren Betrieb (Kunden-FMEA)** beziehen. Die RZ (B) steigt mit der Bedeutung des Fehlers bis 10 an.*

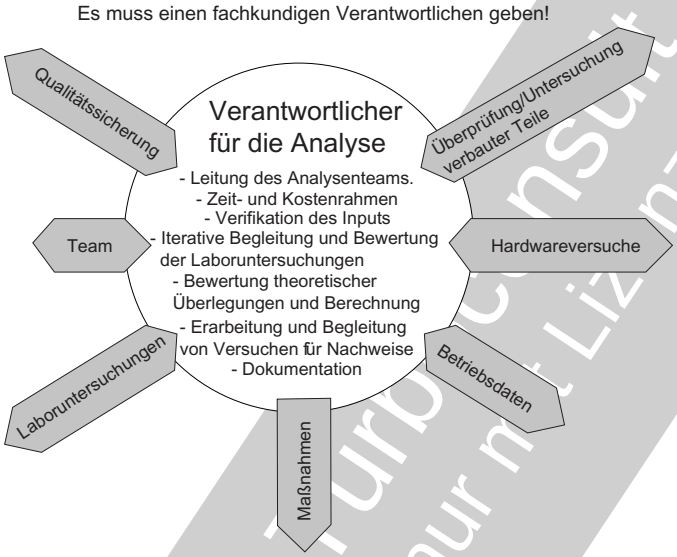
***RZ (E)** für die Wahrscheinlichkeit den **Fehler zu entdecken**.Dabei kann je nach Problemlage die Wahrscheinlichkeit für die Auslieferung an den Kunden oder für die Entdeckung im Fertigungsprozess betrachtet und bewertet werden. Die Bewertung erfolgt für die Wirksamkeit der vorgesehenen Prüfmaßnahmen, wobei 1 die höchste Endeckungswahrscheinlichkeit repräsentiert.*

***RPZ und Handlungsbedarf:** Je höher die RPZ, umso höher ist das Risiko und umso größerer Handlungsbedarf besteht. Die **Grenzwerte für Handlungsbedarf** sind unternehmensspezifisch unter **Hinzuziehung der Verantwortungsträger** (Management) festzulegen. In weitreichenden Fällen ist die Geschäftsführung einzubeziehen. Als Anhalt lässt sich sagen: Ab einer RPZ von 40 sind Maßnahmen ernsthaft zu prüfen, **ab einer RPZ von 80 sind Maßnahmen unumgänglich**.*

***Maßnahmen und Risikominimierung:** Zuerst werden Vorschläge gesammelt. Man unterscheidet zwei Hauptgruppen: **Entdeckungsmaßnahmen und Vermeidungsmaßnahmen**. Diese Maßnahmen werden entsprechend ihrer Erfolgswahrscheinlichkeit einer Risikobewertung bezüglich des verbesserten Zustands unterzogen. Dabei sind Aufwand/Kosten, Wirksamkeit und Umsetzbarkeit mit zu betrachten. Bei mehreren vorgeschlagenen Maßnahmen genießt die **mit der höchsten Erfolgswahrscheinlichkeit Priorität**.*
*Für Fehler an Teilen die zur Auslieferung kommen (RZ E) sind **100%-Prüfungen**, trotz des höheren Aufwands, **oft nicht effektiv**. Aus dem Gesichtspunkt des Aufwands ist es **vorteilhafter Fehler zu verhindern, als die Fehlerauffindung zu verbessern**. Steht die Bauteil- bzw. Funktionssicherheit im Vordergrund, ist die Entdeckungswahrscheinlichkeit von besonderer Bedeutung. Sie sollte gegen „100%“ tendieren, d.h. RZ(A) nahe „1“ drücken.*
*Die **Umsetzung und Verfolgung der Maßnahmen** erfordert eindeutige Verantwortlichkeiten und Termine. Damit ist üblicherweise das FMEA-Team überfordert. In diesem Fall sind das Management und Fachabteilungen wie die Terminverfolgung einzubeziehen.*

© Axel Rossmann - Tutorensoft
Nachhilfeunterlagen Universität

2.2 Analysen akuter Probleme - Technische Problemanalysen



2.2.1 Grundlagen

Systematische Problemanalysen werden seit Jahren in der Wirtschaft angewandt (Lit. 2-1 bis Lit. 2-3). Sie werden gewöhnlich im Management- bzw. Organisationsbereich genutzt. Dabei geht es vorrangig um Personal- und Produktstrategien, Fertigungsabläufe und Logistik. Je nach Fragestellung bzw. Art des Problems kommen besondere Analysenformen zum Einsatz (Bild 2.2.1-2). Im technischen Bereich sind **Problemanalysen** besonders wichtig. Sie bieten sich für die Klärung von Schäden an. Diese **technischen Problemanalysen** sind zentrales Thema des folgenden Kapitels (Bild 2.2.1-1).

Die Klärung von **Hardwareproblemen** an **Maschinenelementen** wird auch als **Schadensanalyse** (Schadenanalyse) bezeichnet. Sie zählt zu den technischen Problemanalysen. Vielfach wird der Begriff Schadensanalyse mit dem der Schadensuntersuchung verwechselt. Die Untersuchung ist jedoch nur ein erster Schritt im Rahmen einer **Faktensammlung**. Eine (systematische) Schadensanalyse dient der nachvollziehbaren und dokumentierten **Ursachenklärung als Voraussetzung für gezielte Maßnahmen** bzw. Abhilfen.

Technische **Problemanalysen bieten wichtige Vorteile** gegenüber einer (üblicherweise) unstrukturierten Vorgehensweise:
- Optimale Klärung technischer Probleme, insbesondere von Schäden.
- Nachvollziehbare Dokumentation der Bewertungsbasis und Schlussfolgerungen.
- Trennung von Fakten und Vermutungen.
- Unterstützen die erforderliche Teamarbeit.
- Ermöglichen gezielte Maßnahmen bzw. Abhilfen.
- Erzwingen objektiver und vollständiger Beiträge auch bei unterschiedlichen Interessenlagen.

Jedem Techniker und Ingenieur sollten deshalb die Grundlagen dieser Vorgehensweise geläufig sein. Es ist zu empfehlen, dieses Wissen möglichst **am Beginn der Ausbildung** zu vermitteln. Damit wird die **Akzeptanz** und die Einsicht in die Anwendbarkeit des **Lehrstoffs** und so die Motivation deutlich erhöht. Später in der **Praxis** ist die Lösung technischer Probleme von größter Bedeutung. Auf diese Weise erhöht sich die Effektivität des in der Ausbildung erworbenen Wissens auch deutlich erkennbar für den Arbeitgeber. Das verringert unberechtigte Kritik an einer scheinbar nicht ausreichend praxisorientierten ‘Ausbildung’.

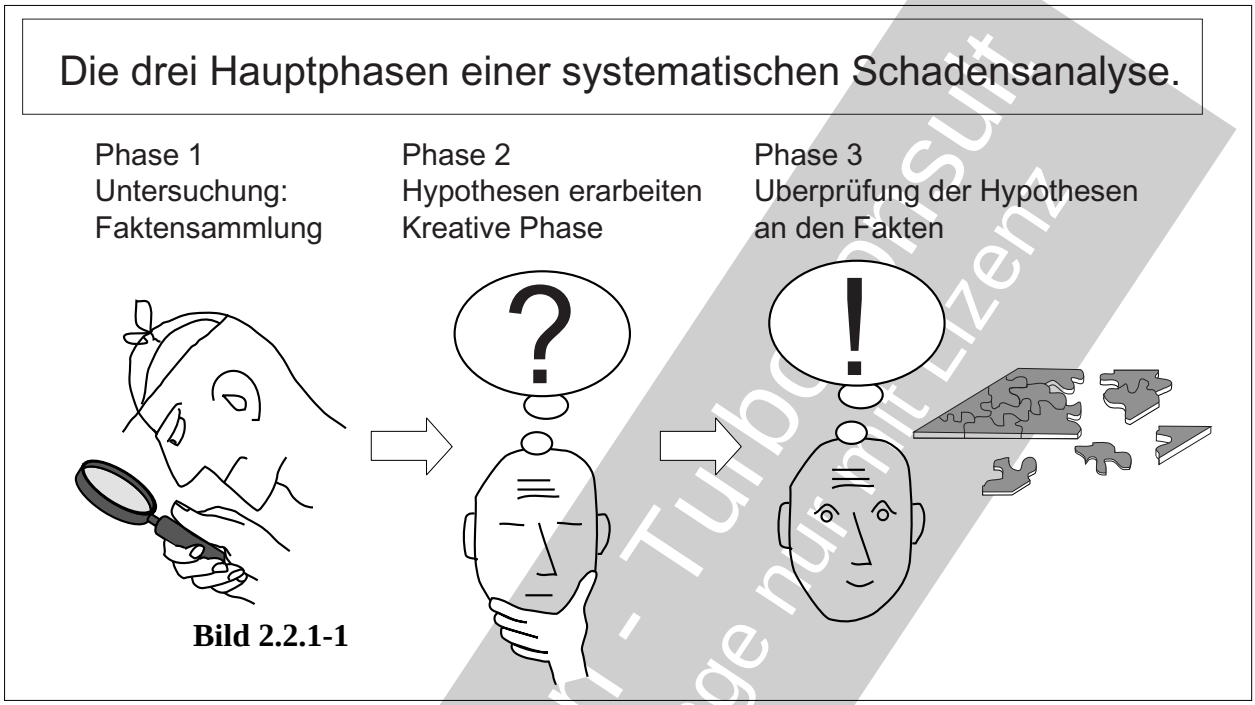


Bild 2.2.1-1

Bild 2.2.1-1 *(Lit. 2-1 bis Lit. 2-3): Eine Schadensanalyse in Form einer Problemanalyse (Bild 2.2.1-2) besteht aus drei Hauptschritten die sich ergänzen (Bild 2.2.1- 1 und Bild 2.2.1-3). Was bei einer* ***technischen Problemanalyse*** *neben der reinen Systematik zu berücksichtigen ist, wird im Folgenden behandelt.*

*- **Die Faktensammlung** wird auch als Problembeschreibung bezeichnet:*

Entscheidend für die Qualität des Untersuchungsergebnisses ist die ***Sicherheit der Fakten*** *sind zweifelsfrei ermittelte, möglichst überprüfbare Tatsachen. Sie sind möglichst intensiv durch kritische Fragen zu verifizieren. Es ist damit zu rechnen, dass auch unbewusst vermeintliche Fakten auf Annahmen und Hörensagen beruhen. Bei Unsicherheiten sind nochmalige Nachweise und möglichst vom Verantworlichen vorgenommene Überprüfungen notwendig*
Die Erfahrung lehrt, dass die Vielfalt der ***Sichtweisen und Interessen*** *nicht selten bewusst und/oder unbewusst* ***Vermutungen zu Fakten*** *machen.*
Zur Faktensammlung gehört die ***Schadensuntersuchung*** *an der „Hardware“. Diese umfasst traditionell makroskopische (z.B. Bruchflächenauswertung) und mikroskopische Untersuchungen wie Metallografie (Bild 2.2.2.4-1) und REM (Bruchstrukturen, Bild 2.2.2.4-3). Diese Arbeiten werden traditionell im Labor durchgeführt. Eine Faktensammlung beinhaltet darüber hinaus „Softfacts“ wie Betriebsbedingungen/-belastungen, Schadensstatistiken, Qualitätsprotokolle, Fertigungsabläufe und andere technische Unterlagen. Weiter zählen gesicherte Beobachtungen beteiligter Personen dazu.*

*- **Erarbeitung der Hypothesen:***

Hier handelt es sich in erster Linie um einen ***kreativen Vorgang****. Grundsätzlich werden erst einmal alle Hypothesen der an der Untersuchung maßgeblich Beteiligten ohne Bewertung dokumentiert. Wichtig ist, dass auch kontroverse oder* ***scheinbar abwegige Hypothesen nicht unterdrückt*** *werden.*
*Natürlich hat jeder Fachmann bereits sehr früh, vielleicht sogar vor Beginn der Untersuchung „****Arbeitshypothesen****“, die eine gewisse Voraussetzung für gezieltes und systematisches Handeln sind. Diese Hypothesen dürfen jedoch nicht das Handeln so beeinflussen, dass sie die*

el Rossmann - Turbomarkt
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Ergebnisse vorwegnehmen und verfälschen können. Wichtig ist, dass der Untersucher jederzeit bei begründeten Bedenken seine Hypothese kritisch überprüft und gegebenenfalls ohne 'Gesichtsverlust' zu Gunsten einer plausibleren fallenlässt.

- Prüfung der Hypothesen anhand der Fakten:

Nach Möglichkeit in einem rekonstruierbaren, schriftlichen Vorgang werden alle Hypothesen anhand der ***Fakten auf ihre Plausibilität*** *hin überprüft.*

Wichtig: *Spricht ein Fakt, auch wenn scheinbar nebensächlich, gegen eine Hypothese, dann ist diese als falsch zu werten und zu verwerfen! Zwischenzustände in der Bewertung gibt es nicht!*

Bild 2.2.1-2 *(Lit. 2-5 und Lit. 2-6): Im Gegensatz zur* ***präventiv wirkenden FMEA*** *(Bild 2-1) kommt die* ***Problemanalyse („PA") bei bereits aufgetretenen Problemen****, insbesondere* ***Fehlern*** *zur Anwendung. Alle Analysen gehen schrittweise vor. Sie ermöglichen eine nachvollziehbare Dokumentation. Selbst wenn später neue Erkenntnisse gewonnen werden oder „Fakten" korrigiert werden müssen, ist so eine dokumentierte Aktualisierung möglich. Üblicherweise ist die Problemanalyse, insbesondere eine Schadensanalyse in das* ***System mehrerer Analysen*** *(Bild 2.2.1-3) eingebunden. Zur Vorbereitung dient eine Situationsanalyse („SA"). Nachfolgende Analysen sind die* ***Entscheidungsanalyse („EA")****, welche zu optimalen nachvollziehbaren Maßnahmen führen soll und die* ***Analyse potenzieller Probleme („APP")****. Sie betrachtet potenzielle Risiken bei und nach der Abhilfemaßnahme.*

Eine ***Situationsanalyse („SA"****, Rahmen links oben) wird vorgeschaltet, wenn die Art der anzuwendenden Analysen (PA, EA, APP) zu klären ist.*

Die ***Problemanalyse („PA"****, Rahmen links unten) bildet gewöhnlich die* ***Voraussetzung für Abhilfen, Risikoabschätzungen und Entscheidungen*** *(Lit. 2-12). Ihr Ziel ist es, die* ***Ursachen für das Problem****, den Schaden, den Fehler, nachvollziehbar und möglichst sicher zu ermitteln.*

Die ***Entscheidungsanalyse („EA"****, Rahmen rechts oben) wird eingesetzt, wenn z.B. Maßnahmen auf Grund der Ergebnisse einer Problemanalyse zu erarbeiten und zu priorisieren sind. Diese Vorgehensweise gewährleistet, dass unverzichtbare Kriterien („Muss"-Kriterien) gegenüber lediglich wünschenswerten Kriterien („Soll"-Kriterien) identifiziert und berücksichtigt werden. In einer anschließenden Risikoanalyse werden Tragweite und Wahrscheinlichkeit der Alterna-*

Fortsetzung Seite 2-9

© Axel Rossmann TU Dresden
als Schulungsunterlage urheberrechtlich geschützt

Systematisches Analysieren von Problemen, Erarbeitung von Abhilfen und Risikominimierung ist eine Voraussetzung für eine erfolgreiche nachvollziehbare Beherrschung der Situation.

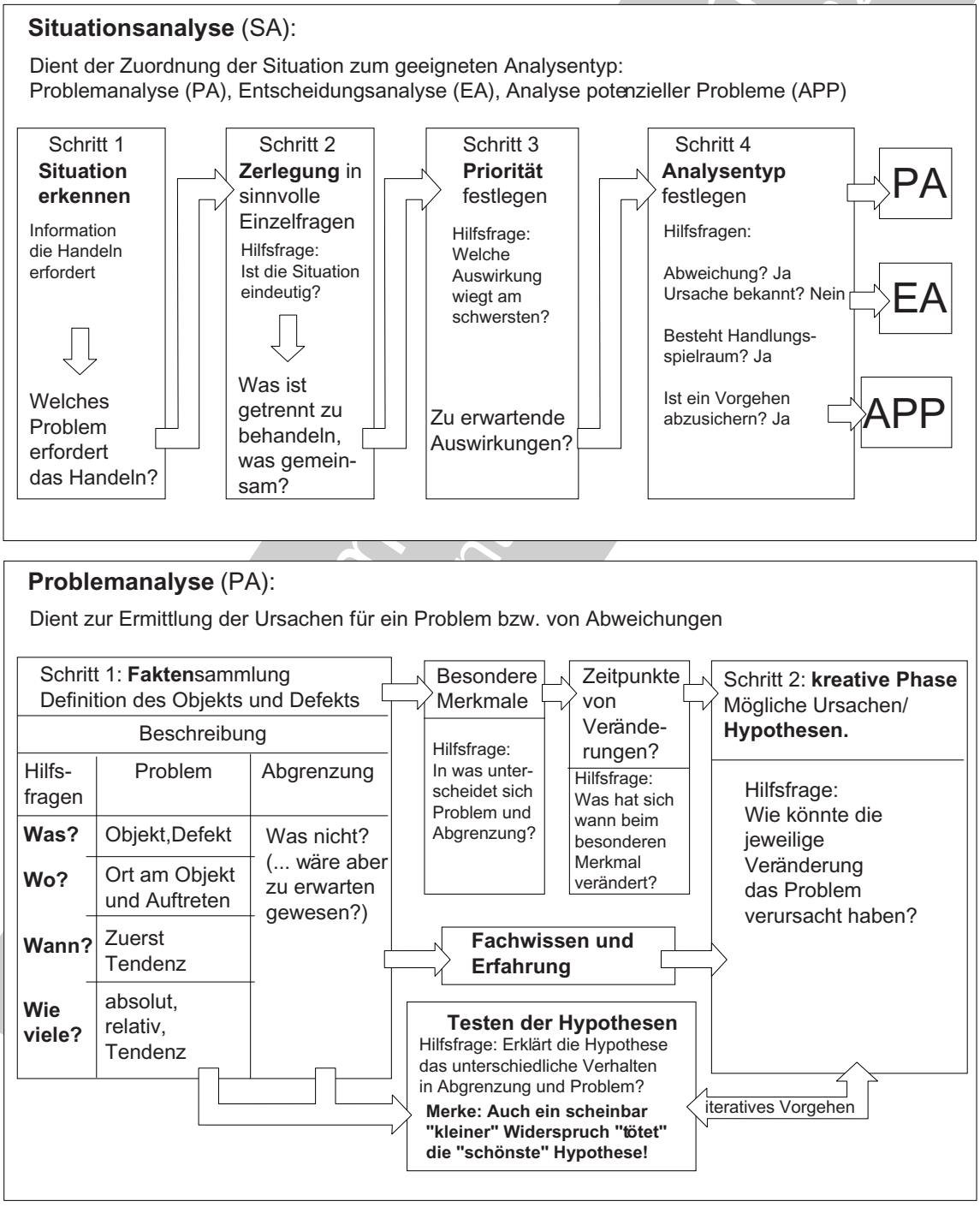


Bild 2.2.1-2

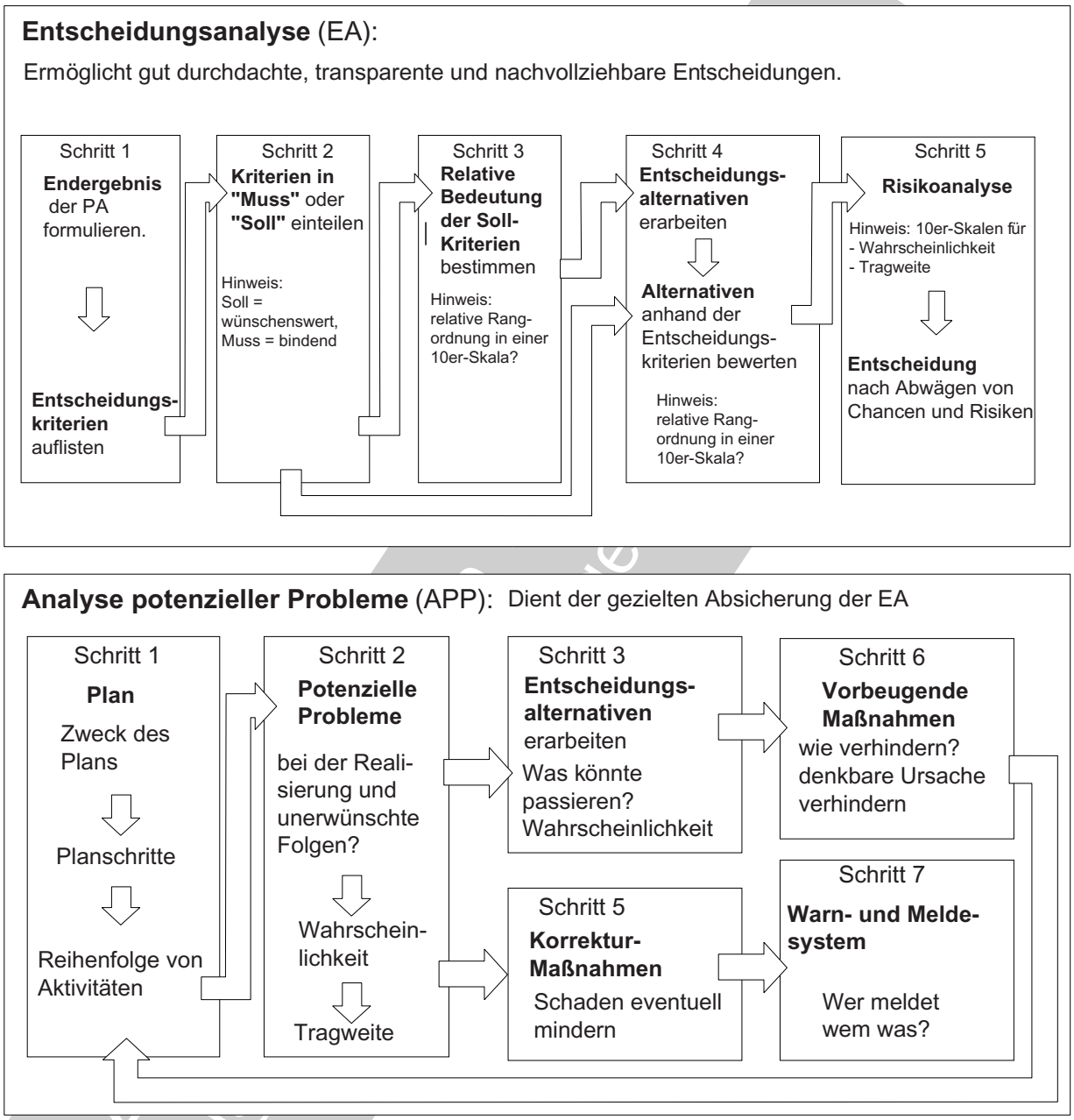


Bild 2.2.1-2

Fortsetzung von Seite 2-7

tiven bewertet und die endgültige Entscheidung festgelegt.

*Die **Analyse potenzieller Probleme** („**APP**“, Rahmen rechts unten) bezieht sich auf die Durchführung erarbeiteter Maßnahmen aus Risiken und Unicherheiten der Entscheidungsanalyse. Gegebenenfalls werden die möglichen Maßnahmen zur Minimierung von Risiken variiert. Weiter werden eventuelle Korrekturmaßnahmen während des Fertigungsprozesses erarbeitet. Sie reagieren so auf einen „Alarm“ aus dem zu installierenden Warn- und Meldesystem.*

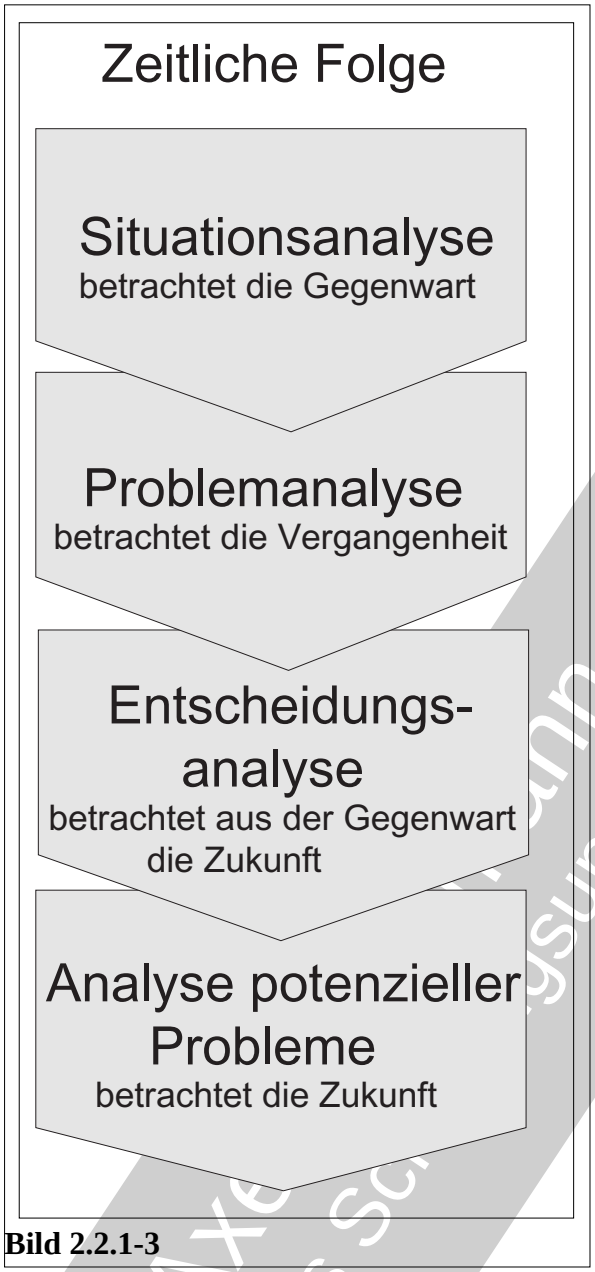


Bild 2.2.1-3

Bild 2.2.1-3 *(Lit. 2-5 und Lit. 2-6): Es soll auf die* ***analysenspezifische zeitliche Betrachtungsrichtung*** *aufmerksam gemacht werden. Entsprechend werden hier unterschiedliche Analysenbegriffe verwendet (Bild 2.2.1-2). Beispielsweise betrachtet man bei einer Problemanalyse in dieser Methodik Fakten aus der Vergangenheit, obwohl der Begriff Problem sehr viel weiter definiert ist (Seite 2-1). Die Analyse potenzieller Probleme widmet sich dagegen der Zukunft.*

Manche Analysen können unterbleiben, wenn bereits ausreichende Erkenntnisse vorliegen.

© Axel Schmann - Turboconsult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Es ist erfahrungsgemäß problematisch, wenn der Entwickler eines Verfahrens Betriebsschäden untersucht, beurteilt und für Abhilfen sorgen soll. Nicht ohne Grund gibt es in der Literatur Autoren und Kritiker.

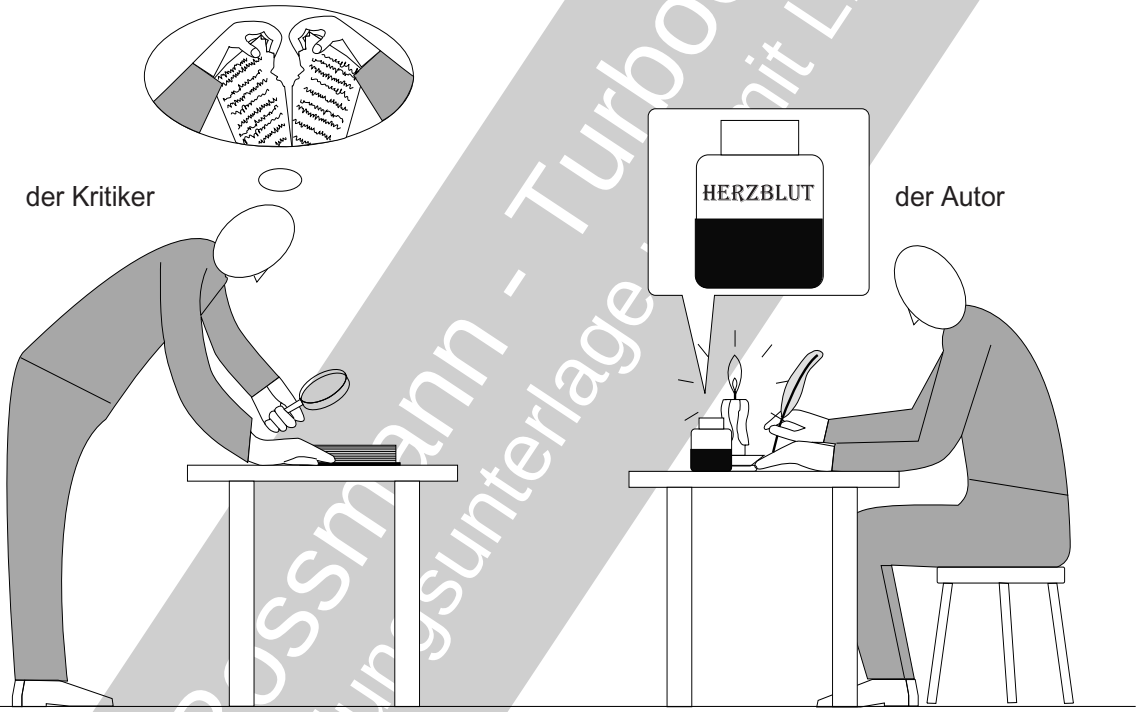


Bild 2.2.1-4

Bild 2.2.1-4: *Obwohl eine systematische Problemanalyse die Einbindung der Betroffenen erleichtert, ist die* ***Teambildung*** *nicht einfach. Hier kommen besondere, kontraproduktiv wirkende Gesichtspunkte einer möglichen Verantwortlichkeit ins Spiel. Andererseits ist für fähige, mental geeignete Fachleute verschiedenster, das Problem tangierender Organisationseinheiten zu sorgen (Lit. 2-4).*

Ein besonderes Problem besteht darin, dass sich erfahrungsgemäß gerade engagierte Spezialisten wie Verfahrensentwickler und Konstrukteure schwertun können. Das gilt, wenn objektiv und kritisch die Risiken und Probleme der eigenen Entwicklungen und Verfahren aus ihrem Zuständigkeitsbereich zu betrachten sind. Dies ist gegebenenfalls in der Auswahl der Teammitglieder zu berücksichtigen, und/ oder in geeigneten ***Schulungen mit Trainern*** *zu korrigieren. Empfehlenswert ist in wichtigen (für eine Firma existenzbedrohenden) Fällen immer ein* ***neutraler Moderator****, der für den richtigen Ablauf der Analyse sorgt.*

Nicht ohne Grund haben sich seit Langem in der Literatur Kritiker bewährt, die selbst nicht Autoren sind. Vom Autor ist wohl kaum eine objektive Bewertung seines Werks zu erwarten.

© Axel Rossmann - Turbo
Schulungsunterlage

Literatur 2

2-1 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, ISBN 3-540-25125-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005.

2-2 A.Rossmann „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, Band 4“, ISBN 3-00-017734-5. Eigenverlag: Axel Rossmann Turboconsult, 2005, Seite 17.1-13 bis 17.1-19.

2-3 H.Hansen, G.F.Kamiske, „Praxishandbuch Techniken des Qualitätsmanagements - Werkzeuge-Systeme-Prozessorientierung“, ISBN 3-933814-53-7, 1. Auflage August 2001, Symposion Publishing GmbH, Düsseldorf, Seiten 190-193, 263-290, 314.

2-4 M.Süß, „Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie“, Skriptum der Vorlesung an der TU München, Fakultät Maschinenwesen, Lehrstuhl für Flugantriebe, SS 2003.(3256)

2-5 Knopp, Richter, „Grundlagen SEP / 8D“, Weiterbildung, Daimler-Benz Aerospace.

2-6 „SEP - Systematische Entscheidungsfindung und Problemlösung“, GMM Gesellschaft für Management-Methodik mbH, 1996, Seite 1-102.

2-7 „KEPNER TREGOE Methode“ (KT-Analyse), de.wikipedia.org/wiki/Kepner-Tregoe, 2009, Seite 1 und 2.

2-8 Knopp, Richter, „Grundlagen SEP / 8D“, Weiterbildung, Daimler-Benz Aerospace.

2-9 „SEP - Systematische Entscheidungsfindung und Problemlösung“, GMM Gesellschaft für Management-Methodik mbH, 1996, Seite 1-102.

2-10 „KEPNER TREGOE Methode“ (KT-Analyse), de.wikipedia.org/wiki/Kepner-Tregoe, 2009, Seite 1 und 2.

2-11 H.Hansen, G.F.Kamiske, „Praxishandbuch Techniken des Qualitätsmanagements - Werkzeuge-Systeme-Prozessorientierung“, ISBN 3-933814-53-7, 1. Auflage August 2001, Symposion Publishing GmbH, Düsseldorf, Seiten 190-193, 263-290, 314.

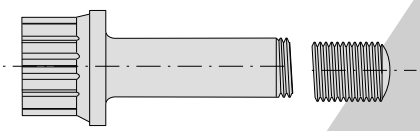
2-12 A.Rossmann „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, Band 1“, ISBN 3-00-005842-7. Eigenverlag: Axel Rossmann Turboconsult, 2000, Kapitel 2 und Kapitel 4.1.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schutzumschlagnummit Lizenz

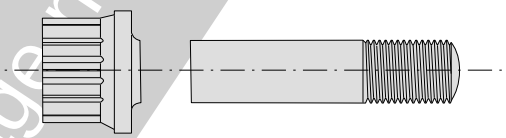
2.2.2 Vorgehen bei „Technischen Problemanalysen“

Der Vergleich von Problembeschreibung und Abgrenzung ergibt besondere **Merkmale und Unterschiede** die sich **Veränderungen** zuordnen lassen.

Problem



Abgrenzung: Warum nicht so?



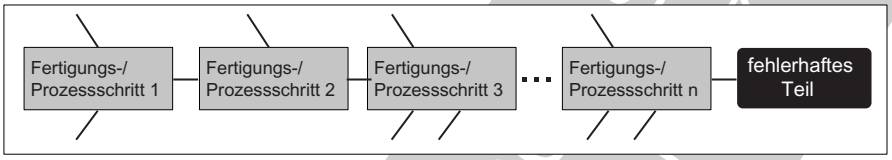
Für die **praktische Anwendung** haben sich bestimmte **Vorgehensweisen und Systematiken** bewährt. Diese wird man je nach Bedeutung des Falls bis zu einem angemessenen Grad nutzen. In den meisten Fällen bei Problemen an Großserienprodukten des täglichen Lebens übersteigen Zeit- und Kostenaufwand der Reparatur einen vertretbaren Rahmen. Es kommt zum Austausch. Andererseits wird bei Industrieanwendungen vorab eine Aufwandschätzung für die erfolgreiche, d.h. gezielte und nachhaltige Abhilfe im ‘ersten Anlauf’ erwartet. In solchen Fällen kann es genügen, sich der Prinzipien und Schwächen einer systematischen Problemanalyse bewusst zu sein, um diese gedanklich zu vollziehen. Das beginnt mit der Zuverlässigkeit der Fakten und endet mit einer kritischen Wertung der Hypothesen.

Erst bei umfangreichen Problemen, die z.B. **Rückrufaktionen** auslösen können oder sicherheitsrelevant sind, ist eine systematische, dokumentierte Problemanalyse dringend anzuraten. In vielen Fällen wie bei Kraftfahrzeugen oder Kraftwerken kommt ein **Überwachungs- und Diagnosesystem** zum Einsatz (Bild 3.3-2.1.1 und Bild 3.3-4), hinter dem Prinzipien einer Problemanalyse stehen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Das Ursache-Wirkungs-Diagramm ist selbst keine Problemanalyse, kann jedoch äußerst hilfreich sein.

Schema eines Prozessschritt-Diagramms



Schema eines Ursache-Wirkungs-Diagramms

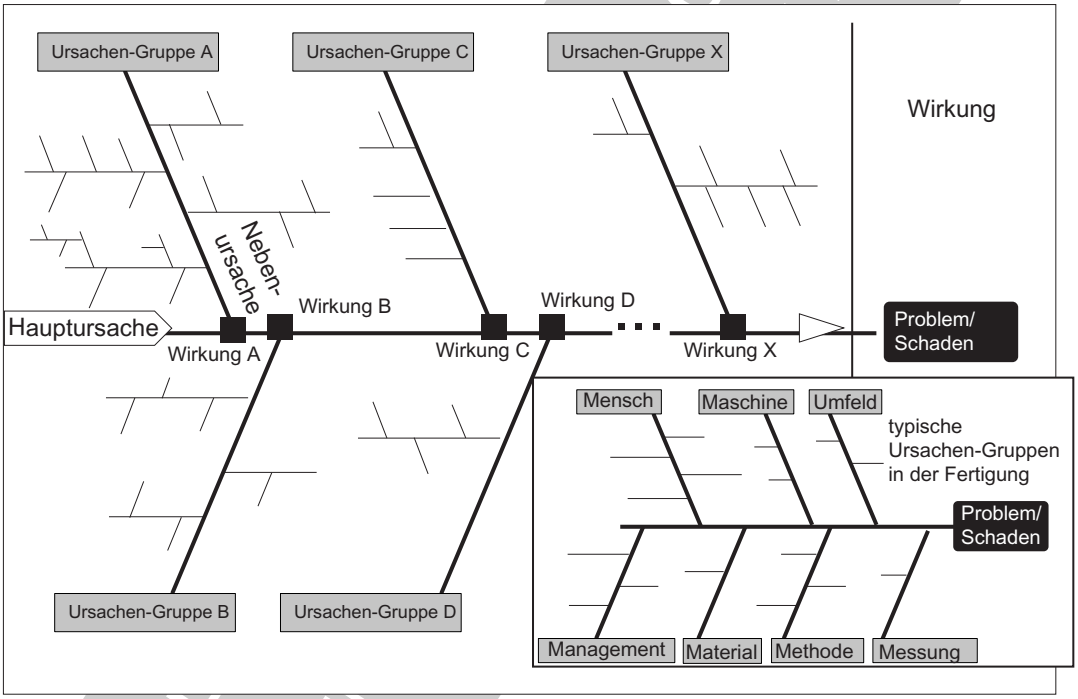


Bild 2.2.2-1

Bild 2.2.2-1 *(Lit. 2.2.2-4 und Lit 2.2.2-5): Es empfiehlt sich im Vorfeld der eigentlichen Problemanalyse ein sog.* ***Ursache-Wirkungs-Diagramm*** *(UW-Diagramm, Fischgräten-diagramm, Ishikawadiagramm) zu erstellen. Im Fall einer technischen Problem-/Schadensanalyse spricht man von einem* ***negativen*** *UW-Diagramm. Es dient der Ursachenfindung und Abhilfen.*

Ein solches Diagramm kann bei folgenden Aufgaben äußerst hilfreich sein:

- ***Definition des zu analysierenden Problems*** *(Bild 2.2.2-3),*
- ***Hypothesenerstellung*** *(Bild 2.2.2-3), insbesondere einer*
- ***Arbeitshypothese*** *mit notwendigen Untersuchungen.*

Mit dem UW-Diagramm lassen sich ***Erfahrungen, Vermutungen und Meinungen*** *strukturiert visualisieren. Das ist besonders für ein Team in einer kreativen Vorgehensweise sehr hilfreich. Eine solche ist* ***Brainstorming****. Es handelt sich also nicht notwendigerweise um Tatsachen/Fakten. Das ist für* ***Teamarbeit*** *wichtig.*

Bei einem komplexen Sachverhalt, insbesondere im Fertigungsbereich, bietet sich zunächst

ein rudimentäres UW-Diagramm, ein sog. ***Prozessschritt-Diagramm*** *an (Diagrammschema oben). Es ermöglicht ein gezielteres Vorgehen und enthält die Einzelprozesse entsprechend dem Ablauf. Diesen werden für den Endzustand als besonders wichtig eingeschätzte Schäden/Fehler (max. 3) zugeordnet.*
Das vollständige UW-Diagramm (schematisches Beispiel im Diagramm unten) wird von ***Ursachen-Gruppen*** *ähnlich Fischgräten strukturiert. Sie lassen sich bei* ***Fertigungsproblemen*** *in erster Linie den folgenden Bereichen zuordnen (Detail unten rechts):*
- Mensch,
- Maschine,
- Material,
- Methode,
- Management,
- Messung,
- Mitwelt, Milieu.

Schritte einer Problemanalyse

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte in der üblichen zeitlichen Reihenfolge behandelt. Das Vorgehen wird beschrieben.

© Axel Rossmann - Turbokonsult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schritt 1.1 - Situationsanalyse

Mit einer **Situationsanalyse** wird gegebenenfalls der Handlungsbedarf ermittelt. Im Frühstadium eines technischen Problems sind die komplexen Zusammenhänge häufig nicht ersichtlich. Dies ist jedoch erforderlich, wenn Prioritäten mit der dazu notwendigen Strategie erarbeitet werden müssen. Oft sind Zusatzinformationen für Fragen wie Auswirkung, Termine und dem zu erwartenden Trend erforderlich.

Bild 2.2.2-2 *(Lit. 2.2.2-2)****:*** *Für die praktische Anwendung bietet sich ein* ***Arbeitsblatt*** *wie im Bild an.*
Um die ***Situation zu erkennen*** *(Spalte „****1****“), hilft eine Beantwortung der* ***Frage nach Aufgaben, Schwierigkeiten und Gelegenheiten*** *die ein Handeln notwendig machen. Die Antworten werden mit Hilfe einer Überprüfung nach Eindeutigkeit und getrennter oder gemeinsamer Behandlung in* ***Beschreibungen zerlegt****.*
Sie bestimmt die ***Reihenfolge der Abarbeitung*** *in Spalte „****2****“ mit* ***Prioritäten/Terminen****.*
*Dazu werden in Spalte „****2.1****“ die Beschreibungen grob* ***entsprechend ihrer Auswirkung*** *mit hoch (H), mittel (M) und niedrig (N)* ***bewertet****.*
*Spalte „****2.2****“ zeigt entsprechende Zeitspannen mit* ***Terminanfang und -ende*** *(„****3.1****“). Es folgt eine Abschätzung des zu erwartenden Trends (Spalte „****2.3****“). Spalten 2.1 bis 2.3 ermöglichen eine Festlegung der Prioritäten bzw. die* ***Reihenfolge der Bearbeitung****.*
*In Spalte „****3****“ werden die geeigneten Analysen (Situationsanalyse (SA), Problemanalyse/ Ursachenermittlung (PA), Entscheidungsanalyse (EA) und Analyse Potenzieller Probleme (APP) zugeordnet (Bild 2.2.1-2).*

In welcher Situation befinde ich mich, welche Form einer Analyse hat Priorität?

Bild 2.2.2-2

© Axel Rossmann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schritt 1.2 - Problemdefinition

Beschäftigt man sich mit einem konkreten technischen Problem, stösst man häufig auf eine unerwartete Hürde - die **für die Analyse geeignete Definition**. Dies ist die Folge der Annahme, bereits auf den ersten Blick die Grundursache bzw. das zu analysierende Problem erkannt zu haben. Man wird dies bereits bei der **Problembeschreibung und der Faktensammlung** („1.3“ in Bild 2.2.2-4), bemerken. Dabei wird zunächst die Analyse weiterer Probleme notwendig. Als hilfreich hat sich ein schritt/-stufenweises Vorgehen erwiesen (Beispiel 2.2.2.1-1 und Beispiel 2.2.2.1-2).

1. Um was geht es eigentlich? Diese Frage nach der **Definition des Problems** ist nur scheinbar eine Selbstverständlichkeit.

1.1 **Problem** in die Folge von Ursachen und deren Wirkungen **zerlegen**

	Ursache/ Einzel-probleme	(Aus-) Wirkungen	Abfolge
U1		W1	
U2		W2	
U3		W3	
⋮		⋮	
Un?		Wn	

1.2 **Stufenweises Vorgehen** an einem 4-stufigen Beispiel

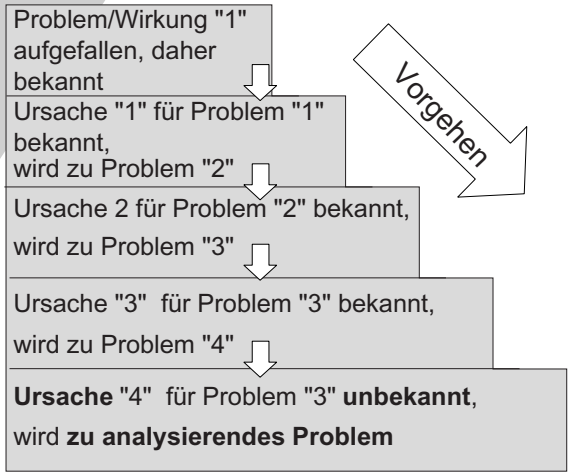


Bild 2.2.2-3

Bild 2.2.2-3 *(Lit. 2.2.2-1): Zunächst wird das Problem in die logische Folge bekannter Ursachen („**U**“, ursächliche Probleme) und Wirkungen („**W**“) zerlegt („**1.1**“). Dafür ist ein **UW-Diagramm** (Fischgrätendiagramm, Bild 2.2.2-1) äußerst hilfreich. Man beginnt bei einem erkannten (Einzel-) Problem bzw. dessen Ursache (U1). Diese zeigt sich in der Wirkung 1 („W1“). Zu dieser lässt sich eine Ursache 2 („U2“) zuordnen usw. bis eine weitere Abhängigkeit nicht mehr zu erkennen ist.*
*Diese Ursache-Wirkung (Problem)-Folge wird nun in einer sog. „**Warum-Treppe**“ visualisiert („**1.2**“). Dabei steigt man die Treppe hinunter zum zu analysierenden Problem. **Dies entspricht der ersten unbekannten Ursache,** auf die man bei der beschriebenen Vorgehensweise stößt.*

© Axel Rossmann - Proconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Schritt 1.3 - Problembeschreibung

Die **Problembeschreibung/Faktensammlung** („**1.3**“) enthält als gesichert geltende Erkenntnisse. Solche Fakten können aus einer Vielzahl durchaus unterschiedlicher Quellen stammen (Bild 2.2.1-1). Damit diese Sammlung möglichst umfassend ist, hat sich eine systematische, Fragen zuordenbare Vorgehensweise bewährt.

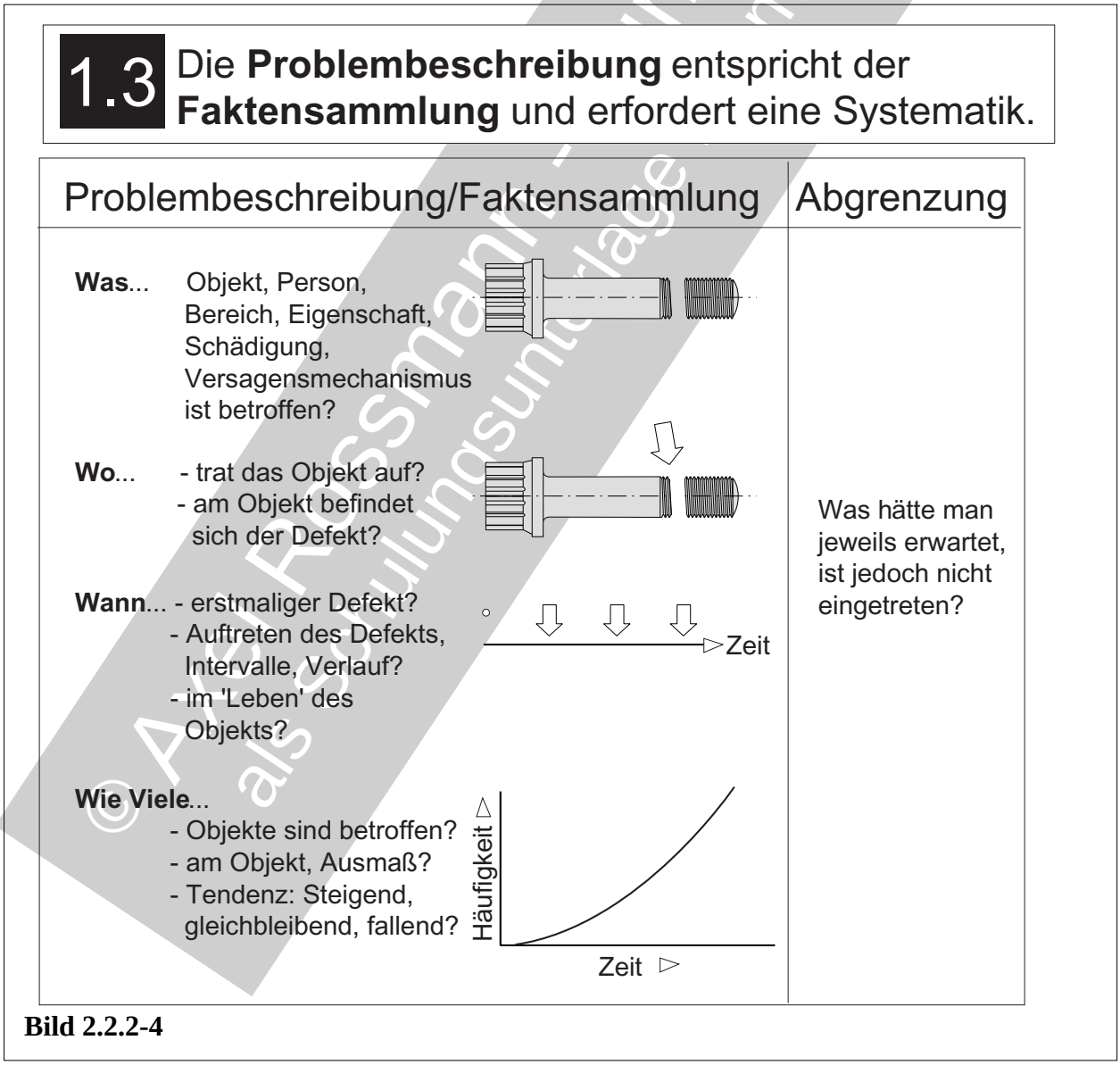


Bild 2.2.2-4

Bild 2.2.2-4 *(Lit. 2.2.2-1): Beispiel für ein Arbeitsblatt zur Problembeschreibung.*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Schritt 1.4 - Abgrezungen zu anderen Möglichkeiten

Die Problembeschreibung lässt sich mit einer besonderen Fragestellung eingrenzen und damit präzisieren (Bild 2.2.2-4). Man findet diese **Abgrenzung** in unterschiedlicher Form. Sie bezieht sich auf eine bestimmte Problembeschreibung die nicht auftrat.

- was hätte aber sein können?
- was wäre eigentlich zu erwarten?

Die Antworten können als Fakten gewertet werden und dienen somit einer Überprüfung der Hypothesen.

1.4. Der Vergleich von Problembeschreibung und Abgrenzung ergibt besondere **Merkmale und Unterschiede** die sich **Veränderungen** zuordnen lassen.

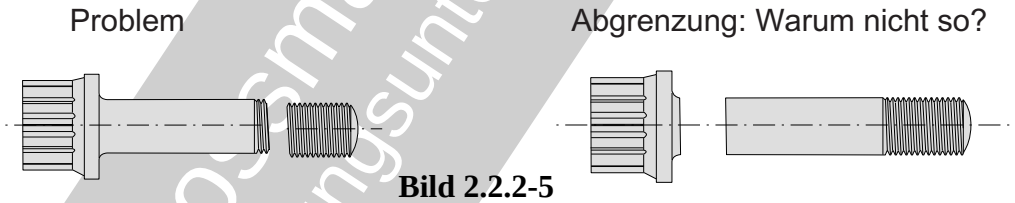


Bild 2.2.2-5

Bild 2.2.2-5 *(Lit 2.1-1): Eine Besonderheit der Vorgehensweise bildet die sog.* ***Abgrenzung****. Sie begrenzt die Gültigkeit des Fakts und ergibt sich aus der Fragestellung nach dem* ***Erwarteten aber nicht Eingetroffenen****. Mit dem Vergleich von Problembeschreibung/Fakten und Abgrenzung lassen* ***sich besondere Merkmale*** *erkennen. Diese führen zu sog. „****Veränderungen****“ („****1.4****“).*

Das Beispiel zeigt eine im Gewinde gebrochene Schraube. Es gibt mehrere Abgrenzungen die dem Fachmann auffallen. Eine zeigt die linke Skizze in Form eines Schaftbruchs am Kopfradius. Weitere Abgrenzungen wären z.B.: Warum der Bruch nicht an einer anderen Stelle des Gewindes auftrat oder ‘Überraschungen’ der Fakten in Betriebszeit und Betriebsbelastung.

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schritt 2 - Kreative Hypothesenerstellung

Bei diesem Schritt ist unbedingt darauf zu achten, dass dies auch für die scheinbar ‘sinnlosen’ Hypothesen gilt. Die Bewertung erfolgt dann in Schritt 3 (Bild 2.2.2-7) und wird gegebenenfalls eine Irrelevanz erkennen lassen.

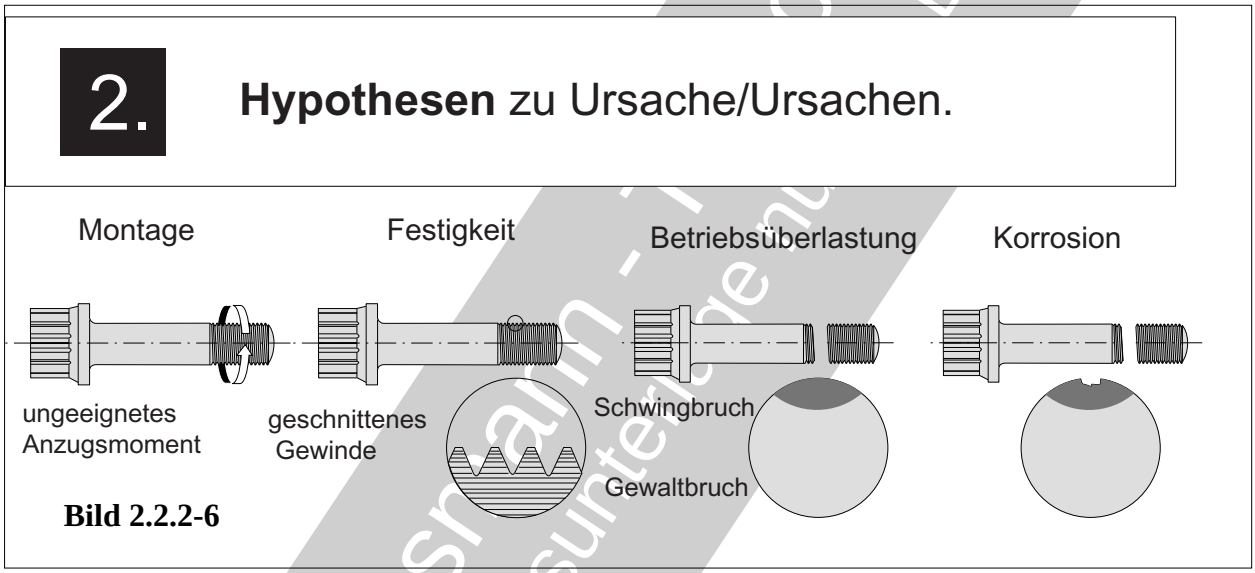


Bild 2.2.2-6

Bild 2.2.2-6 *(Lit. 2.2.2-1)**:** Erste Hypothesen entstehen bereits zu Beginn der Analyse und sind für eine koordinierte Faktensammlung als **Arbeitshypothesen** durchaus empfehlenswert (Bild 2.2.2-3). Dabei können diese für die einzelnen Mitglieder des untersuchenden Teams durchaus unterschiedliche sein. Man sollte sich jedoch bewusst sein, dass es sich **nur um vorläufige Vorstellungen** handelt, die bei Abweichungen von der Realität/Fakten geändert bzw. adaptiert werden müssen. Nach der Faktensammlung wird man in einem kreativen Prozess (z.B. Brainstorming) Hypothesen erarbeiten und dokumentieren.*

© Axel Rossmann - Technoconsult als Schulungsunterlage nur Lizenz

Schritt 3

Als Beispiel für unterschiedliche Hypothesen zum gleichen Schadensbild wurde wieder ein Schraubenbruch gewählt. Hier sind die Hypothesen zum Schraubenbruch (Bild 2.2.2-4) folgende Schadensursachen (kein Anspruch auf Vollständigkeit)

- Montagefehler,
- Abweichungen der Schraubenfestigkeit,
- Betriebsüberlastung;
- Korrosion.und der
- Herstellungsprozess.

Dabei sind auch alle möglichen Kombinationen dieser Schadensursachen in weiteren Hypothesen denkbar.

3. **Überprüfung der Hypothesen**
anhand der Fakten/Veränderungnen, Unterschieden, Erfahrungen und Fachwissen.

Eine scheinbar geringe **Diskrepanz** schließt die Hypothese aus.

Bild 2.2.2-7

Bild 2.2.2-7 *(Lit. 2.1-1): Die* ***Überprüfung der Hypothesen*** *anhand der Fakten kann ein* ***iterativer Vorgang*** *sein. Wichtig ist, dass selbst scheinbar kleine Unstimmigkeiten das 'Todesurteil' für die Hypothese bedeuten. In einem solchen Fall kann man versuchen zur Phase 2, der Hypothesenerarbeitung zurückzukehren und einen widerspruchsfreien Ablauf zu finden. Dabei können auch bereits vorhandene, vielleicht ebenfalls unbefriedigende Hypothesen geeignet (sinnvoll, realistisch) kombiniert werden.*

Eine Hypothese mit einem befriedigenden Wahrscheinlichkeitsgrad sollte keine erkennbaren Diskrepanzen zu den Fakten aufweisen.

In Zweifelsfällen kann versucht werden, anhand von Nachuntersuchungen oder betriebsnahen Versuchen Klarheit/Beweise zu schaffen. Sollte sich zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. durch das Auftreten neuer Fälle zeigen, dass die Hypothese zumindest Schwachstellen hat oder gar falsch ist (was bei komplexen Zusammenhängen sogar nicht selten ist), hat man mit der Dokumentation der Fakten die Möglichkeit, diese auf Fehler bzw. neue Erkennnisse zu überprüfen und kann so die Analyse schnell und nachvollziehbar korrigieren.

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Schritt 4 - Entscheidungsanalyse

Zu einer solchen Analyse (siehe Bild 2.2.1-2) wird geraten bei mangelnder

- **Entscheidungssicherheit und -bereitschaft**. Z.B. bei sehr unterschiedlichen Interessenlagen oder der Gefahr von Alibimaßnahmen.

- **Transparenz** oder **nachvollziehbarer Dokumentation**.

oder der Gefahr von

- **hochrisikobehafteten Fehlentscheidungen**. Dazu gehören sowohl Sicherheitsaspekte wie Kosten und Zeitaufwand.

- **Misstrauen** und fehlender Einsicht in das Notwendige. Das führt auch zum **Mangel an Motivation und Engagement**

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Arbeitsblatt einer Entscheidungsanalyse.

Definition: Objekt, Vorgang, Zweck/Ziel

1 Zielsetzungen		2 Alternative "1"		Alternative "2"		▪▪▪ Alternative "n"	
1.1 Mussziele unabdingbar, messbar, abgrenzend, z.B. - Sicherheit - Risikominimierung - Termine		2.1 Beschreibung	Erfüllung ja/nein	Beschreibung	Erfüllung ja/nein	Beschreibung	Erfüllung ja/nein
1.2 Wunschziele Ci Resultate, Mittel, z.B. - kostengünstig - angemessen - nicht mehrfach - widerspruchsfrei - eindeutig - ohne Alternativen - keine Investitionen - geringer Imageverlust	Gewichtung B 10 - 1	2.2 Beschreibung	'Wert' C1 / 10 - 0 / BxCi	Beschreibung	'Wert' C2 / 10 - 0 / BxCi	Beschreibung	'Wert' C3 / 10 - 0 / BxCi
		Gesamterfüllung		Gesamterfüllung		Gesamterfüllung	

3 Risiko								
3.1 Abschätzung - Nähe zum Mussziel? - Wünschenswertes erreicht? - Info.-Verlässlichkeit? - Erfahrungen - Auswirkungen im Umfeld - Einfluss auf Mitarbeiter		W	T		W	T		W T
3.1 Minimierung - Maßnahmen? - Aufwand? - Was wird beeinflusst?								

4 Endgültige Entscheidung:

5 Verantwortlichkeiten:

W = Wahrscheinlichkeit
T = Tragweite
(H = hoch, M = mittel, N = niedrig)

Bild 2.2.2-8

Bild 2.2.2-8 *(Lit. 2.2.2-1): Dargestellt ist ein Beispiel eines Arbeitsblatts für eine Entscheidungsanalyse.*
Vorgehen:

*Zunächst werden Zielsetzungen („**1**“) als **Mussziele** („**1.1**“) und **Wunschziele** („**1.2**“) definiert. Mussziele sind unabdingbar und messbar, deshalb in ihrer Erfüllung nur mit ja oder nein zu bewerten.*
*Wunschziele orientieren sich gewöhnlich an gewünschten Resultaten und zur Verfügung stehenden Mitteln. Die Ziele werden mit „**B**“ entsprechend ihrer Bedeutung gewichtet. Damit werden die einzelnen Alternativen mit den notwendigen Informationen beschrieben („**2.2**“). Danach wird die **Wahrscheinlichkeit** der jeweiligen Alternative „i“ („**Ci**“) abgeschätzt und eine Kennzahl für das **Risiko** in Form des Produkts B x Ci ermittelt.*
*Unter „**3**“ erfolgt eine **Risikoabschätzung**/Bewertung („**3.1**“) und eine Minimierung („**3.2**“).Bei der Abschätzung wird wiederum Wahrscheinlichkeit („**W**“) und Tragweite („**T**“) betrachtet. Am Schluss fällt die **endgültige Entscheidung** mit klaren Vorgaben wie **Zuständigkeiten**/Verantwortlichkeiten.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schritt 5 - Analyse Potenzieller Probleme

Die Analyse betrifft sowohl **Schwachstellen** bei der Durchführung eines Aktionsplans (Maßnahmen/Abhilfen) als auch **unerwünschte Folgen**. Dazu müssen Schwachstellen des Aktionsplans erkannt werden. Dies beinhaltet

- Abweichungen,
- Ausführung,
  - Einhaltung von Terminen und Zeitabläufen,
  - Nachjustierung/Optimierung des Plans, wenn sich solche Gelegenheiten erkennen lassen.

Beispiel eines Arbeitsblatts für eine Analyse Potenzieller Probleme.

Absicherung von Maßnahmen/Abhilfen des technischen Problems/Schadens:						4 Aktionen zur Problem- /Schadensverhütung		
1 Kritische Realisierungs-schritte	2 Potenzielle Probleme	W2	T2	3 Denkbare Ursachen	B3	Vorbeugend 4.1	4.2 Zusätzliche Aktionen	Aufwand 4.3
warum? wann? wo? was?								

W = Wahrscheinlichkeit (H = hoch, M = mittel, N = niedrig),
T = Tragweite (H = hoch, M = mittel, N = niedrig)

5 Maßnahmen/Abhilfen im Fall möglicher erkennbarer zusätzlicher Probleme (Eventualfälle)					
5.1 Mögliche Auswirkungen und Nebenwirkungen der Potenziellen Probleme	T5	Eventualmaßnahmen 5.2	Meldesystem 5.3	Zusätzliche Aktionen 5.4	Aufwand 5.5

Bild 2.2.2-9

Bild 2.2.2-9 *(Lit. 2.2.2-1): Dargestellt ist ein Beispiel für das Arbeitsblatt einer* ***Analyse Potenzieller Probleme*** *(APP, Bild 2.2.1-2).*
Es wird wie folgt vorgegangen:
Zunächst kommt es darauf an, ***kritische Planschritte*** *zu identifizieren („**I**“). Dabei sollen die Fragen helfen. Diesen werden* ***auslösende potenzielle Probleme*** *zugeordnet („**2**“).*

*Es folgt dieBewertung nach Wahrscheinlichkeit („**W2**“) und Tragweite („**T2**“). Spalte „**3**“ enthält die denkbaren Ursachen für die auslösenden Probleme. Darauf folgt deren Wichtung (Bedeutung „**B3**“). In „**4**“ geht es um die* ***Aktionen/Maßnahmen*** *zur* ***Schadensverhütung****. Sie sind in „**4.1**“ enthalten. Dazu sind gegebenenfalls weitere maßnahmenspezifische Aktionen erforderlich („**4.2**“). Den hierfür ab-*

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

*geschätzten erforderlichen Aufwand zeigt „**4.3**“.*
*„**5**“ beschreibt Aktivitäten im **Eventualfall**, d.h. bei weiteren vorhersehbaren ‘Eventual-problemen’. Deren Auswirkungen enthält „**5.1**“. „**T5**“ sind die zugehörigen Tragweiten. „**5.2**“ ordnet den Eventualproblemen spezifische Eventualmaßnahmen zu. Dafür können **Meldesysteme** („**5.3**“) notwendig werden, die wiederum zusätzliche Aktionen auslösen („**5.4**“). Deren Aufwand sollte abgeschätzt werden („**5.5**“).*
Zum besseren Verständnis können die APPs in Beispiel 2.1.2.1-1 (Bild 2.2.2.1-6) und Beispiel 2.2.2.1-2 (Bild 2.2.2.1-12) dienen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur 2.2.2

2.2.2-1 Knopp, Richter, „Grundlagen SEP / 8D“, Weiterbildung, Daimler-Benz Aerospace.

2.2.2-2 „SEP - Systematische Entscheidungsfindung und Problemlösung“, GMM Gesellschaft für Management-Methodik mbH, 1996, Seite 1-102.

2.2.2-3 „KEPNER TREGOE Methode“ (KT-analyse), de.wikipedia.org/wiki/Kepner-Tregoe, 2009, Seite 1 und 2.

2.2.2-4 H.Hansen, G.F.Kamiske, „Praxishandbuch Techniken des Qualitätsmanagements-Werkzeuge-Systeme-Prozessorientierung“, ISBN 3-933814-53-7, 1. Auflage August 2001, Symposion Publishing GmbH, Düsseldorf, Seite 202-206.

2.2.2-5 H.Hansen, G.F.Kamiske, „Qualitätsmanagement und Human Resources“, ISBN 3-933814-69-3, 1. Auflage November 2001, Symposion Publishing GmbH, Düsseldorf, Seiten 141 und 213.

2.2.2-6 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden“, 2. Auflage ISBN 3-446-13416-6. 1982, Carl Hanser Verlag München Wien, Seite 118. und 119.

2.2.2-7 VDI-Richtlinie VDI 3822 Blatt 1, „Schadensanalyse - Grundlagen, Begriffe, Definitionen - Ablauf einer Schadensanalyse“, März 2004. (4858)

2.2.2-8 VDI-Richtlinie VDI 3822 Blatt 2, „Schadensanalyse - Schäden durch mechanische Beanspruchungen“, April 2008.(4859)

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.2.2.1 Praktische Beispiele

Die Beispiele beruhen auf echten Vorkommnissen, wurden jedoch geeignet angepasst und anonymisiert. Es wurden typische, durchaus komplexe Fälle ausgewählt. Meistens lässt sich in der Praxis der erhebliche Aufwand fallspezifisch deutlich eingrenzen. Oft wirken neben der Hauptursache mehrere beitragende Ursachen. Auch wenn nicht unbedingt erforderlich, wurden jeweils die in Bild 2.2.1-2 dargestellten Analysen exemplarisch durchgeführt. Es handelt sich um

- Situationsanalyse.
- **Problemanalyse**/Schadensanalyse,
- Entscheidungsanalyse und
- Analyse Potenzieller Probleme.

Bei der Problemanalyse wurde auf Nachvollziehbarkeit besonderer Wert gelegt.

Beispiel 2.2.2.1-1:

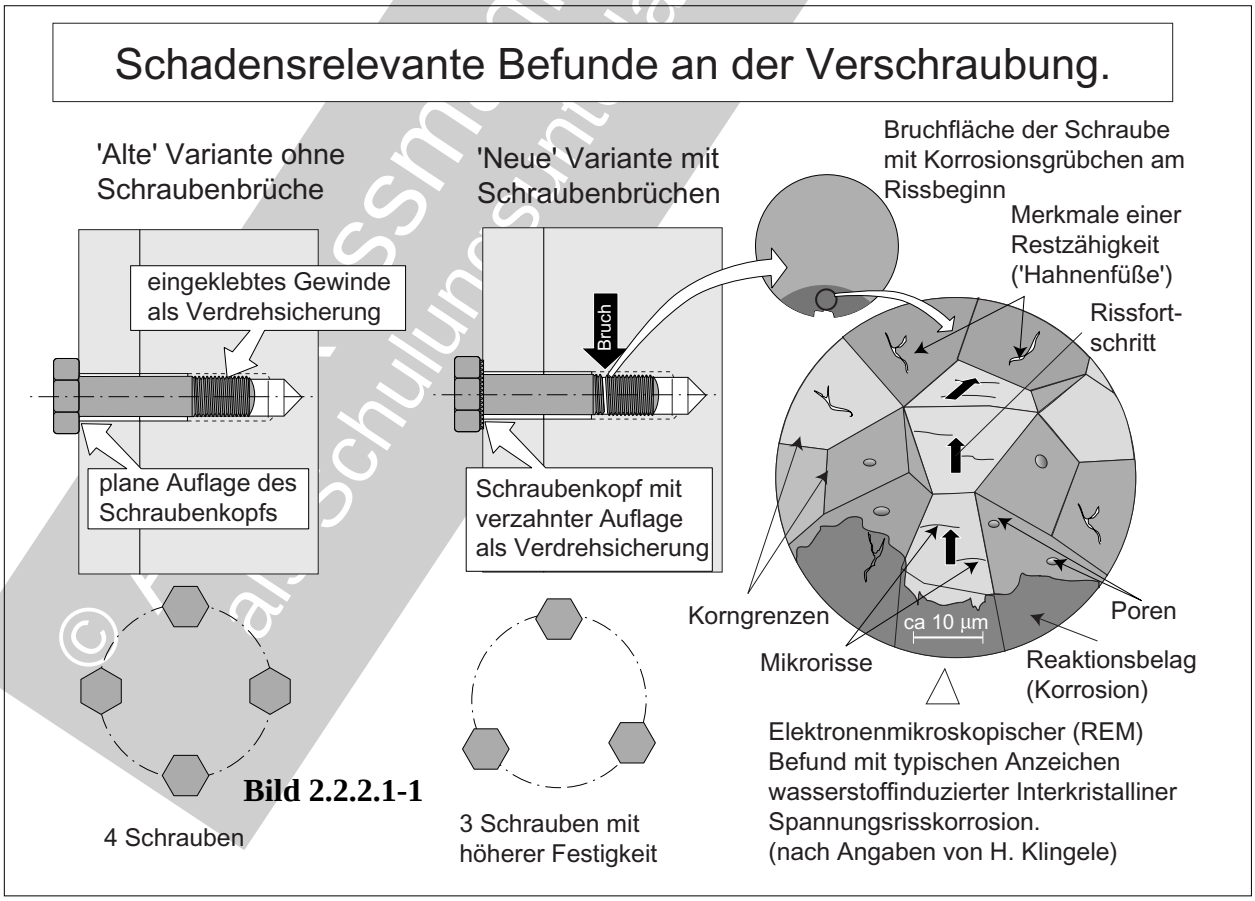


Bild 2.2.2.1-1

An einem Fahrzeug brachen an einer hoch sicherheitsrelevanten Komponente Schrauben. Es handelte sich um eine von drei funktionskritischen Schrauben. Diese Vorfälle begannen ab einem gewissen Zeitpunkt nach sehr unterschiedlichen Betriebszeiten. Die ursächlichen Einflüsse waren zu ermitteln und Abhilfen zu erarbeiten.

© Krassmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Hilfreich ist vorab und entsprechend weiterer Erkenntnisse die Erarbeitung des **Ursache-Wirkungs-Diagramms** (Bild 2.2.1-1) das später auch bei der kreativen Erarbeitung der Hypothesen hilft.

Die **Recherchen zur Faktensammlung** ergaben (Bild 2.2.2.1-1):

Schrauben

- Schrauben in **Sacklöchern** des Gehäuses.
- In der Neuteilfertigung wird das Gehäuse einer **Badbehandlung** unterzogen. Dabei sind die Schraubenbohrungen nicht verschlossen. Die verwendete Ätzflüssigkeit wird **mit Druckwasser ausgewaschen**. Danach wird das Gehäuse **getrocknet**. Laborversuche zeigten, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass Wasser alleine die schadenstypische Spannungsrisskorrosion auslöst. Dagegen konnte das in der Fertigung verwendete Ätzmittel auch in wässriger Verdünnung **Spannungsrisskorrosion** an den hochfesten Stählen des neuen Schraubentyps auslösen.
- Brüche erfolgten nach unterschiedlichen Betriebszeiten.
- Nur Schrauben einer neuen Konstruktionsvariante (Skizze rechts in Bild 2.2.2.1-1) waren betroffen.

Besonderheiten:

- Statt 4 Schrauben nur noch 3 Schrauben.
- Werkstoff mit höherer Festigkeit/Härte.
- Die Verdrehsicherung durch Einkleben des Gewindes wurde von einer **Verzahnung der Kopfauflage** ersetzt.

Eine **Begehung der Fertigung und Montage** ergab:

- Die **Waschvorrichtung** für die Sacklöcher ist unbemerkt **beschädigt** worden, sodass eine Reinigung der Schraubenbohrungen nicht mehr gewährleistet war.
- In den Bohrungen der in der Montage aufgestapelten Gehäuse waren größere Mengen **eingetrocknetes Ätzmittel** zu erkennen.

Laboruntersuchung:

Makroskopisch

- Der **Bruch erfolgte im Gewinde in den ersten Gängen** zum Schaft.
- Es handelt sich um einen **spröden Betriebsanriss** und **zähen Restbruch**.
- **Härte der Schrauben über HRC 32**. Alte Schraubenvariante geringere Härte.

Metallografie:

- Keine Gefügebesonderheiten, Verlauf des Betriebsrisses ‘interkristallin‘, typisch für **Risskorrosion**.

Mikroskopische (REM) Bruchflächenauswertung:

- im Betriebsrissbereich typische Merkmale für **Spannungsrisskorrosion** (Detail rechts in Bild 2.2.2.1-1, Lit. 2.2.2-6).

Diese **Fakten** sind im **Arbeitsblatt** in Bild 2.2.2.1-4 in den beiden linken Spalten zusammengestellt.

© Axel Rossmann - Turbo Consult
Ausbildungsunterlagen nur mit Lizenz

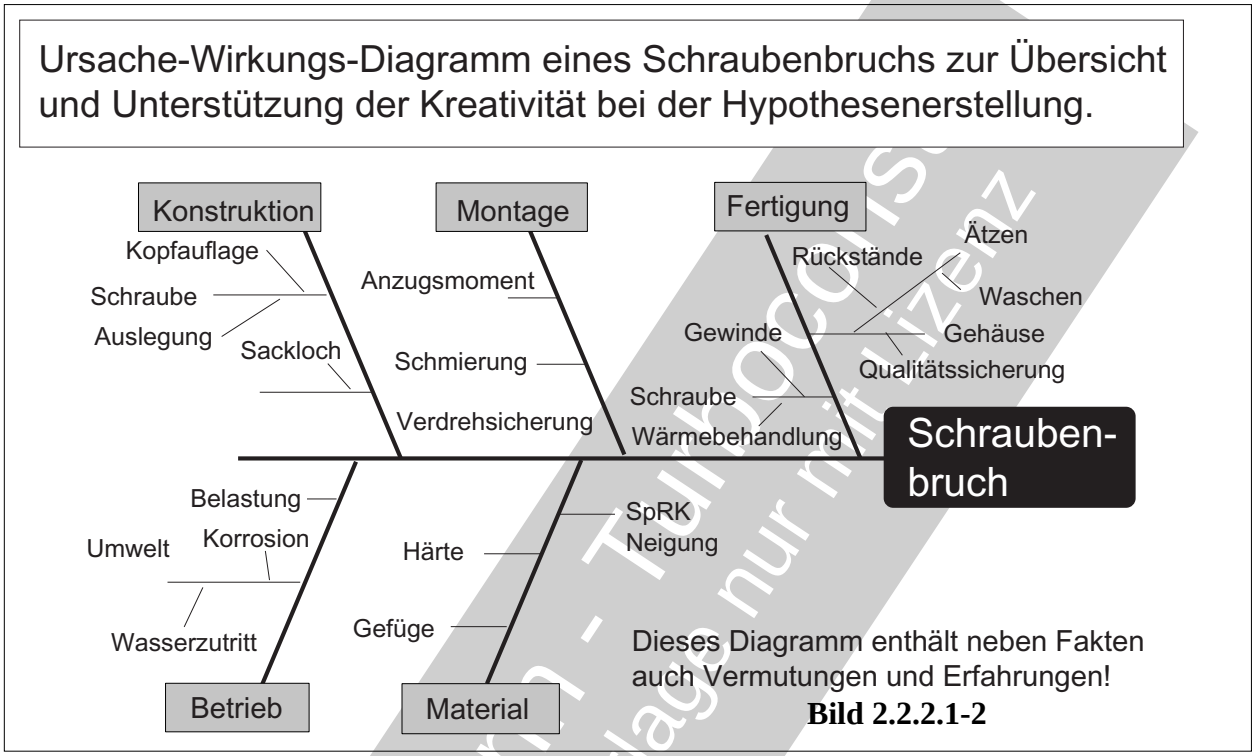


***Bild 2.2.2.1-2**: Dieses Ursache-Wirkungs-Diagramm (Bild 2.2.2-1) gehört zum **Beispiel 2.2.2.1-1**. Gewöhnlich wird es vor der eigentlichen **Problemanalyse** erstellt. Es lässt sich später bei neuen Beobachtungen und Zusammenhängen iterativ aktualisieren. Enthalten sind alle **denkbaren Einflüsse und Zusammenhänge**, also nicht nur abgesicherte. Fallspezifisch werden vier **Ursachengruppen betrachtet**. Sie ergeben sich aus **Erfahrung** und **Eindrücken**.*

Man erkennt die Komplexität potenziell ursächlicher Einflüsse. Damit wird die Vollständigkeit der Faktensammlung (Bild 2.2.2.1-4) unterstützt.

© Axel Bossmann - Turbocon
ausschließlich nur mit Lizenz

Manchmal ist es nicht einfalch das zu analysierende Problem zu erkennen.
Hier kann eine Systematik, die 'Warum-Treppe' helfen.

Problem 1: **Betriebsverhalten** unzulässig

⇩

Ursache "1" **Leck** wird zu Problem "2"

⇩

Ursache 2 für Problem "2" **Schraubenbruch** wird zu Problem "3"

⇩

Ursache "3" für Problem "3" unbekannt.
damit ist das
zu analysierende Problem der Schraubenbruch

Bild 2.2.2.1-3

Arbeitsblatt

Definition des Problems: Schraubenbrüche im Betrieb (Beispiel 2.2.2.1-1).

	Fakten (Beschreibung)		
	Am Schadensteil (ist)	Abgrenzung (ist nicht)	Besonderheiten aus Vergleich 'ist' mit 'ist nicht'.
was?	**Objekt:** - Neue Schraubenvariante - Härte/Festigkeit erhöht (>32 HRC) - Verdrehsicherung mit Verzahnung an Kopfauflage **Schaden:** Betriebsbruch Spannungsrisskorrosion (SpRK)	frühere Variante: - kein Bruch - Härte niedriger - 4 Schrauben - Verdrehsicherung durch Einkleben des Gewindes - Beilage unter dem Kopf - Kein Schaden an 'Problem-version' als Neuteil	- Neue Schraubenvariante - Schraubensicherung durch Verzahnung an Kopfauflage - Höhere Festigkeit/Härte >32HRC - Höhere Schraubenbelastung (weniger Schrauben). - Anriss: SpRK - Werkstofffehler
wo?	**Objekt:** Gewinde am Übergang zum Schaft **Schaden:** im Betrieb - durch äußere Inspektion oder Betriebsverhalten bemerkbar.	- Andere Stellen z.B. im Kopfradius - Im Aufbewahrungslager - an Neuteilen	- Anriss im Gewinde - Betriebseinfluss - Schaden bei erstem Schraubenbruch bemerkbar
wann?	**Erstmalig?** Nach Einführung neuer Version **Sonst noch?** - bei Laborversuchen nur mit wässrigem Ätzmittel nicht. - Rissbildung wie Schaden bei Ätzmittel und Wasser. **Im Bauteilleben?** nach unterschiedlichen Betriebs-zeiten	- Vorher - Schrauben der alten Version im Versuch deutlich un-empfindlicher - nicht nach ähnlich langer Betriebszeit	- Neue Schraubenversion - Alte Variante mit gleichem Ätzmittel ohne Schäden - Verhalten im Laborversuch bei alter Version günstiger - Allein bei Wassereinwirkung keine schadenstypische Rissbildung.
wie Viele?	**Objekt:** weniger als 10 Fälle. Bezogen auf die Gesamtzahl wenige **Schaden:** Nur 1 Bruch pro Gehäuse **Tendenz:** Steigend	- Bezogen auf die Gesamt-zahl viele. - Mehrere gebrochene Schrauben pro Gehäuse - Tendenz nicht gleichblei-bend oder abnehmend	- Individuelle Unterschiede im Betriebseinfluss der Anwendung - Steigt mit der Zahl der Teile im Betriebseinsatz.

Bild 2.2.2.1-4

© Karl Rossmann, Kurt Illig
Nur als Schulungsunterlage nutzbar

***Bild 2.2.2.1-3**: Im vorliegenden Fall ist das **zu analysierende Problem** der Schraubenbruch, leicht zu erkennen. Die Frage ist: „Warum tritt der Fehler/Schaden auf?*
*Die Systematik der '**Warum-Treppe**' (Bild 2.2.2-3) soll hier lediglich beispielhaft angewandt werden.*

Erstellt von (Teammitglieder, Verantwortlicher):
.....
Datum: .....

Hypothesen (mögliche Ursachen)

Zusammenstellung	Prüfung (an den Fakten bzw. Besonderheiten)
"A" Schrauben im Gewinde zu hoch belastet durch Montageeinfluss	"A" Erklärt SpRK allein nicht
"B" Schrauben im Gewinde zu hoch belastet durch Betriebseinfluss	"B" Erklärt SpRK allein nicht
"C" Eindringen von Wasser im Betrieb	"C" Erklärt SpRK allein nicht
"A" "B" und "C" kombiniert	"C" Erklärt SpRK allein nicht
"D" SprK durch Ätzmittelrückstände.	"E" Erklärt SpRK allein nicht
"E" SpRK durch Betriebseinfluss.	"E" Erklärt SpRK allein nicht
"F" Werkstoffeinfluss	"D" , "E" und "F" ist möglich
"D" , "E" und "F" kombiniert	"G" und H erklärten SpRK allein nicht.
"G" Kopfauflage der neuen Schraubenversion. Undichtigkeit ermöglicht Wassereintritt im Betrieb.	siehe hierzu die Bildbeschreibung.
"H" Keine Verdrehsicherung durch Einkleben des Gewindes	
"G" und "H" kombiniert	
Weitere Kombinationen möglich!	

Widerspruchsfeie Hypothese

als wahrscheinlichste: Kombination von
notwendigen (ursächlichen) und beitragenden Einflüssen "C", "D", "E", "F", "G" und "H"

Bild 2.2.2.1-4

***Bild 2.2.2.1-4**: Mit Hilfe der Fakten lassen sich **ursachenrelevante Besonderheiten** erkennen (dritte Spalte).*
*Unter Zuhilfenahme des **Ursachen-Wirkungs-Diagramms** in Bild 2.2.2.1-2 ergeben sich die Hypothesen.*
*Diese werden in der letzten Spalte anhand der Fakten/Besonderheiten **überprüft,** was die **wahrscheinlichste** (widerspruchsloseste) ergibt.*
„A und „B": Erklärt nicht den schadenstypischen SpRK-Einfluss.
„C", „D" und „E": Warum kein Problem bei „alter"-Version?
„F": Es fehlt die Erklärung für Betriebseinfluss.
„G": Dagegen spricht, dass bei Versuchen keine schadenstypische SpRK allein durch Wasser auftrat.
„H": Schraubenlockerung lässt Schwingbruch erwarten. Würde Schwingungsrisskorrosion (SRK) erwarten lassen, nicht aber SpRK.

Kombiniert man die schadensursächlichen/-beitragenden Einflüsse, bietet sich das Bild eines komplexen Zusammenwirkens von

„C", „D", „E", „F", „G" und „H".

*Dabei ist noch **keine Aussage über Hauptursachen, Nebenursachen und begünstigende/beitragende Ursachen** gemacht. Dies ist besonders schwierig und wenn überhaupt erst nach ausreichender Erfahrung sowie eventuell absichernden Untersuchungen zu erwarten.*

***Wahrscheinlichste Problementstehung bzw. Schadensursache mit dem Ablauf**:*
*Mit der konstruktiven Umstellung von **4 auf nur noch 3** höher belastete (**Zugspannungen**!) Schrauben aus einem festeren Stahl mit einer **Härte > 32 HRC** (Festigkeit >1030 MPa, Härte > 304 HRB, > Vickers 530) waren die Voraussetzung für ein hohes SpRK-Risiko bei einem wässrigen Elektrolyten mit **Ätzmittelrückständen** gegeben. Diese Rückstände konn-*

© Axel Rossmann - Typoconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Eine Entscheidungsanalyse sichert Maßnahmen ab.

Definition: Abhilfe gegen Schraubenbrüche

Ziele		Alternative "1"			Alternative "2"		
Beschreibung der Alternative		3 dickere Schrauben mit Härte < 32 HRC			4 Schrauben statt 3 mit Härte < 32 HRC		
Mussziele Sicherheit kurzfristig nachrüstbar		Verfügbarkeit	Erfüllung **Ja**			Erfüllung **Ja**	
Wunschziele	Bedeutung B 1 - 10	Informationen	'Wert' C1 0-10	BxC1	Informationen	'Wert' C2 0-10	BxC2
- Kostengünstig	7	Schrauben käuflich	10	70	Schrauben käuflich	2	35
- keine Investitionen	6	Teile nacharbeitbar		30	vorhandene Teile verschrotten!		18
- Vor Ort tauschbar	10	Vorrichtungen für größere Gewindebohrungen erforderlich	5	100	Vorrichtungen für neues Bohrbild erforderlich	3	100
- Einfacher Tausch	5			50			50
- vorhandene Teile wieder einsetzbar, keine Änderung des Gehäuserohteils	10	Nachgearbeitete Bauteile vor Ort tauschbar	10	100	Neue Bauteile vor Ort tauschbar	10	0
					Änderung des Gehäuses	0	
		Gesamterfüllung		350	Gesamterfüllung		203

W = Wahrscheinlichkeit
T = Tragweite

Risikobewertung (siehe APP in Bild 3.1.2.1-6)											
Alternative "1"	W	T	Alternative "2"	W	T	Alternative "3"	W	T	Alternative "4"	W	T
Risiken:	0-10	0-10	Risiken:	0-10	0-10	Risiken:	0-10	0-10	Risiken:	0-10	0-10
W1 T1			W2 T2			W3 T3			W4 T4		

Bild 2.2.2.1-5

© Axel Rossmann - TurboConsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

*ten in den Sacklöchern verbleiben, weil die **Spülvorrichtung** in der Produktion unbemerkt beschädigt war. Die **Schraubensicherung über eine Verzahnung der Kopfauflage** war offenbar nicht vollkommen wasserdicht. Damit konnte **im Betrieb Wasser in die Sacklöcher** zu den eingeschraubten Gewinden gelangen. Der so entstandene Elektrolyt löste die Schraubenbrüche in Form einer **Wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion** aus.*

Daraus ergeben sich mehrere mögliche Abhilfen die alle auf der Elimination einer der 3 Voraussetzungen für SpRK beruhen:

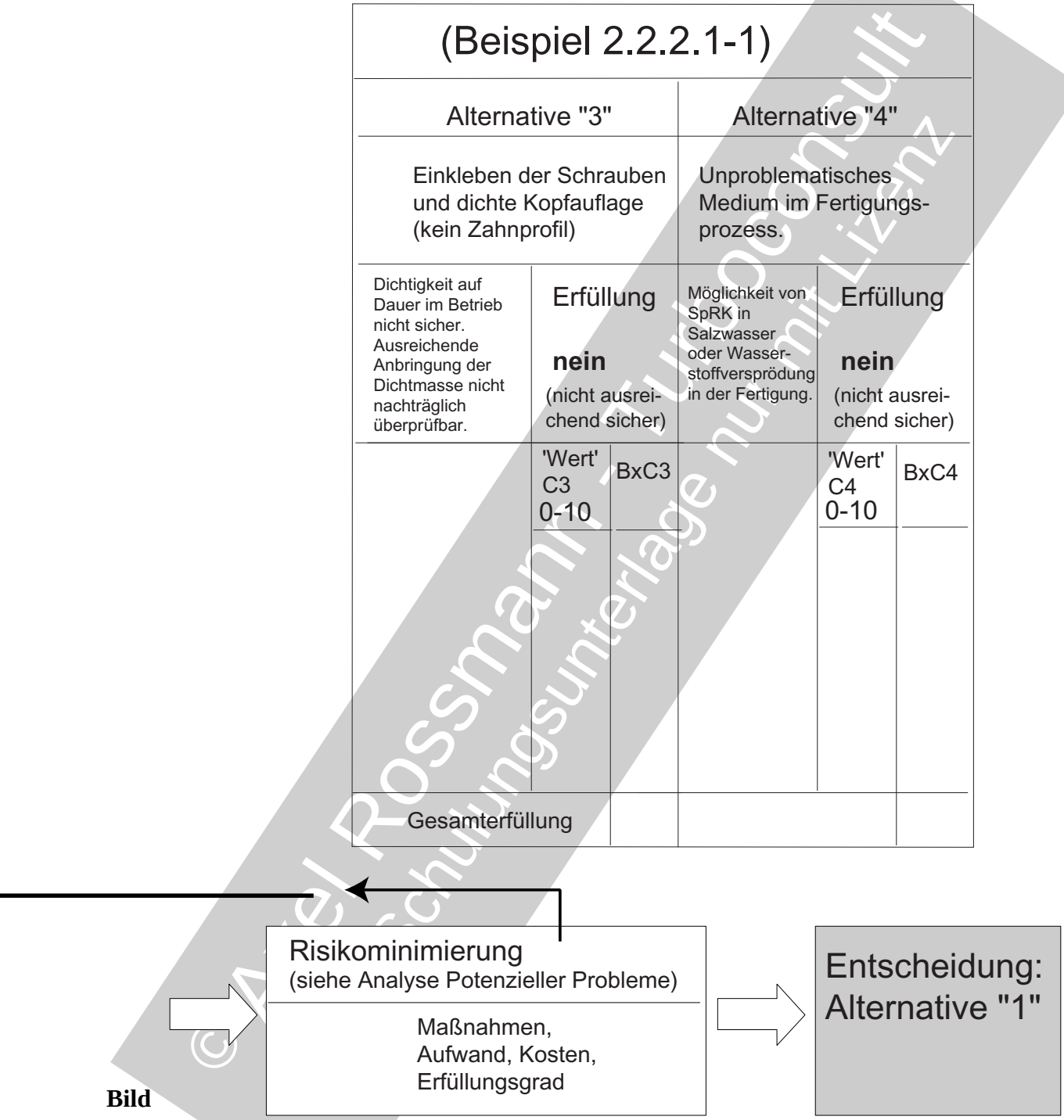


Bild 2.2.2.1-5

*- Gefährliche Zugspannungen (**Abhilfe „1“**).*
*- Empfindlicher Werkstoff (**Abhilfe „1“** und **„2“**) für*
*- ‘geeigneten’ Elektrolyt (**Abhilfe „3“ und Abhilfe „4“**).*

***Bild 2.2.2.1-5**: Um die **Bereitschaft zu einer Entscheidung** und deren Sicherheit zu erhöhen, empfiehlt sich eine **Enscheidungsanalyse**. Sie dient gleichzeitig einer verbesserten **Transparenz**, fördert die **Teamarbeit** und **minimiert Risiken**. Eine **Risikobewertung** kann im Rahmen dieser Analyse erfolgen.*

© Axel Rossmann - Euroconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Beispiel eines Arbeitsblatts für eine Analyse

Absicherung von Maßnahmen/Abhilfen des technischen Problems/Schadens:

	Kritische Realisierungs-schritte (Planschritte)	Potenzielle Probleme	W	T	Denkbare Ursachen	W
warum? wann? wo? was?	Sichere Reinigung der Gewindebohrungen	Rückstände des Ätzmittels	H	H	- Vorrichtung - Kontrollverfahren	H
	Umkonstruktion	Termine	H	H	Personalressourcen	H
	Nachrüstung verbauter Teile	- Verfügbarkeit - Schadensrisiko beim Betreiber	H	H	- Zulieferer - Produktionskapazität - Schadensfall im Zeitraum bis zur Umrüstung	H

Ergebnis der Maßnahmen/Abhilfen im Idealfall:

Mögliche Auswirkungen und Nebenwirkungen der potenziellen Probleme	T	Eventualmaßnahmen
- Personalengpässe in anderen Bereichen	H	Umschichten nach Priorität
- Risiko verbauter Teile bis zur Umrüstung	H	Zwischenkontrollen mit Rückmeldung

W = Wahrscheinlichkeit (H = hoch, M = mittel, N = niedrig),
T = Tragweite (H = hoch, M = mittel, N = niedrig)

Bild 2.2.2.1-6

*Eine Zuordnung von **Bedeutung** („**B**“) , auch als Gewichtung bezeichnet. Sie erfolgt steigend von 1-10. Die Einschätzung der **Werte** („**C**“, steigend von 0-10) der vier Alternativen dieses Beispiels erfordert fallspezifische Detailkenntnis. Die „Werte“ werden aus den „**Informationen**“ jeweils für die verschiedenen Wunschziele geschätzt. Sie werden mit B multipliziert, so erhält man die **Erfüllungen**. Deren Summe gibt die **Gesamterfüllung** der jeweiligen Alternative. Je höher diese ist, umso größer ist ihre Attraktivität.*
*Das Vorgehen ist in den Tabellen unten dargestellt. Auf eine Ausarbeitung wurde jedoch hier verzichtet. Die **Analyse Potenzieller Probleme** (APP) in Bild 2.2.1.2-6 soll dazu dienen. Sie bewertet die Alternativen indirekt anhand ihrer **kritischen Realisierungsschritte.***

© Axel Rossmann Turbocons
Diese Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Potenzieller Probleme. (Beispiel 2.2.2.1-1)

Aktionen zur Problem- /Schadensverhütung		
Vorbeugend	Zusätzliche Aktionen	Aufwand
- Zuverlässige Reinigung realisieren und nachweisen	- Organisation der Prüf- und Kontrollvorgänge	- Vorrichtungen - Prüfverfahren - Schulung
Personalplanung		
Erarbeitung von Kontrollen beim Betreiber bis zur Nachrüstung	- Ermittlung aller betroffenen Betreiber. - Sofortige Benachrichtigung der Betreiber mit Anweisungen	Reisekosten der eigenen Mitarbeiter Aufwand der Betreiber
Planung der Nachrüstung	Erarbeitung aller erforderlicher Daten (siehe unten)	Auswertung und Zeitplan erstellen

Meldesystem	Zusätzliche Aktionen	Aufwand
Betroffene Organisationseinheiten an Personalabteilung	Überprüfung aller anderen entsprechenden Konstruktionen	Konstruktion
Betreiber an Hersteller	Auswertung der Betreiberinfos.	Auswertung und Dokumentation

Bild 2.2.2.1-6

***Bild 2.2.2.1-6**: Mit einer **Analyse potenzieller Probleme** (Bild 2.2.1-2) lassen sich Schwachstellen im Vorgehen bei Abhilfen bzw. Maßnahmen erkennen. Aus diesem Grund ist eine solche Analyse rechtzeitig durchzuführen. Damit besteht die Chance, Abweichungen von der Planung zu vermeiden und so die Erfolgssicherheit in der vorgesehenen Zeit zu erhöhen. Nicht zuletzt kann eine solche Analyse neue Einsichten und damit zusätzliche Chancen ermöglichen.*

*Auch die **Entscheidungsanalyse** (Bild 2.2.2.1-5) enthält eine Risikoabschätzung. Hier finden wir die relevanten Merkmale der einzelnen Alternativen in der Spalte „**Kritische Realisierungsschritte**“ verschiedenen Alternativen für die Abhilfe bzw. Maßnahmen bewertet.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Beispiel 2.2.2.1-2:

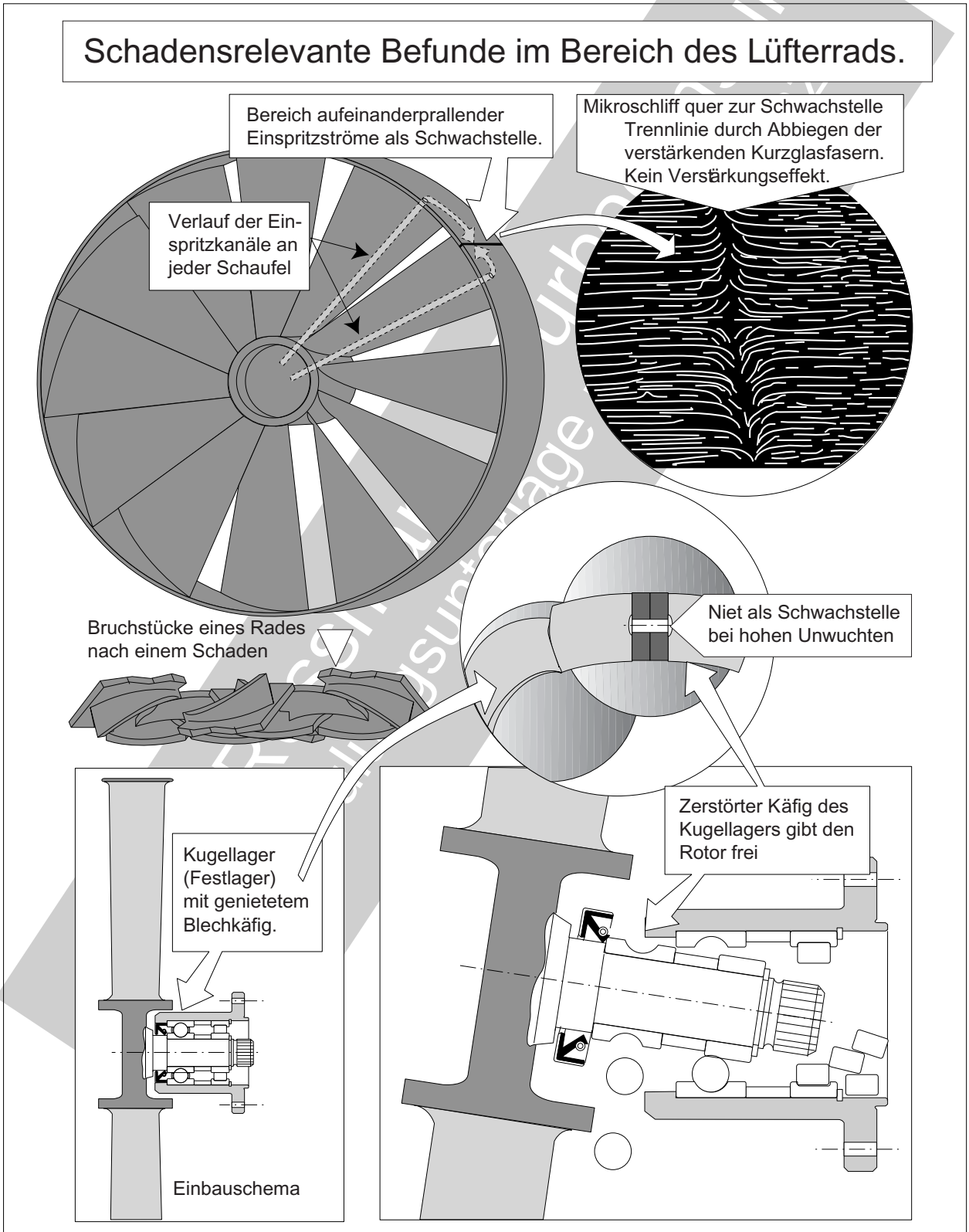


Bild 2.2.2.1-7

Bild 2.2.2.1-7 (Beispiel 2.2.2.1-2): An einem landwirtschaftlichen Fahrzeugtyp brachen in mehreren Fällen Lüfterräder aus Kunststoff mit ca. 60 cm Durchmesser. Abfliegende Bruchstücke konnten die umgebenden dünnwandigen Abdeckungen durchschlagen, was eine hohe Verletzungsgefahr bedeutete. Zusätzlich entstanden nicht unerhebliche Kosten durch Reparatur und Nutzungsausfall.

Die **Ursache der Schäden war zu klären und Abhilfen** waren zu empfehlen. Dies war offenbar dem Hersteller **ohne systematische Problemanalyse** über ein Jahr nicht gelungen. In dieser Zeit wurde das Problem nicht zuletzt durch die Produkthaftung gravierender. Es beinhaltete die Gefahr von Personenschäden, hohen Kosten, nicht zu haltende Termine und verlorenes Prestige. Deshalb wurde ein außenstehender Fachmann mit einer systematischen Problemanalyse beauftragt.

Für eine Untersuchung stand ein Neuteil und Bruchstücke eines Schadensteils zur Verfügung. Zusätzlich lagen Informationen des Herstellers vor.

Die Räder dienen der Motorkühlung. Die Schäden traten nach sehr unterschiedlichen Laufzeiten nur bei einem **neuen Radtyp** auf. Dieser unterscheidet sich von der früheren, schadensfreien Version durch einen breiten, dünnwandigen, **umlaufenden, angespritzten Ring** (Skizze oben links). Die Einspritzöffnungen befinden sich im Bereich der Radnabe. Der **kurzfaserverstärkte Thermoplast** strömt von der Nabe durch die Schaufeln radial nach außen. Dort verzweigt er sich in Umfangsrichtung. Die **Spritzmassen treffen dann zwischen den Schaufeln aufeinander**. Dies zeichnete sich in verfärbten, schmalen, axialen Zonen ab.

Einen Mikroschliff quer dazu zeigt das Detail rechts oben. Deutlich ist eine an **Fasern verarmte Zone** mit hohem Kunststoffanteil zu erkennen.

Schadensbild:

Im Rahmen der Schäden **versagte gewöhnlich das benachbarte Kugellager**. Radreste mit der Lüfterwelle waren aus der Lagerung gerissen (Detailskizze unten rechts). Sie bilden ein energiereiches Bruchstück.

Der **Käfig des Kugellagers besteht aus zwei vernieteten Blechringen** (Detail in der Mitte). Bei den Schadensfällen ist die **Nietung aufgerissen** und die Ringe sind zerstört. Eine Bruchflächenuntersuchung ließ ausschließlich Gewaltmerkmale erkennen. Die Laufbahnen wiesen keine Merkmale einer Ermüdungsschädigung (Ausbrüche) auf. Werkstoffe und Herstellung waren ‘normal’.

Beim **Zusammenfügen der** (nicht vollständigen) Bruchstücke fielen **axial verlaufende Brüche** im Außenring auf. Sie entsprechen den beschriebenen auffälligen, herstellungsbedingten Zonen.

Die Untersuchung der Bruchflächen zeigte einen, im Vergleich zu anderen Bruchflächen relativ **glatten Bruchverlauf mit wenigen Faserbrüchen bzw. herausgerissenen Fasern**.

Informationen vom Hersteller:

Die Schäden traten nur an dem neuen Radtyp mit angespritztem Umfangsring auf. Der frühere, schadensfreie Radtyp war baugleich bis auf den Umfangsring.

Die Schäden entstanden nach sehr unterschiedlichen Laufzeiten zwischen zig und mehreren tausend Betriebsstunden. Ein direkter Zusammenhang mit dem Betreiber drängte sich nicht auf.

Als Ursachen wurden vermutet:

- Unwuchten durch **Staubablagerungen im Außenring.** Auf Nachfrage wurde jedoch eingeräumt, dass beispielsweise nach den kurzen Laufzeiten keine Staubablagerungen vorhanden waren. **Selbst bei langen Laufzeiten erreichten die Staubablagerungen keine besorgniserregende Dicke.** Sie zeigten an Rädern ohne Schaden auch keine Abplatzungen die eine Erklärung für gefährliche Unwuchten geben.
- **Schädigungen beim Handling** in der Montage. Der Zulieferer spekulierte über eine hohe Stapelung bei der Zwischenlagerung.

© Axel Rossmann, Tu Ilmenau
Lehrunterlagen nur zum Unterrichtsgebrauch

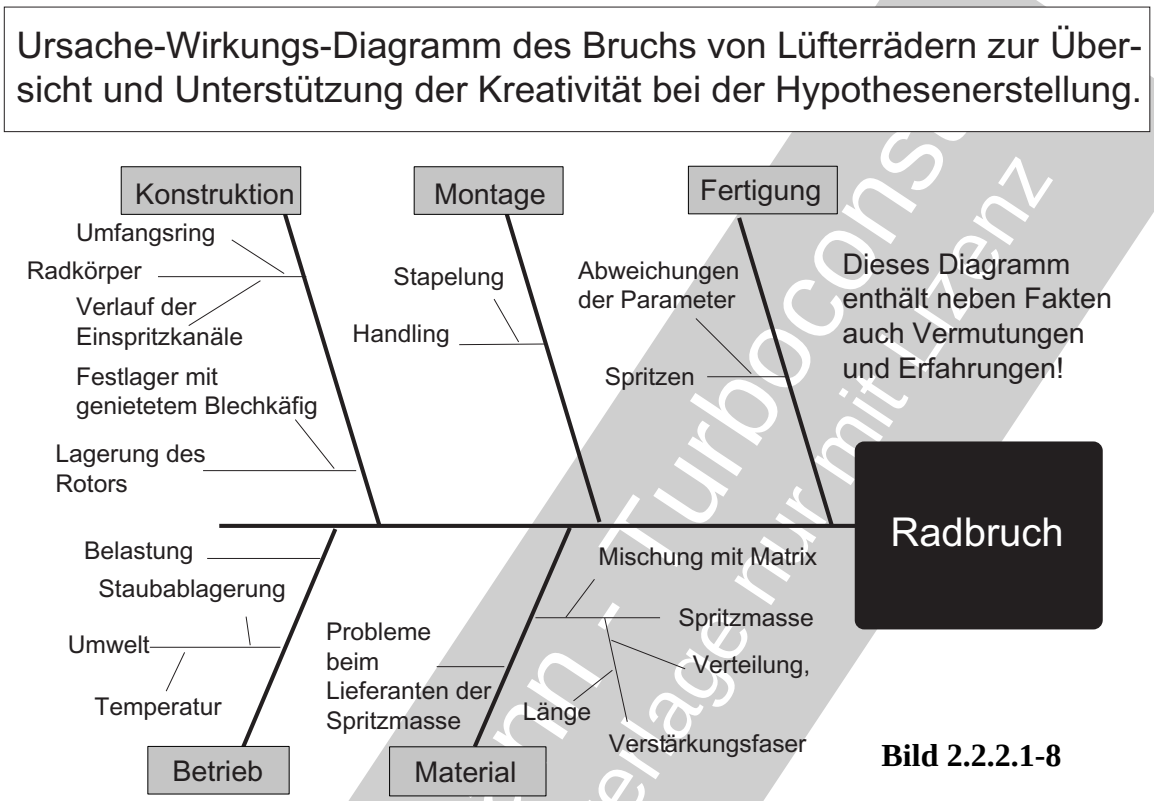


Bild 2.2.2.1-8

Bild 2.2.2.1-8 (Beispiel 2.2.2.1-2): Als Hilfe bei der Faktensammlung und Erarbeitung der Hypothesen empfiehlt sich ein Fischgrätendiagramm (Ursache-Wirkungs-Diagramm; Ishikawadiagramm, Bild 2.2.2-1). Man erkennt, dass alle typischen Einflüsse auf ein technisches Produkt betroffen sind. Das Diagramm gibt zwar eine Übersicht der möglichen Einflüsse, macht jedoch zu(r) Schadensursache(n) keine belastbaren Angaben. Diese sind der Problemanalyse in Bild 2.2.2.1-9 und 2.2.2.1-10 vorbehalten.

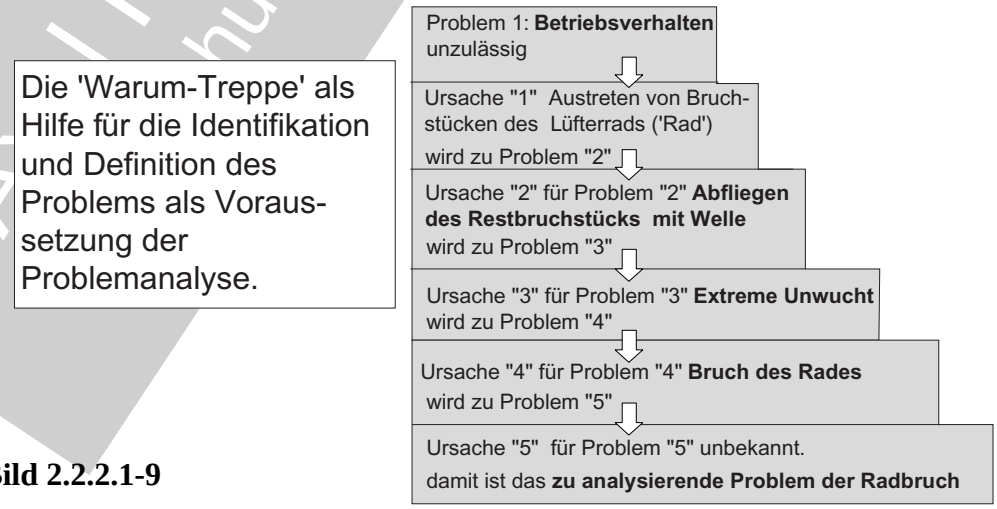


Bild 2.2.2.1-9

Bild 2.2.2.1-9 (Beispiel 2.2.2.1-2): Hier weist die Warum-Treppe bewusst eine größere Stufenzahl auf, um den Vorgang der Definition des Problems möglichst deutlich zu machen. In der Praxis kann ein Fachmann mit deutlich weniger Treppenstufen auskommen, wenn er diese überhaupt benötigt.

© Axel Rossmann - Turboconsulting
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 2.2.2.1-10 (Beispiel 2.2.2.1-2): Dieses Beispiel mit einer Vielzahl von Spekulationen im Vorfeld der systematischen Analyse ermöglicht eine große Zahl von Hypothesen. Auf der rechten Seite werden diese kurz beschrieben und in der letzten Spalte bewertet.
Widerspruchsfrei und zwanglos lassen sich allein mit „E“ alle Fakten (rechte Seite) bzw. die daraus folgenden Besonderheiten erklären. Diese Hypothese passt auch zum spontanen Versagen des Lagers unter Gewalteinwirkung.
Damit lassen sich **Schadensentstehung und -ablauf** wie folgt beschreiben (siehe Bild 2.2.2.1-7).
Beim Zulieferer wurde das **Spritzwerkzeug der „alten Version“ lediglich durch den Umfangsring ergänzt**. Dieser ist direkt mit den Schaufelspitzen verbunden. Beim Einspritzen des Kurzfaser-Kunststoffthermoplasts **trafen die Massenströme im Umfangsring jeweils zwischen den Schaufeln aufeinander**. An der Stoßstelle kam es unter **ungünstigen Spritzbedingungen** (zu niedrige Werkzeug- oder Massetemperatur) zu einer **unterschiedlich stark ausgeprägten Schwachstelle**. Darin sind die Fasern radial abgebogen und dazwischen eine **unverstärkte Kunststoffansammlung über den gesamten Ringquerschnitt**. Diese war der Kriechbeanspruchung des Rings unter den Tangentialspannungen zeitabhängig nicht gewachsen. Es kam am Ende der schädigungsabhängigen Lebensdauer zum nahezu spontanen Kriechbruch mit dem besonderen Schadensbild. Das führte wegen der Außenlage zu einer erheblichen **plötzlichen Unwucht**. Diese, bzw. der dabei auftretende **Schock auf das Kugellager,** verändert erfahrungsgemäß die Kinematik des Käfigs (Reibungs- und Beschleunigungskräfte). Im Extremfall ist dieser Effekt so stark, dass der **genietete Blechkäfig bzw. die Niete überlastet werden und brechen**. Die frei werdenden **Kugeln sammeln sich auf einer Seite der Laufbahn**. Damit erhält die Welle genug Spiel

© Axel Rossmann - TU Chemnitz
als Schulungsunterlage unentgeltlich

Arbeitsblatt

Definition des Problems: Bruch des Lüfterrades (Beispiel 2.2.2.1-2).

	Fakten (Beschreibung)		
	Am Schadensteil (ist)	Abgrenzung (ist nicht)	Besonderheiten aus Vergleich 'ist' mit 'ist nicht'.
was?	**Objekt:** - Neuer Lüfterradtyp - Umfangsring - Einspritzung über Schaufeln in Umfangsring - kurzglasgefüllter Thermoplast - Spritzbedingte Fehlstellen der Faserverstärkung im Umfangsring. **Schaden:** - Betriebsbruch - Quer zum Umfangsring verlaufende glatte Bruchfläche mit unbefriedigender Faserverstärkung	frühere Variante: - kein Bruch - Kein Umfangsring neue Variante (Schaden) - Geänderte Einspritzung - Anriss ohne Bruch - Vorwarnung, z.B. durch Unwuchten - Immer Staubablagerungen - ungefüllter Thermoplast - Duroplast	- Umfangsring - Anrisse ohne Radbruch - Schwachstellen durch ungünstige Faserorientierung im Umfangsring. - Einspritzöffnungen nicht geändert - Kurzglas gefüllter Thermoplast - Umfangsring wird durch entgegengerichtete Spritzmassenströme gefüllt. - Schnelle bzw. spontane, zeitabhängige Rissbildung. - Staubablagerungen innen am Umfangsring möglich. - Schäden ohne bedenkliche Staubablagerung - Betriebseinfluss, Art jedoch nicht erkennbar (Temperatur, Belastung, Staubanfall). - Ankündigung des Schadens, z.B. durch Unwucht
wo?	**Objekt:** - Bruchbesonderheit am Umfangsring - Fremdteil (v. Zulieferer) **Schaden:** im Betrieb - Bei verschiedenen Betreibern - unter verschiedenen Umweltbedingungen	- an Neuteilen, z.B. bei der Lagerung - Eigene Produktion - zuverlässig zerstörungsfreie Prüfung auf Fehlstellen	
wann?	**Erstmalig?** Nach Einführung neuer Version **Sonst noch?** - große Streuung der Betriebszeiten unter 100 h bis mehrere 1000 h. - **Im Bauteilleben?** nach unterschiedlichen Betriebszeiten	- Vorher - Räder der alten Version ohne Schäden - nicht nach ähnlich langer Betriebszeit	- Neue Radversion mit Umfangsring - Alte Variante mit gleichen Einspritzöffnungen - Spritzmasse füllt den Umfangsring über die Schaufeln.
wie viele?	**Objekt:** Größenordnung 10^1 Fälle. Bezogen auf die Gesamtzahl wenige. **Schaden:** - immer viele Bruchstücke - in einigen Fällen Nabenrest mit Welle herausgerissen **Tendenz:** Ansteigend	- Bezogen auf die Gesamtzahl viele. - Wenige große Bruckstücke - Tendenz abnehmend	- Einzelschäden - Steigt mit der Zahl und Betriebszeit der Teile im Betriebseinsatz.

Bild 2.2.2.1-10

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

in der gegenüberliegenden Richtung, um von der Unwucht des Nabenrests **aus der Lagerung gerissen** zu werden. In diesem Fall kann die Metallwelle Abdeckungen durchschlagen.

Erstellt von (Teammitglieder, Verantwortlicher):
.....
Datum: .....

Hypothesen (mögliche Ursachen)

Zusammenstellung	Prüfung (an den Fakten bzw. Besonderheiten)
"A" Vorschädigung bei Stapelung im Lager oder an der Montagelinie durch ungünstige Auflage wegen des Umfangsrings.	"A" Entspricht nicht dem bekannten Werkstoffverhalten. Keine Anzeichen für Schädigungen wie Deformation (Unwucht) oder Rissbildung. Eher unwahrscheinlich.
"B" Werkstofffestigkeit überfordert wegen zusätzlicher Belastung durch Umfangsring.	"B" Erklärt die große Streuung der Zeit bis zum Schaden nicht überzeugend. Eher unwahrscheinlich.
C" Betriebsüberlastung durch mögliche Besonderheiten: Häufigkeit hoher Drehzahl, Hohe Umgebungstemperatur. Staubablagerungen.	"C" Schaden auch ohne Staubablagerungen. Allein auszuschließen
"D" Unwucht durch Staubablagerungen	"D" Schäden auch ohne Staubablagerung. Erklärt gefährlich große Unwucht nicht. Auszuschließen.
"E" Kriechbruch an spritzbedingten Schwachstellen im Umfangsring.	"E" Wiederspruchsfrei, Lagerschaden ("F") als Folge. Wahrscheinlich.
"F" Lagerschaden (Käfigbruch) führt zum Radbruch.	"G" Primärer Lagerschaden. Keine Anzeichen von Laufbahnermüdung, keine Ankündigung vor Ausfall. Nur Gewaltmerkmale. Auszuschließen
"A" , "B", "C", "D" und "E" in unterschiedlichen Kombinationen.	**Widerspruchsfeie Hypothese** **E mit F als Folge** als notwendig (ursächlich). Beitragende Einflüsse "B", "C",
siehe hierzu die Bildbeschreibung.	

Bild 2.2.2.1-10

© Axel Rossmann - Turboconsult
alle Schutzrechte vorbehalten
Nutzung nur mit Lizenz

Eine Entscheidungsanalyse sichert Maßnahmen ab.

Definition: Abhilfe gegen Brüche von Lüfterrädern

Ziele		Alternative "1"			Alternative "2"		
Beschreibung der Alternative		Werkstoff mit höherer Festigkeit			Begrenzung der Betriebs beanspruchung durch Betriebsvorschrift und Info an Betreiber.		
Mussziele Sicherheit nachrüstbar		Nicht gewährleistet: Verfügbarkeit, Realisierung im Bauteil.	Erfüllung **nein**		Nicht gewährleistet: Sicherheit nicht gewährleistet	Erfüllung **nein**	
Wunschziele	Bedeutung B 1 - 10	Informationen	'Wert' C1 0-10	BxC1	Informationen	'Wert' C2 0-10	BxC2
- Kostengünstig	8						
- möglichst kurzfristig	10						
- Vor Ort tauschbar	10						
- kein Imageverlust	6						
		Gesamterfüllung			Gesamterfüllung		

W = Wahrscheinlichkeit
T = Tragweite

Risikobewertung (siehe APP in Bild 3.1.2.1-12)		
Alternative "4"	W	T
Zeitaufwand rel. groß. Info. der Betreiber Lager teurer	0-10	0-10

⇒

Risikominimierung (siehe Analyse Potenzieller Probleme)
Maßnahmen, Aufwand, Kosten, Erfüllungsgrad

Bild 2.2.2.1-11

© Axel Rossmann - TurboConsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

(Beispiel 2.2.2.1-2)

Alternative "3"			Alternative "4"		
Vorschriftsmäßiges Handling (Stapeln)			Optimierung, Nachweis und Festschreibung des Spritzprozesses. Zusätzlich besserer Lagerkäfig.		
Kein Erfolg zu erwarten weil eine solche Schädigung beim Handling sehr unwahrscheinlich ist.	Erfüllung **nein**		Garantiert eine mindest-Betriebs-festigkeit.	Erfüllung **ja**	
	'Wert' C3 0-10	BxC3	Informationen	'Wert' C4 0-10	BxC4
			Spritzwerkzeug-änderung	10	100
			Erprobung von Werkzeug und Bauteil	10	100
			Bereitstellung beim Betreiber	10	60
Gesamterfüllung					260

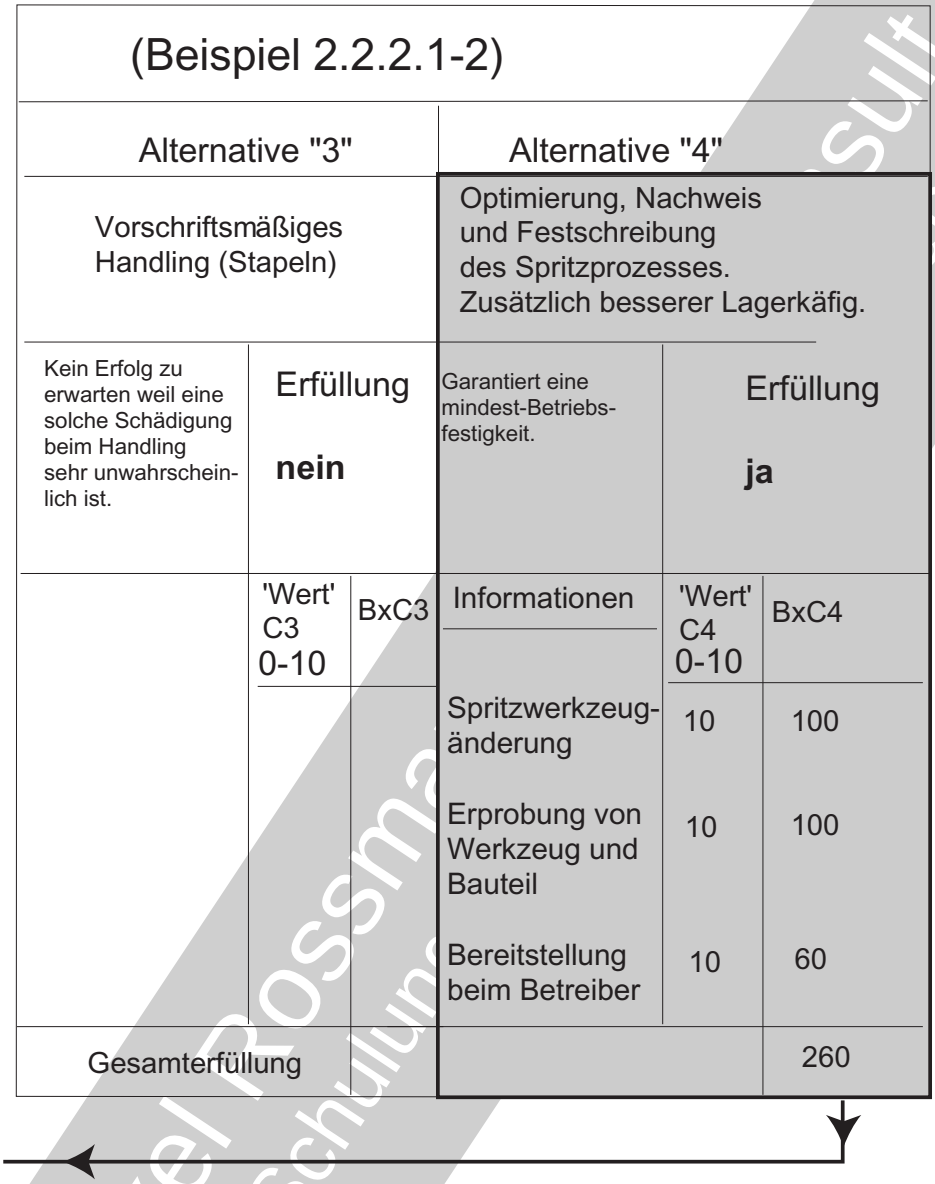


Bild 2.2.2.1-11

Bild 2.2.2.1-11 (Beispiel 2.2.2.1-2): Diese Entscheidungsanalyse kann als Ausnahmefall gewertet werden, weil **lediglich Alternative „4“** als Maßnahme die Mussziele erfüllt. Damit besteht die Bedeutung der Analyse in dieser Erkenntnis. Entsprechend beschränken sich Risikobewertung und -minimierung von vornherein nur auf diese eine Alternative. Sie sind in diesem Beispiel nicht bewertet. Dies findet man in der **Analyse Potenzieller Probleme** in Bild 2.2.2.1-12.

© Axel Rossmann Consult als Schulungsmaterialien

Beispiel eines Arbeitsblatts für eine Analyse

Absicherung von Maßnahmen/Abhilfen des technischen Problems/Schadens:						
	Kritische Realisierungs-schritte (Planschritte)	Potenzielle Probleme	W	T	Denkbare Ursachen	W
was?	Änderung des Spritzwerkzeugs - Konstruktion - Erprobung	Schwachstellen an anderen Stellen	H	H	Zulieferer:	
wo?		weitere Schäden wegen verspäteter Bereitstellung.	H	H	- Werkzeugprobleme	H
wann?	Betriebsnachweise Qualitätssicherung				- Parameteroptimierung	M
			H	H	- Kontrollverfahren	M
warum?	Tausch beim Betreiber - rechtzeitig	Vertrauensverlust beim Betreiber			Betriebserprobung	H

Ergebnis der Maßnahmen/Abhilfen im Idealfall:		
Mögliche Auswirkungen und Nebenwirkungen der Potenziellen Probleme	T	Eventualmaßnahmen
- Zu lange Zeit bis zur Bereitstellung der Teile beim Betreiber	H	Tausch gegen Teile alter Version mit 'Prooftest'
- Risiko verbauter Teile bis zur Umrüstung	H	Zwischenkontrollen mit Rückmeldung

W = Wahrscheinlichkeit (H = hoch, M = mittel, N = niedrig),
T = Tragweite (H = hoch, M = mittel, N = niedrig)

Bild 2.2.2.1-12

Bild 2.2.2.1-12 (Beispiel 2.2.2.1-2): Eine solche **Analyse Potenzieller Probleme** soll das Risiko unvorhergesehener Probleme bei der Realisierung von Maßnahmen und Abhilfen minimieren. Sie konzentriert hier die im Bild 2.2.2.1-11 als einzig erfolgversprechend erkannte Alternative „4“.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Potenzieller Probleme. (Beispiel 2.2.2.1-2)

Aktionen zur Problem- /Schadensverhütung		
Vorbeugend	Zusätzliche Aktionen	Aufwand
- Prooftest: Überdrehzahl bei erhöhter Temp. an altem Typ.	Bauteile alten Typs die den Prooftest bestanden haben kommen zum (zeitlich begrenzten) Einbau.	- Prüfvorrichtung - Prüfaufwand. - Logistik
Kontrollen beim Betreiber bis zur Nachrüstung untersuchen.	- Ermittlung aller betroffenen Betreiber. - Sofortige Benachrichtigung der Betreiber mit Anweisungen	Aufwand der Betreiber
Planung der Nachrüstung	Erarbeitung aller erforderlicher Daten (siehe unten)	Auswertung und Zeitplan erstellen

Meldesystem	Zusätzliche Aktionen	Aufwand
Vom Zulieferer	Überprüfung aller anderen entsprechenden Konstruktionen	Logistik
Betreiber an Hersteller	Auswertung der Betreiberinfos.	Auswertung und Dokumentation

Bild 2.2.2.1-12

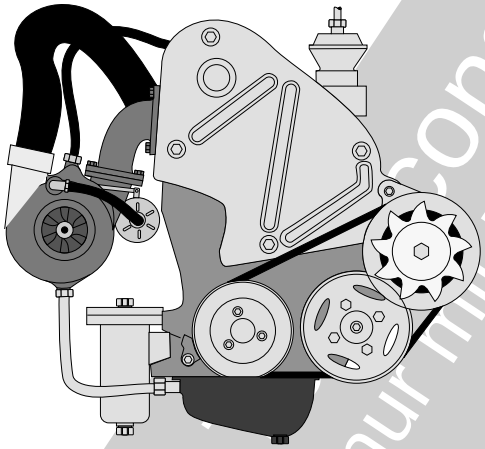
© Axel Rossmann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur 2.2.2.1

2.2.2.1-1 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden“, 2. Auflage ISBN 3-446-13416-6. 1982, Carl Hanser Verlag München Wien, Seite 116 und 124.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.2.2.2 Konzept eines Praktikums zur technischen Problemanalyse



Gerade bei Problemanalysen ist die praktische Übung Voraussetzung für die spätere erfolgreiche Anwendung. Gleichzeitig soll sie möglichst früh den Studierenden des allgemeinen Maschinenbaus mit einer wichtigen, oft nicht bewussten Aufgabe seines Berufs bekannt machen. Ist er doch in vielen Fällen, z.B. in kleineren mittelständischen Firmen, derjenige, dem die Lösung technischer Probleme bzw. Abhilfe bei Schäden zufällt. Man erwartet dafür ein Minimum an Zeit- und Kostenaufwand bei höchster Erfolgswahrscheinlichkeit. Unter diesen Voraussetzungen müssen die einleitenden Schritte selbst ausgeführt und/oder angeleitet sowie die erforderlichen, oft externen Expertisen ausgewählt, beauftragt, verstanden und gewertet werden.

In dem hier entworfenen Praktikum soll die **Erarbeitung der Fakten als Voraussetzung für die Problemanalyse** an Beispielen geübt werden. Dabei ist eine ausreichende Einschätzung des Beitrags und der Notwendigkeit **der Laboruntersuchungen** von besonderer Bedeutung.

Diese Arbeiten sind im Rahmen der Problemanalyse Voraussetzung für weitere Schritte:

- **Auswertung** von Versuchsgeräten und deren Bauteilen. Dazu gehört die Zustandsermittlung und -dokumentation.
- Definition von **Versuchsparametern**, um praxisrelevante Schäden unter definierten Bedingungen zu erzeugen.
- Erstellung von **Ablaufplänen** und Aufwandschätzungen für Nachuntersuchungen von Versuchsteilen.

Von einem solchen Praktikum dürfte ein **großer Motivationsschub, besonders von der Einsicht für die im Studium zu sammelnden Kenntnisse**, ausgehen. Deshalb ist es vorteilhaft, dieses Praktikum bereits **am Anfang des Studiums**, im Rahmen des ersten Semesters den Studierenden zu ermöglichen. Für die Praxisnähe ist **Teamarbeit** anzustreben. Dabei sollte jedoch gewährleistet sein, dass jeder von allen Detailaufgaben zumindest ausreichend informiert ist. An wichtigen Laboruntersuchungen wie makroskopische Beurteilung von Schäden (z.B. Brüche, Bild 4.4-2) und Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM, Bild 2.2.2.4-3) muss jeder teilnehmen. Es empfiehlt sich eine Zusammenarbeit mit der Werkstoffkunde, wo neben Fachkenntnis die erforderlichen Geräte vorausgesetzt werden dürfen.

Im Folgenden wird, basierend auf langjährigen praktischen Erfahrungen, ein realitätsnahes Praktikum mit vertretbarem Aufwand entworfen (siehe auch Lit. 2.2.2.2-8)..

© Axel Rossmann Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.2.2.2.1 Untersuchungsobjekte

Benötigt wird ein geeignetes, möglichst einfach und kostengünstig zugängliches **Untersuchungsobjekt**. Ein Schaden ist nicht unbedingt erforderlich. Bei sehr lang gelaufenen Maschinen wie sie im Schrott zu finden sind, ist **auch ohne Ausfall mit lohnenden Betriebsschädigungen zu rechnen**. Hierzu gehören Verschleiß und Korrosion. Solche Objekte gibt es recht häufig. Als besonders geeignet erscheinen ausgesonderte **Kraftfahrzeugteile**, insbesondere der Motor. Hier finden sich viele unterschiedliche Machinenelemente, Bauteile und Komponenten mit spezifischen Schadensmechanismen (Bild 2.2.2.2-1). Neben den eigentlichen Motorteilen wie Kolben, Pleuel, und Kurbelwelle ist die Kupplung mit vielen Elementen (Schrauben, Gleit- und Wälzlager, statische und Bewegungsdichtungen, Federn, Tribosysteme), Pumpen (Wasser, Öl, Kraftstoffeinspritzung, Ketten und Riementriebe, Filter) interessant. Auslassventile können typische Heißteilschäden aufweisen. Sie sind auch an der Auspuffanlage und gegebenenfalls einem Turbolader zu erwarten. Schäden einzelner Aggregate wie Wasserpumpe oder Kupplung sind ebenfalls mit vergleichsweise geringem Aufwand für eine Problemanalyse geeignet. So ermöglicht ein Motor die gleichzeitigen und kombinierten Arbeiten mehrerer Teams mit unterschiedlichen Aufgaben. Weiter bieten sich Bremsen, Getriebe und Radlager an.

In Bild 2.2.2.2-1 sind Angaben zu den Problemen von Motorteilen wie Schadensmechanismen und Literatur enthalten. Sehr zu empfehlen ist eine Recherche im Internet. Hier sind sowohl typspezifische Angaben zu Schwachstellen, Schäden und deren (vermeintlichen) Ursachen zu erwarten, als auch umfangreiche Literaturhinweise wie Montageanleitungen.

Bauteilspezifische Problembereiche

Bauteil/Komponente	Typische Befunde	empfohlene Literatur	Angaben im Buch
Pleuel	Schraubenprobleme Gleitlagerschäden Reibkorrosion	2.2.2.2-3	
Kolben	Risse, Brüche Verschleiß Kaltverschweißen Erosion	2.2.2.2-3	
Ventile	Risse, Brüche Verschleiß Korrosion	2.2.2.2-3	
Steuerkette	Verschleiß Bruch	2.2.2.2-7	
Kupplung	Verschleiß Federprobleme Lagerschaden Dichtungsschaden	2.2.2.2-3	
Wasserpumpe	Dichtungsschaden Lagerschaden		

Bild 2.2.2.2-1

© Axel Rossmann - Turbo-Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.2.2.2.2 Ausstattung

Neben einem geeigneten Raum, und einer betreuenden, praxisnahen und fachkundigen Anleitung ist eine Mindestausrüstung zum Zerlegen des Motors und Auflegen der Teile erforderlich. Geeignet sind **Werkstattausrüstungen** aus dem Handel. Hierzu gehören in erster Linie eine möglichst universelle **Demontagevorrichtung** und **Werkzeug**. Ferner muss die Reinigung der Teile und die **Entsorgung der Reinigungsflüssigkeit sowie von Hilfsstoffen wie Öl** gewährleistet sein. Für eine erste **Dokumentation und makroskopische Auswertung** dürfte eine handelsübliche **elektronische Kamera mit Objektiven** die auch Makroaufnahmen zulassen und ein **Binokular,** das auch fotografische Aufnahmen ermöglicht, genügen. Für mikroskopische Laboruntersuchungen mit dem REM, Metallografie und gegebenenfalls Ölanalysen sollte die „Werkstofftechnik“ ausgerüstet sein. Deshalb ist mit den Fachleuten dieses Bereichs eine entsprechende Zusammenarbeit anzustreben. Dies ist praxisgerecht, weil für Untersuchungen, zumindest bei mittelständischen Firmen, vorteilhaft externe Labors genutzt werden.

Grundsätzlich ist bei den praktischen Arbeiten der **Arbeitsschutz** (Arbeitsplatzgestaltung, Arbeitssicherheit) vorschriftsgemäß einzuhalten. Das gilt besonders für die Arbeiten (Demontage) an Motor und Bauteilen.

2.2.2.2.3 Vorgehen

Aus der Praxis hat sich Folgendes bewährt:

- **Dokumentation** vor der Zerlegung, insbesondere aller Auffälligkeiten wie Leckagen.
- Zerlegung. **Dokumentation** von Abweichungen wie große Spiele und Beschädigungen.
- **Auflegung** der ungereinigten Teile (engl. dirty lay out) und Dokumentation von Auffälligkeiten
- **Reinigung** der Teile und Auflegung zur genauen Begutachtung mit Dokumentation.
- Schadensspezifisches **Literaturstudium** (empfohlen wird eine intensive Nutzung des Internets) und Fachdiskussionen.
- Erstellung eines **Ursache-Wirkungs-Diagramm**s (Bild 2.2.2-1, Bild 2.2.2.1-2 und Bild 2.2.2.1-8).
- Festlegung der Untersuchungen und erster **Untersuchungsschritte** sowie Zuordnung der Teams.
- Besprechungen mit **Präsentation** der Zwischenergebnisse und Hypothesen. Festlegung des weiteren Vorgehens.
- **Problemanalyse im Team** nach Vorbereitung und mit Beauftragung der Dokumentation als Übung für jedes Teammitglied.
- **Analyse Potenzieller Probleme**
- **Berichterstellung** mit empfohlenen **Maßnahmen**.
- **Präsentation** der Ergebnisse mit Erläuterungen und Diskussion. In der Praxis erfolgt dies beim kritischen Auftraggeber und sollte sich an dieser Situation orientieren.

© Axel Rossmann - Turbocon Sult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur 2.2.2.2

2.2.2.2-1 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden“, 2. Auflage ISBN 3-446-13416-6. 1982, Carl Hanser Verlag München Wien.

2.2.2.2-2 „Erscheinungsformen von Rissen und Brüchen metallischer Werkstoffe“, ISBN 3-514-00463-3 Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997.

2.2.2.2-3 Ernst Greuter, „Motorschäden - Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen“, 1. Auflage, 1994, ISBN 3-80231515-4, Würzburg: Vogel Buchverlag.

2.2.2.2-4 “Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11 Failure Analysis and Prevention“ American Society for Metals (ASM), Metals Park, Ohio 44073, ISBN 0-87170-007-7 (v.1), November 1986, Seite 168, 356, 373, 402.

2.2.2.2-5 J.Grosch und Mitautoren, „Schadenskunde im Maschinenbau. Charakteristische Schadensursachen-Analyse und Aussagen von Schadensfällen“, Band 308 der Reihe ‘Kontakt & Studium Maschinenbau’, ISBN 3-8169-1202-8, Expert Verlag.

2.2.2.2-6 G..Lange, „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, 5. Edition, April 2001, ISBN 3-527-30417-7, Verlag Wiley-VCH, Weinheim.

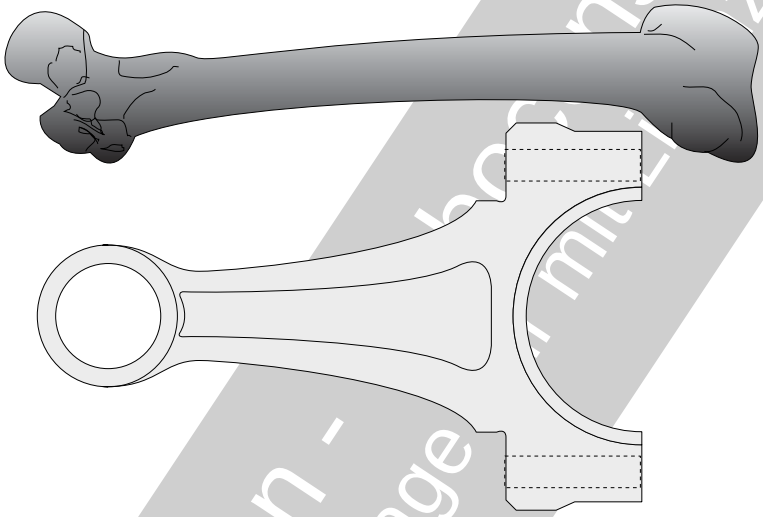
2.2.2.2-6 H.Oettel, H.Schumann, „Metallografie“, ISBN 3-527-3067-9x, VCH Verlag GmbH, Oktober 2004.

2.2.2.2-7 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, ISBN 3-540-25125-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005.

2.2.2.2-8 A.Bühring-Polaczek, „Großes Gießereitechnisches Praktikum - Guss im Automobilbau“, RWTH Aachen, Wintersemester 06/07, Seite 1-24.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.2.2.3 Konzept eines Praktikums zur Maschinenelementkunde („Technische Anatomie“)



Gerade bei Studierenden der Generationen die im Studium in der Konstruktionslehre in erster Linie am Bildschirm arbeiten (CAD), beobachtet man große Motivation für eine „**Technische Anatomie**“. Beim medizinischen Studium werden in der Anatomie Knochen bestimmt, deren Funktion und Schädigungen sowie wichtige Merkmale behandelt. Ähnlich soll das **anwendungsbetonte Verständnis der Maschinenelemente** bei den Studierenden gefördert werden. Dazu gehören:

- Gestaltung,
- Anwendungsspezifische Besonderheiten,
- Werkstoffe,
- Fertigungstechnologieen,
- Schwachstellen und Schadensmechanismen,
- Betriebsverhalten und
- Qualitätssicherung.

Die **persönliche Teilnahme** an Lehre und Seminaren ist unerlässlich um sich das überprüfbare Wissen anzueignen.

Für ein solches Praktikum sind zunächst die **Hardwarevoraussetzungen** zu schaffen. Dazu werden möglichst **gelaufene Maschinenelemente** mit **Betriebsspuren** und/oder **Schäden** benötigt. Eine befriedigend große Sammlung dürfte einige Zeit und Engagement erfordern. Geeignete Teile sind von Reparaturwerkstätten und Betreibern zu erwarten. Sie sollten aus einem möglichst breiten Spektrum von Maschinen stammen. Neben Verbrennungsmotoren bieten sich auch andere Kraftfahrzeugelemente, dazu Fördermittel aus der chemischen oder verarbeitenden Industrie wie Turbopumpen und Rohrleitungen an. Natürlich sollten nach Möglichkeit die relevanten Eigenschaften (siehe oben) bekannt sein. Äußerst vorteilhaft ist eine aussagefähige **Schnittzeichnung** die sowohl in der **Zusammenstellung** Lage und Funktion des Teils erkennen lässt als auch **Detailzeichnungen** der Maschinenelemente mit möglichst umfangreichen Maß- Fertigungs- und Werkstoffangaben. Hier wäre eine Zusammenarbeit mit der interessierten Industrie (Hersteller) von Vorteil.

Bei einer Überprüfung des Lehrerfolgs sollte der Studierende in der Lage sein an einem ihm zufälltig zugeordneten Maschinenelement seine Kenntnisse zu präsentieren.

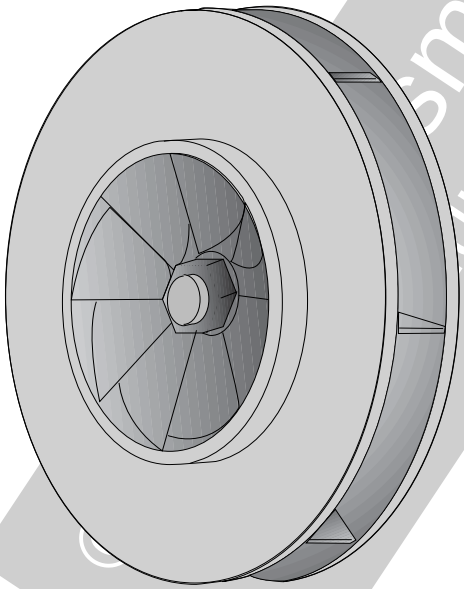
© Axel Bosselmann - bosselmann consult
Lehrmittelentwicklung und Schulungsmittelgestaltung

2.2.2.3.1 Untersuchungsobjekte

Notwendig ist eine ausreichende Anzahl unterschiedlicher Maschinenelemente die einen möglichst großen Überblick gewährleisten. Es solte sich vorzugsweise um Objeklte mit typischen **Betriebsspuren** handeln. Dabei sind Bauteile mit Schäden erfahrungsgemäß besonders lehrreich. Optimal wäre es, wenn auch jeweis ein Neuteil für vergleichende Schlussfolgerungen/Beurteilungen vorliegt. Der Lehre und Erfolgskontrolle stehen damit eine Vielzahl Möglichkeiten offen nicht nur das angesammelte Wissen sonder das bewusste Verständnis zu beurteilen. Das ist für den späteren fachbezogenen Berufserfolg von außerordentlicher Bedeutung. Auf diese Weise ist eine Lehre die auch berechtigte praxisbezogne Wünsche der Industrie berücksichtigt, gewährleistet.

Dazu soll das Beispiel des Rads einer Kreiselpumpe dienen (Lit. 2.2.2.2-6).

© Bismann - TurboConsult
Unterlage nur mit Lizenz



Mögliche Betriebsspuren/Schäden am Laufrad einer Kreiselpumpe

- Verschleiß/Erosion (Lit. 2.2.2.2-2, Lit. 2.2.2.2-4, Lit. 2.2.2.2-6)
- Korrosion (Lit. 2.2.2.2-4, Lit. 2.2.2.2-6)
- Kavitation (Lit. 2.2.2.2-4, Lit. 2.2.2.2-7)
- Rissbildung (Ermüdung)
- Mechanische Schädigung (Lit. 2.2.2.2-6, Lit. 2.2.2.2-3)
- Wellenschaden (Lit. 2.2.2.2-5)

Interessante Konstruktionsmerkmale:

- Bauart
- Eignung für Fördermedium
- Werkstoff (Lit. 2.2.2.2-4)
- Herstellungsverfahren (Lit. 2.2.2.2-4)
- Bearbeitung
- Kanalgestaltung
- Schaufelzahl und Geometrie

Bild 2.2.2.3-1

2.2.2.3.2 Seminar- /Praktikumsausstattung

- Ausreichend geeignete Maschinenelemente mit der Möglichkeit einer direkten Inaugenscheinnahme durch die Studierenden.
- Tische für die Auflage der Bauteile.
- Papier-Schnittzeichnungen möglichst 1:1
- Binokular mit geeigneter Beleuchtung für eine Dokumentatiom und Klärung der Phänomene.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.2.2.3.3 Überprüfung des Lernerfolgs

Um sich ein Bild vom Lernerfolg zu machen erscheint folgendes Vorgehen sinnvoll:
- Zuordnung des Bauteils nach dem Zufallsprinzip.
- Ausreichende Vorbereitungszeit ohne Hilfen (ca. 5 Minuten).
- Fachgespräch.

Literatur 2.2.2.3

2.2.2.3-1 Ernst Greuter, „Motorschäden- Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen“, 1. Auflage, 1994, ISBN 3-80231515-4, Würzburg: Vogel Buchverlag.

2.2.2.3-2 J.Grosch und Mitautoren, „Schadenskunde im Maschinenbau. Charakteristische Schadensursachen-Analyse und Aussagen von Schadensfällen“, Band 308 der Reihe ‘Kontakt & Studium Maschinenbau’, ISBN 3-8169-1202-8, Expert Verlag., Seite 328 und 332.

2.2.2.3-3 „Handbuch der Schadenverhütung“, Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1972, Seite 205.

2.2.2.3-4 “Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11 Failure Analysis and Prevention“ American Society fpor Metals (ASM), Metals Park, Ohio 44073, ISBN 0-87170-007-7 (v.1), November 1986, Seite 168, 356, 373, 402.

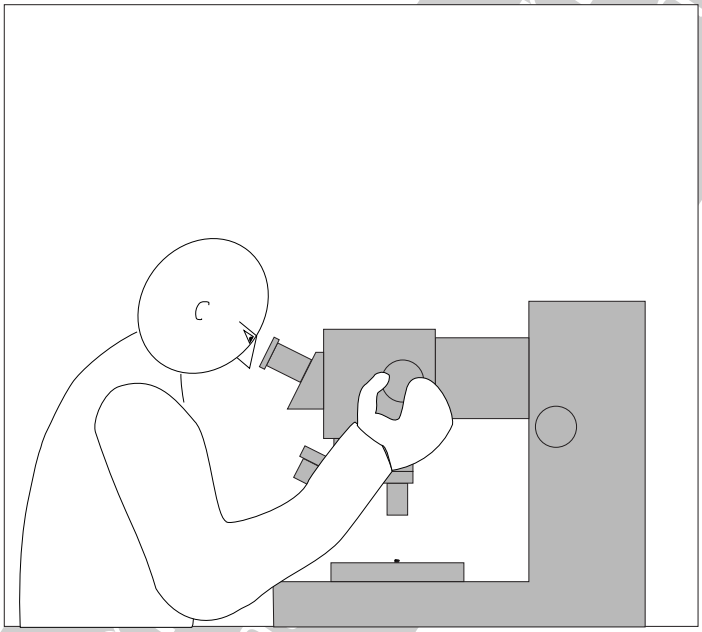
2.2.2.3-5 G..Vouros, „Begutachtung von Maschinenschäden aus der Sicht eines Konstruktions-, Betriebs- und Service-Ingenieuers, 1. Auflage 2001, Book on Demand GmbH, ISBN 3-8311-1475-7, Seiten 91-93, 205.

2.2.2.3-6 E.J.Pohl, „Wege zur Schadenverhütung im Maschinenbetrieb“, Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin, 1964, Seiten 82, 274, 303, 318.

2.2.2.3.2-7 G..Lange, „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, 5. Edition, April 2001, ISBN 3-527-30417-7, Verlag Wiley-VCH, Weinheim, Seite 250.

© Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.2.2.4 Mikroskopische Untersuchungen



Eine detaillierte Kenntnis der Funktion der **Laborgeräte** (z.B. REM und Mikroanalysen) für die Ermittlung von Fakten in Problemanalysen ist für den Maschinenbauer nicht notwendig. Wichtig ist dagegen die Kenntnis des Potenzials für die Nutzung externer fachkundiger **Anbieter** wie private Institute oder Hochschulen. Hier ist die erforderliche Expertise zu erwarten. Sie konzentriert sich auf die Auswahl der optimalen Untersuchungsmethode bzw. deren Variante, Auswahl der Probenposition, und die Dokumentation. Zu erwarten sind auch Hinweise auf den Schädigungsmechanismus mit Ursachen und deren Einstufung.

Grundsätzlich sollte der Verantwortliche für eine Problemanalyse bei den externen Untersuchungen zugegen sein (z.B. makroskopische und mikroskopische Bruchflächenbewertung - REM), zumindest sich die Untersuchungsergebnisse vor Ort zeigen und erklären lassen (z.B. Metallografie).

Die Erfahrung zeigt, dass oft anfangs **nicht bewusstes Hintergrundwissen** des Problemanalytikers entscheidend zum Erfolg der Untersuchungen, insbesondere von Auswertung und Bewertung vor Ort beiträgt.

Bild 2.2.2.4-1: *Auch im Zeitalter elektronenmikrokopischer Untersuchungen (Rasterelektronenmikroskop =REM, Bild 2.2.2.4-3) ist die* ***Metallografie im Fertigungsbereich*** *unverzichtbar. In besonderem Maß ist hier für sichere Ergebnisse Fachwissen erforderlich. Ohne dieses besteht die Gefahr falscher und/oder unbrauchbarer Ergebnisse und/oder Interpretationen.*

Der notwendige sogenannte ***„metallografische Schliff“*** *erfordert in der Regel die Entnahme von Proben aus dem Bauteil („1“, Rahmen oben). In diesem Fall handelt es sich also um ein zerstörendes Verfahren. Reicht jedoch die* ***Abdrucktechnik*** *(Bild 2.2.2.4-4) für indirekte Untersuchungen (z.B. Gefüge) aus, kann das Verfahren als zerstörungsfrei angesehen werden. Dies gilt auch für „ambulante“ Untersuchungen am Bauteil im Bereich zugänglicher Flächen (Polieren, Ätzen, visuelle Auswertung) mit einem tragbaren Mikroskop.*

Üblicherweise läuft eine metallografische Untersuchung wie folgt ab. Zuerst müssen geeignete Prüfstücke dem Bauteil ausreichend vorsichtig und sachkundig entnommen werden (Bild 2.2.2.4-2). Dabei ist auf die ***für das Problem repräsentative Lage*** *zu achten.* ***Beschädigungen wie Überhitzung und plastische Verformung durch den Trennprozess,*** *die als Artefakte das Untersuchungsergebnis beeinflussen können, müssen vermieden werden. Dann werden diese Proben für die erforderlichen Folgeschritte (mittlerer Rahmen) in Kunststoff eingebettet („2.1“). Darauf folgt das Polieren („2.2“) und zur „Entwicklung“ des Gefüges werkstoffspezifische Ätzungen („2.3“). Die Schliffauswertung (Rahmen unten) wird unter dem Mikroskop bei stufenweiser Vergrößerung bis ca. 1000x vorgenommen. Vorzugsweise wird zuerst der polierte Zustand mikroskopisch untersucht, wenn Fehlstellen wie Risse oder Poren im Zentrum des Interesses stehen. Danach wird der Schliff entsprechend der Fragestellung (Gefüge, Beschichtung) geätzt. Bei diesem Vorgang werden die verschiedenen Gefügebestandteile entsprechend Art und Lage unterschiedlich abgetragen. Es entsteht ein fachkundig auswertbares Bild, das z.B. die Bestimmung von Korngrößen und Kornorientierungen zulässt.*

Mit einer metallografischen Untersuchung lassen sich also Veränderungen und Eigenschaften in den Bauteilen auf vergleichsweise einfache und sichere Weise identifizieren, bestimmen und langfristig dokumentieren.

Zu den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten gehören insbesondere:

- ***Charakteristische Gefügemerkmale****. Damit werden z.B. die Qualitätsmerkmale der Rohteile und des Halbzeugs überwacht.*

- ***Überprüfung auf Fehlstellen*** *wie Gussporosität.*

- ***Prozessspezifische Merkmale*** *wie Dicke und Strukturen von Schichten. Veränderungen (z.B. als Folge von Diffusionsvorgängen) und Schädigungen (z.B. Risse in Größe, Verlauf und Lage). Die Befunde lassen auf Entstehungsmechanismen und Ursachen rückschließen.*

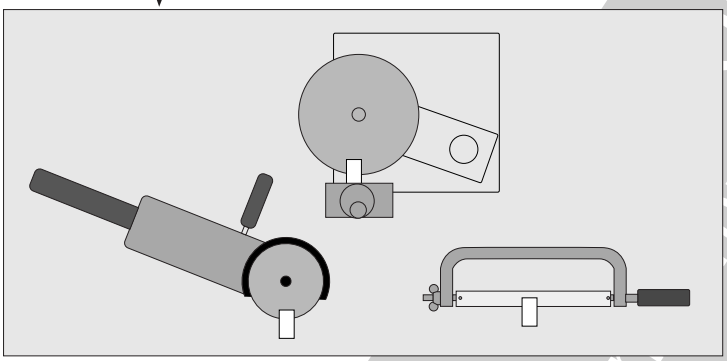
- ***Härteverläufe*** *im Mikrobereich, z.B. von Oberflächenhärtungen (Einsatzhärtung, Nitrieren).*

© Kaliczmann - Tu Berlin
Lizenzbedingungen siehe Impressum

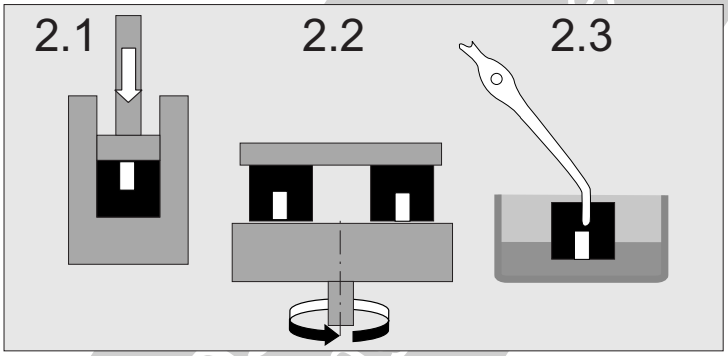
Faktenermittlung mikroskopische Untersuchungen

Die Metallografie ist auch heute noch eine der wichtigsten Untersuchungsmethoden der Schadensanalyse.

Herstellung eines metallografischen Schliffs.



1. Probenentnahme
Es gibt viele Möglichkeiten, hier einige Beispiele.

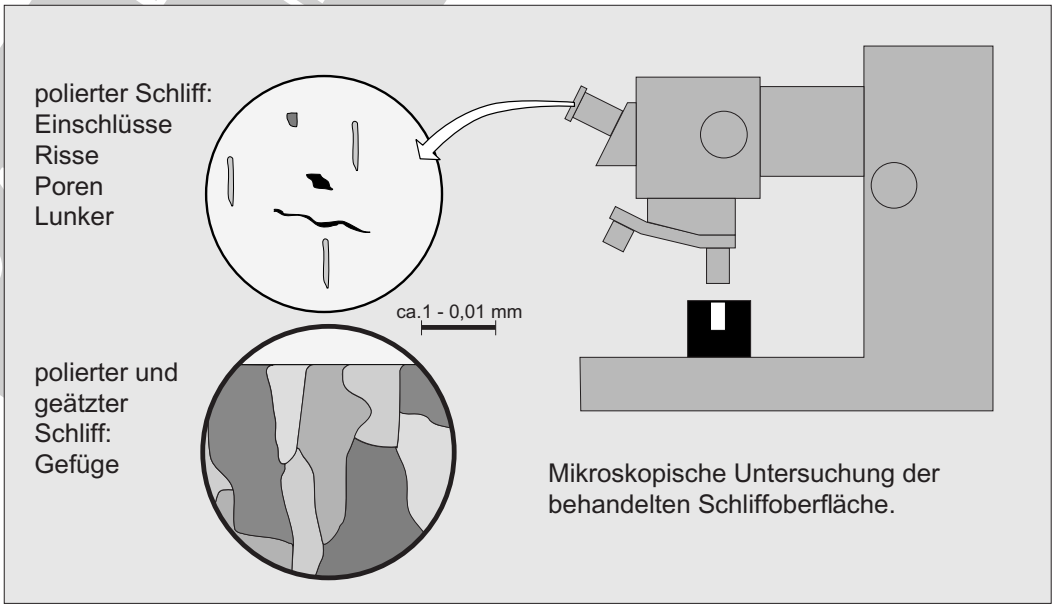


2.1 Einbetten der Probe

2.2 Schleifen und Polieren der Probenfläche

2.3 Ätzen der Probenfläche

Auswertung eines metallografischen Schliffs.



Mikroskopische Untersuchung der behandelten Schliffoberfläche.

Bild 2.2.2.4-1

Faktenermittlung mikroskopische Untersuchungen

Bild 2.2.2.4-2: Metallografische Untersuchungen *bilden ein Herzstück* ***der Qualitätssicherung und Schadensanalyse****. Sie dienen der Prozessüberwachung (z.B. Schichtbeurteilung) und tragen wichtige Fakten zu Problemanalysen bei (Bild 2.2.1-2). Gerade dafür ist eine Voraussetzung, dass Fehlinterpretationen vermieden werden. Möglichst sichere Untersuchungsergebnisse erfordern ein geeignetes Umfeld.*

Auch mikroskopische Untersuchungen wie Metallografie und am REM sind ***Teamarbeit****, hier in erster Linie* ***mit dem fachkundigen Auftraggeber****. Dabei hat dieser die Aufgabe einer ausreichenden Information über Hintergründe, die eine gezielte Untersuchung unterstützen. So lässt sich die richtige Schlifflage am Bauteil und die Schliffebene im zu untersuchenden Bereich gewährleisten. Sie sind so Voraussetzung für einen realistischen Befund. Zu wichtigen Informationen gehören Sinn und Ziel, Auswirkungen, Vorgeschichte, Besonderheiten für eine Interpretation des Befunds und Begründungen von Terminvorstellungen. Dieser Beitrag motiviert, indem er den Sinn der Untersuchung bzw. Prüfung deutlich macht, dass der Untersucher die Bedeutung seiner Arbeit einschätzen kann. Zusätzlich können bestimmte, scheinbar nebensächliche Befunde wie Gefügeabweichungen oder Anzeichen plastischer Verformungen besser erkannt und gewertet werden. Der Auftraggeber sollte am besten bei der Auswertung der Schliffe, zumindest aber bei interpretierbaren Ergebnissen und Untersuchungen außerhalb der Routine (z.B. bei Schäden und Abweichungen), zugegen sein. Dafür ist besondere Fachkenntnis des Auftraggebers in der mikroskopischen Bewertung keine Voraussetzung. Gerade aus einer anderen Perspektive wird die Sichtweise erweitert. Das bietet die Chance, ursächliche Einflüsse des Umfelds zu erkennen. So ist eine optimale Information über Aspekte gewährleistet, deren mögliche Zusammenhänge und Einflüsse erst mit dem Befund erkannt werden. Auf diese Weise ist auch eine notwendige kritische Diskussion gewährleistet. Natürlich muss letztendlich dem Untersucher die Wertung für seine fachliche Stellungnahme überlassen werden. Wichtige Voraussetzung einer längerfristigen vertrau-*

Merksatz:

Eine Voraussetzung für optimale Ergebnisse von Metallografie und REM ist eine vertrauensvolle gemeinsame Bewertung der Proben. Dabei bringt der Auftraggeber gegebenenfalls Hintergrundinformationen ein.

Merksatz:

Auch ein(e) Metallographin/ Metallograph braucht Motivation. Für den **Auftraggeber** bedeutet das:

- Geben Sie Hintergrundinformationen,
- Erklären Sie die Bedeutung des Falls,
- Informieren Sie über Besonderheiten,
- Zeigen Sie zum vereinbarten Termin Interesse am Ergebnis ohne zu „quälen“.

Faktenermittlung mikroskopische Untersuchungen

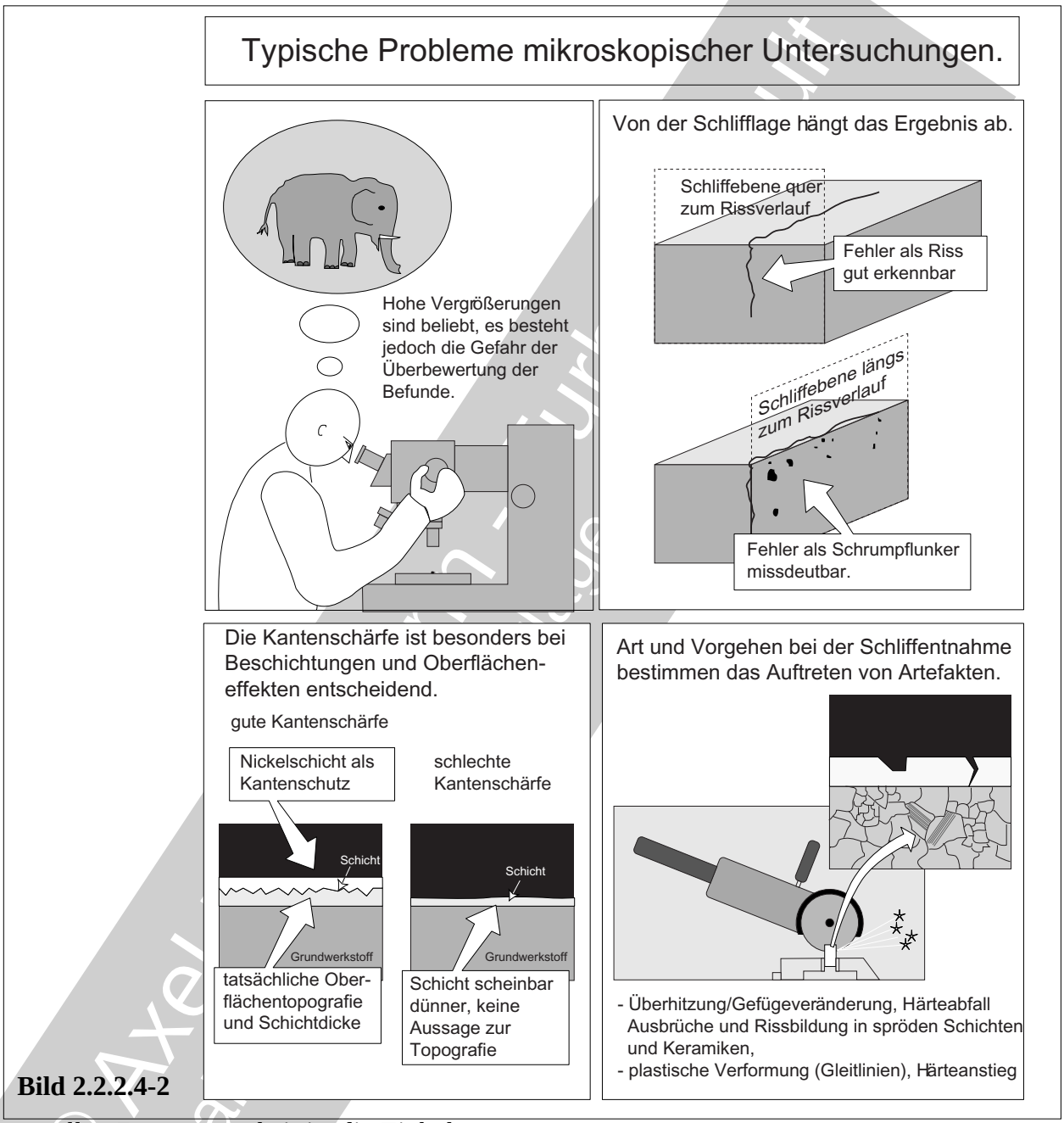


Bild 2.2.2.4-2

ensvollen Zusammenarbeit ist die Einhaltung zugesagter Untersuchungstermine. Genauso wichtig ist, dass diese auch vom Auftraggeber wahrgenommen werden. Wurden eng terminierte Termine nicht genutzt oder gar vergessen, signalisiert das auch in späterer Zusammenarbeit eine niedrige Priorität der Untersuchungsergebnisse.

In einem Team hat auch der Untersucher über seine Facharbeit hinaus einen Beitrag zu leisten. Er sollte ***den Auftraggeber ermuntern, der Bewertung des Schliffs oder der REM-Untersuchung beizuwohnen****. Unzulässig ist, dies durch „Killerphrasen" wie: 'was (genaues Untersuchungsergebnis) erwarten Sie ?' Eine Antwort kann in vielen Fällen gerade erst die Untersuchung geben. Erfahrungsgemäß führen häufig erst Erkenntnisse während der Auswertung zu weiteren Klärungs- und Bewertungsansätzen.*

Im Folgenden soll auf einige typische, potenzielle Probleme im Zusammenhang mit mikro-

skopischen Untersuchungen eingegangen werden.

Realistische Einschätzungen von Befunden *(Skizze oben links): Es ist nicht einfach, unter hohen Vergrößerungen die Auswirkungen eines Befunds auf das Bauteilverhalten abzuschätzen. So können Fehlstellen die tatsächlich nur einige µm lang sind, bei bauteilspezifischen Betriebsbedingungen nicht wachstumsfähig sein und als Schwachstellen gelten. Die im Mikroskop erscheinende Länge kann jedoch intuitiv einen äußerst gefährlichen Eindruck erwecken und eine Interpretation als unzulässigen Fehler nahe legen.*

Befund und Schlifflage *(Skizze oben rechts): Voraussetzung für ein problembezogenes ausagekräftiges Untersuchungsergebnis ist, dass die* ***Probenentnahme in der Problemzone des Bauteils*** *erfolgt. Dies erscheint trivial, ist es aber erfahrungsgemäß nicht. Soll z.B. die Korngröße in Hinsicht auf die LCF-Festigkeit bestimmt werden, ist es entscheidend, dass der* ***lebensdauerbegrenzende Bauteilbereich*** *eindeutig definiert wurde und bei der Probenentnahme bekannt ist. Dafür hat gegebenenfalls der Auftraggeber oder die anzuwendende Vorschrift mit Angaben zu sorgen. So ist bei einer Rotorscheibe, auf Grund der Schmiedebedingungen, mit unterschiedlichen Gefügen zwischen Kranz- und Nabenbereich zu rechnen.*
Auch wenn der Ort der Schliffentnahme stimmt, ist die richtige Schliffebene keine Selbstverständlichkeit und kann über das Untersuchungsergebnis entscheiden. Wird ein Riss in seiner Ebene (seitlich) angeschliffen, kann der Befund einer Schrumpfporosität (Lunker, Detail oben rechts, siehe auch Bild 5.2.1-8) zum Verwechseln ähneln. Handelt es sich um einen Gusswerkstoff mit der Wahrscheinlichkeit derartiger Fehler, ist eine Fehlinterpretation vorprogrammiert.
Beispiel *ist die Reibschweißnaht eines gegossenen Ni-Basis Turbinenrades mit einer Stahlwelle. Die Eindringprüfung zeigte im Bereich der Schweißnaht auf der Gussseite Fehlstellen. Ein metallografischer Schliff wurde quer zur Schweißnaht in axialer Ebene gelegt. Dabei wurden die vorhandenen axialen Schweißrisse flach angeschliffen und fälschlicherweise als typische Schrumpflunker fehlinterpretiert. Die Folge waren untaugliche Abhilfemaßnahmen im Gießprozess mit erheblichen Kosten und großem Zeitverlust. Erst eine erneute Untersuchung an Schliffen in der richtigen Ebene konnte die Anzeigen als Schweißrisse identifizieren.*

Kantenschärfe *(Skizze unten links): Gerade der Oberflächenbereich steht bei vielen mikroskopischen Untersuchungen im Vordergrund. Typische Beispiele sind Prozessüberwachungen wie*
- ***Beschichtungen*** *: Dicke, Gefüge, Härteverlauf.*
- ***Verfestigungszonen****: Tiefe, Härteverlauf (Lit. 2.2.2.4-6)*
und Fehlstellen welche die Schwingfestigkeit beeinflussen können, wie

- ***Schädigungen aus einem Zerspanungsprozess:*** *Kommarisse, Überhitzung vom Schleifen, Überstrahlung (Lit. 2.2.2.4-6).*
Gelingt es nicht mit einer besonderen Technologie (Schliffherstellung, Schliffpräparation) bzw. angepassten Poliervorgängen die Kantenschärfe ausreichend zu gewährleisten, ist mit unbefriedigenden Befunden zu rechnen. Abhilfe bietet eine geeignete metallische Beschichtung (Ni-Schicht) vor der Schliffherstellung. Für ungeeignete Kantenpräparation typisch ist eine Unterschätzung von Schichtdicken oder nicht erkannten Fehlstellen.
Artefakte als Folge einer ungeeigneten Technik der Schliffentnahme *(Skizze unten rechts): Die Probenentnahme aus dem Bauteil für einen metallografischen Schliff nutzt unterschiedliche Trennverfahren. Häufig werden Trennmaschinen mit rotierenden Trennscheiben verwendet. Dabei besteht die Gefahr einer Überhitzung der Probe (z.B. Gefügeveränderung, Rissbildung) oder/und verfälschender*

Axel Rossmann - Turbocontrol
Lizenz mit Lösung

Faktenermittlung mikroskopische Untersuchungen

Das Rasterelektronenmikroskop (REM) liefert Bilder mit hervorragender Tiefenschärfe aus dem Mikrobereich.

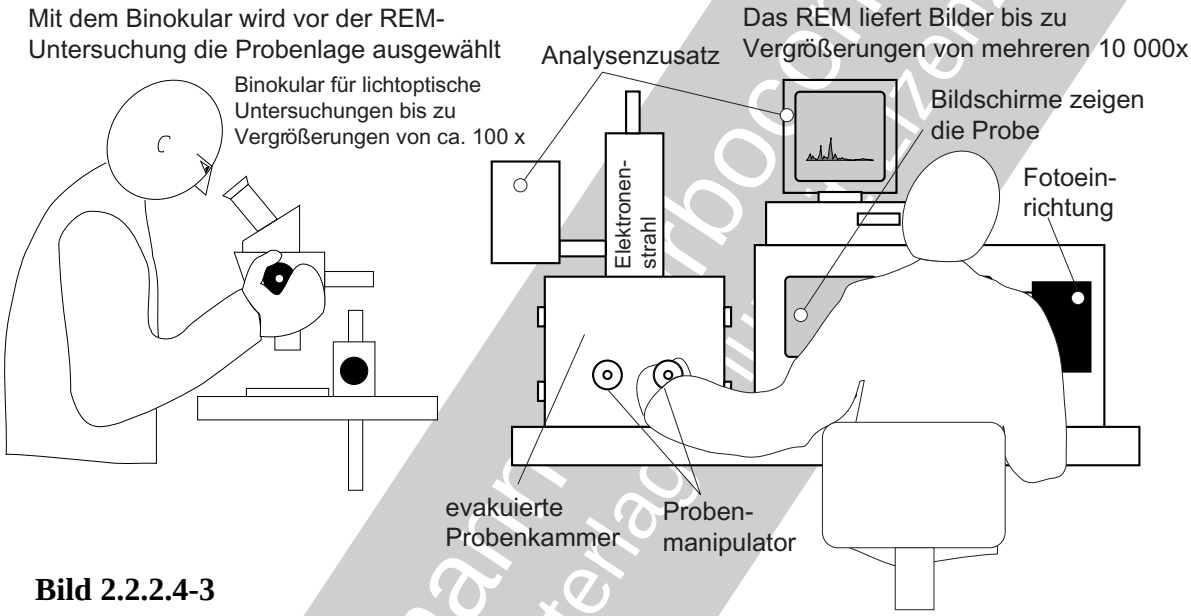


Bild 2.2.2.4-3

plastischer Verformung. Spröde Werkstoffe (z.B. Keramiken) und Schichten (z.B. Wärmedämmschichten, Al-Diffusionsschichten) neigen zur Rissbildung und zu Ausbrüchen. Werden diese Schädigungen am Schliff nicht von den folgenden Poliervorgängen entfernt, was leider durchaus möglich ist, sind Fehlinterpretationen vorprogrammiert.Verfälschend kann sich auch eine zu intensive Probenentnahme mit Hilfe von Funkenerosion (EDM) auf den Untersuchungsbefund auswirken. Werden die Folgen der verfahrensbedingten Überhitzung wie die wiedererstarrte Zone (Recast Layer) und spröde Rissbildung (Lit. 2.2.2-6) vom Poliervorgang nicht ausreichend entfernt, können Fehlstellen vorgetäuscht werden.

***Bild 2.2.2.4-3:** Das **Rasterelektronenmikroskop (REM**, engl. **Scanning Electron Microscope = SEM**, Lit. 2.2.2.4-1 und Lit. 2.2.2.4-3) ist ein unverzichtbares Werkzeug der Untersuchung von Bauteiloberflächen und Brüchen. Für den Auftraggeber hat es die Eigenschaften eines Binokulars mit dem Potenzial sehr hoher Vergrößerung (bis mehrere 10^4) und einer extremen Tiefenschärfe. Zusätzlich besteht die Möglichkeit von Analysen der Zusammensetzung im Mikrobereich. Damit ist beispielsweise die Identifikation schädigender Verunreinigungen (z.B. Oxide in Pulvermetall, Bild 4.1-4) möglich. Die REM-Untersuchung steht nicht, wie gelegentlich vermutet und entsprechend eingesetzt, in Konkurrenz zur Metallografie. Im Gegenteil können sich beide Verfahren in hervorragender Weise ergänzen. So lassen sich z.B Gefügebestandteile wie die γ'-Phase, die lichtoptisch nicht mehr zu erkennen sind, an einem metallografischen Schliff mit geeigneter Ätzung im REM auswerten. Umgekehrt lassen sich REM-Befunde nicht selten*

© Axel Rossmann Verbooom
als Schulungsunterlage für Lizenz

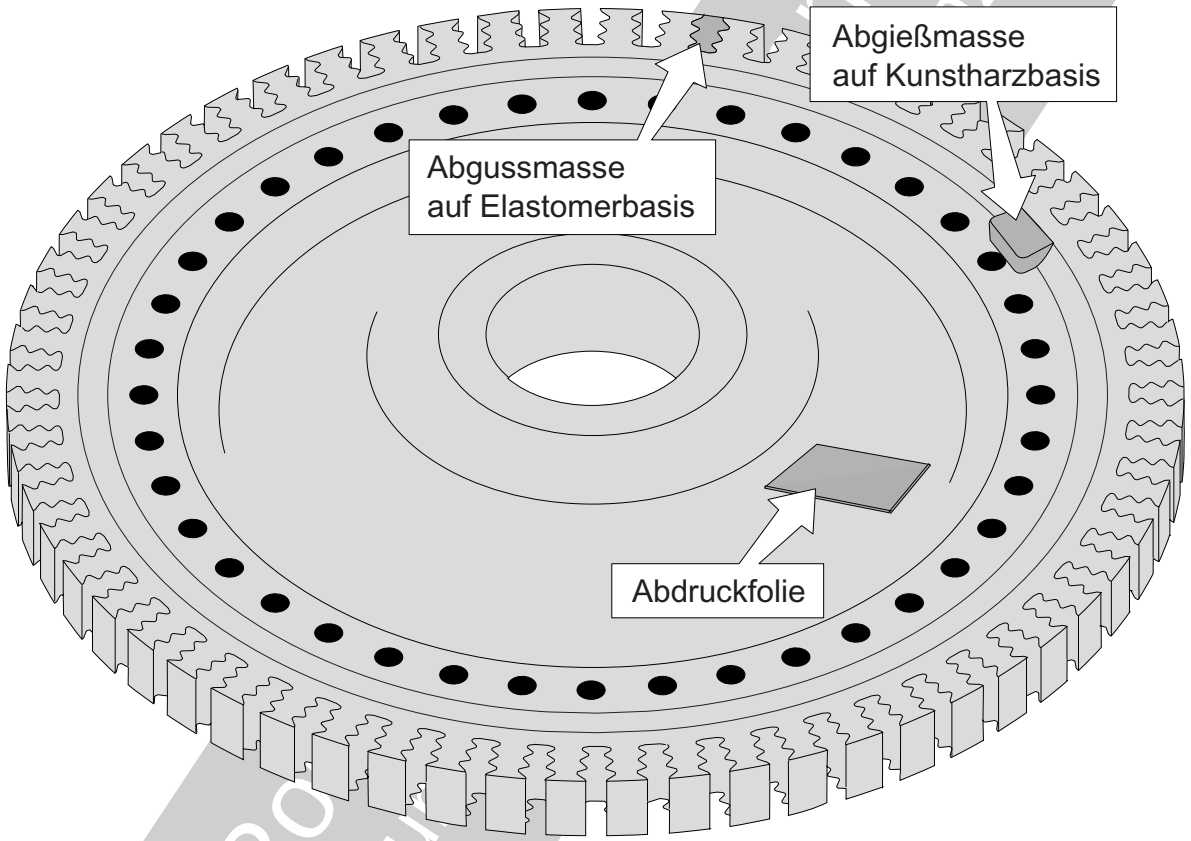
erst mit einem zusätzlichen metallografischen Schliff sicher erklären.
Für REM-Untersuchungen gilt mehr noch als für metallografische Untersuchungen (Bild 2.2.2.4-2) die Forderung einer engen Zusammenarbeit von Untersucher (Operator) und auf seinem Gebiet fachkundigem Auftraggeber. Gerade im Zusammenhang mit Problemen und Schäden ***ist eine maximale Erkenntnis erfahrungsgemäß nur zu erwarten, wenn der Auftraggeber der Untersuchung beiwohnt****. Die hervorragende räumlich wirkende Bildqualität ermöglicht auch dem nicht „REM-Fachkundigen" Betrachter einen realistischen Eindruck und die Einschätzung der Situation. Das schafft die Voraussetzung wichtige Hintergrundinformationen einzubringen, die erst während des Befunds in ihrer Bedeutung zu erkennen sind.*
REM-Untersuchungen können auch an ***Abdrücken*** *(Bild 2.2.2.4-4), soweit die Oberflächentopografie von Interesse ist, vorgenommen werden. Damit wird das Verfahren zerstörungsfrei.*

Bild 2.2.2.4-4: *Metallografische Untersuchungen und REM-Untersuchungen können zerstörungsfrei zur Anwendung kommen, wenn sich* ***Abdrücke vom Bauteil*** *herstellen und auswerten lassen. Für metallografische Untersuchungen, bei denen die Beurteilung des Gefüges im Vordergrund steht, erfolgt die* ***Schliffpräparation (Polieren, Ätzen) am Bauteil****. Das ist gewöhnlich schädigungsfrei möglich.*
Für REM-Untersuchungen wird üblicherweise die nicht präparierte, lediglich ausreichend gesäuberte Oberfläche abgeformt. Die nichtleitenden Abdrücke müssen dann für die Untersuchung durch Aufdampfen metallisiert werden. Dies ist bei REM-Untersuchungen ein Routinevorgang.
Drei Abdruckverfahren haben sich besonders bewährt:
Abdrücke mit Kunstharzen *die auf eine vorher geeignet begrenzte (Knetmasse) Bauteilzone aufgegossen und ausgehärtet werden. Diese* ***Kunstharzabdrücke*** *sind relativ hart und spröd und bei Formschluss nicht geeignet.*
Abdrücke lassen sich an komplex geformten Oberflächen herstellen. Voraussetzung ist jedoch, dass kein Formschluss, wie besondere Oberflächenrauigkeit oder Grate, die unbeschädigte Abnahme des Abdrucks verhindert. Dabei sollte eine Verschleißbewegung, welche die zu untersuchende Probenfläche im Mikrobereich beschädigen könnte, vermieden werden.
Muss der Abdruck in einem ***formschlüssigen Bauteilbereich*** *(z.B. Tannenbaumnut) erfolgen, bietet sich aushärtbares,* ***gummielastisches Elastomer*** *(meist Silikongummi) an. Nach dem Aushärten ist der Abdruck vorsichtig, unter Nutzung seiner Elastizität, abzulösen.*
Folienabdrücke *können überall dort angewendet werden, wo eine ausreichend plane Oberfläche zur Verfügung steht. Die käuflichen Kunststofffolien werden in einem mitgelieferten Lösungsmittel „eingeweicht" und auf die Bauteiloberfläche gedrückt, wo sie in kurzer Zeit aushärten. Danach erfolgt das Abziehen. Auf*

© Axel Rossmann - Tutorial
als Schulungsunterlage

Faktenermittlung mikroskopische Untersuchungen

Abdruckverfahren ermöglichen eine zerstörungsfreie mikroskopische Untersuchung.



2.2.2.4-4

diese Weise lassen sich auch feinste Strukturen, z.B. für Gefügeuntersuchungen, abnehmen. Abdruckverfahren haben sich für die ***Beurteilung von Abweichungen an wertvollen Bauteilen*** *bewährt. Mit ihnen lässt sich z.B. ein zweifelhafter Befund zerstörungsfreier Prüfverfahren wie Wirbelstromprüfung oder Eindringprüfung überprüfen, gegebenenfalls verifizieren.*

Bei ***Nacharbeiten im Bereich von Fehlstellen*** *lässt sich mit schrittweiser Überprüfung durch Abdrücke feststellen, ob die Schädigung restlos entfernt wurde. Beispiele sind kleine Anschmelzungen infolge Funkenbildung (Lit. 2.2.2.4-6) oder Beschädigungen im Zusammenhang mit Werkzeugbruch.*

Literatur 2.2.2.4

2.2.2.4-1 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden“, 2. Auflage ISBN 3-446-13416-6. 1982, Carl Hanser Verlag München Wien.

2.2.2.4-2 „Erscheinungsformen von Rissen und Brüchen metallischer Werkstoffe“, ISBN 3-514-00463-3 Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1997.

2.2.2.4-3 J.Grosch und Mitautoren, „Schadenskunde im Maschinenbau. Charakteristische Schadensursachen-Analyse und Aussagen von Schadensfällen“, Band 308 der Reihe ‘Kontakt & Studium Maschinenbau’, ISBN 3-8169-1202-8, Expert Verlag.

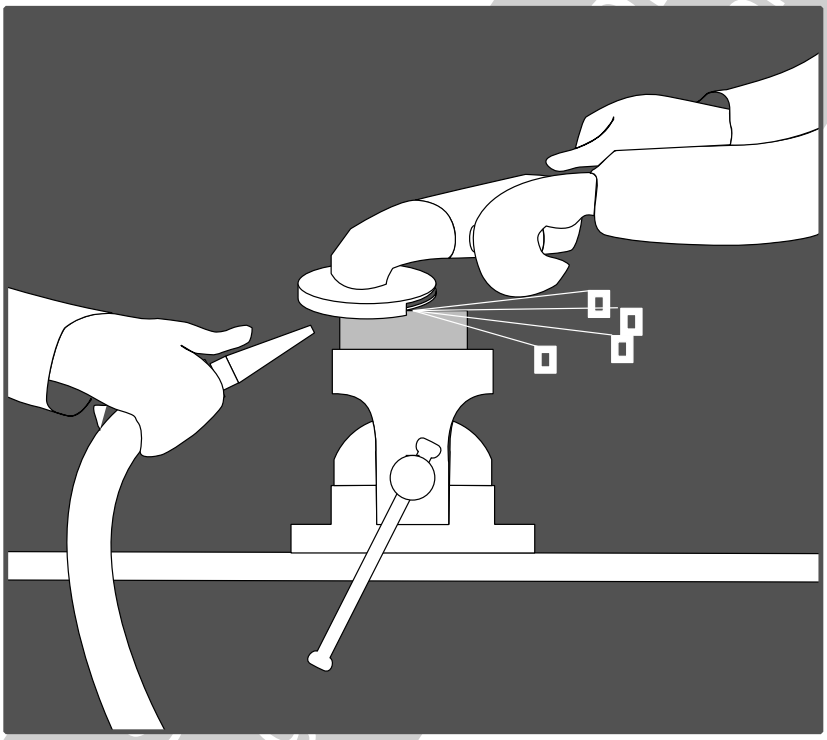
2.2.2.4-4 G..Lange, „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, 5. Edition, April 2001, ISBN 3-527-30417-7, Verlag Wiley-VCH, Weinheim.

2.2.2.4-5 H.Oettel, H.Schumann, „Metallografie“, ISBN 3-527-3067-9x, VCH Verlag GmbH, Oktober 2004.

2.2.2.4-6 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 4“, Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-017734-5, 2005, Seite 16.2.1.1-2, 16.2.1.1-9, 16.2.2.6-11, Kapitel 16.2.1.6 und Kapitel 16.2.1.2.

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

2.2.2.5 Reproduktion von Schäden



Unter der Reproduktion eines Schadens ist die Erzeugung eines gleichen Schadens wie im Betrieb mit definierten Versuchsbedingungen zu verstehen. Erst wenn es gelungen ist, den Schaden so zu simulieren, dass er **im Mikro- und Makrobereich dem Betriebsschaden gleicht**, kann von einer gelungenen Reproduktion gesprochen werden. Dies ist bei Schäden mit üblicherweise mehreren gleichzeitig einwirkenden, schadensbegünstigenden Einflüssen eine äußerst schwierig zu lösende Aufgabe.

Erstaunlicherweise muss ein erfolgreicher Versuchsaufbau erfahrungsgemäß nicht unbedingt genau dem Betrieb entsprechen. Zwar müssen die betroffenen Bauteile zumindest an den relevanten Schwachstellen dem Original entsprechen, die Betriebsbelastung kann jedoch durch einen abweichenden Aufbau simuliert werden. Das Erfolgskriterium ist wie bereits gesagt die ausreichend genaue Reproduktion des Schadens.

Die im Aufwand einfachste Form eines Reproduktionsversuchs ist die Simulation einzelner Einflüsse (Bild 2.2.2.5-1). Solche Versuche dienen z.B. zum Verständnis einzelner physikalischer oder chemischer Einflüsse und können deshalb in ihrer Betriebsnähe stark eingeschränkt sein.

Die Reproduktion von Schäden **ist ein entscheidender Schritt für das Verständnis** und, wenn sie gelingt, ein überzeugendes Argument. Da eine Reproduktion nie alle Betriebseinflüsse genau und betriebgetreu simulieren kann, ist die richtige Auswahl der zu berücksichtigenden Einflüsse und Prüfparameter neben einem geeigneten Versuchsaufbau Voraussetzung für den Erfolg. Für die Konzipierung solcher Versuche wird **langjährige Erfahrung** in der Triebwerks-und

Versuchstechnik und ein hohes Maß an „**Ingenieurgefühl**“ benötigt.

Eine erfolgreiche Reproduktion eines Betriebsschadens, z.B. durch Variation der Einflüsse und/oder Versuchsparameter liefert wichtige **Erkenntnisse für eine Risikoabschätzung** und ermöglicht die Erarbeitung von ausreichend sicheren Abhilfen sowie deren Erfolgsnachweis.

Auch für die Entwicklung und den **Tauglichkeitsnachweis von Reparaturen** sind Versuche, die auf eine gelungene Reproduktion zurückgehen, äußerst wichtig.

Ein weiterer Einsatzbereich des Reproduktionsversuchs ist die **Abschätzung von Schädigungen und Restlebensdauern**. So ist es z.B. üblich, Ermüdungsschädigungen an Rotorkomponenten auf Grund der Startzyklen in zyklischen Schleuderversuchen zu simulieren (Bild 4.4-3)

Nicht selten besteht der Zwang, Versuchszeiten zu minimieren um Risiken, Zeit und Kosten zu sparen. So stellt sich die Frage, ob sich ein Schaden mit Kriecheffekten, der sich im Betrieb über mehrere tausend Stunden entwickelt hat, in einem akzeptabelen kurzen Versuch von wenigen hundert Stunden ausreichend betriebsnah reproduzieren lässt. Die Erfahrung zeigt, dass eine Restlebensdauerabschätzung nur dann erfolgreich ist, wenn **der gleiche Schadensmechanismus wie im Betrieb** aktiviert wird. Entsteht z.B. im Betrieb über lange Zeit ein Riss unter Werkstoffveränderungen (z.B. Diffusionsvorgänge, Band 3 Bild 12.5-6) so müssen die Parameter zum Versuch zur Lebensdauerabschätzung so ausgewählt werden, dass sie diesen Schädigungsvorgang betriebsnah simulieren können. Im anderen Fall kann ein ungeeigneter Versuch Ergebnisse bringen, die keinerlei Schädigung erkennen lassen. Der Schädigungsmechanismus aus dem Betrieb läuft in einem solchen Fall nicht weiter ab, sonderen ein anderer Mechanismus wird aktiviert und für diesen Mechanismus verhält sich das Teil wie im Neuzustand.

Bei allen versuchstechnischen Nachweisen und Reproduktionen sollte man sich jedoch immer vor Augen halten, dass es letztendlich das Triebwerk ist (Beispiel 4.4-2) in dem es sich zeigen wird, ob unsere Versuchsergebnisse richtig waren, wir die richtigen Schlüsse gezogen und die richtigen Maßnahmen ergriffen haben. Noch immer gilt: **„The engine will tell us.“**

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

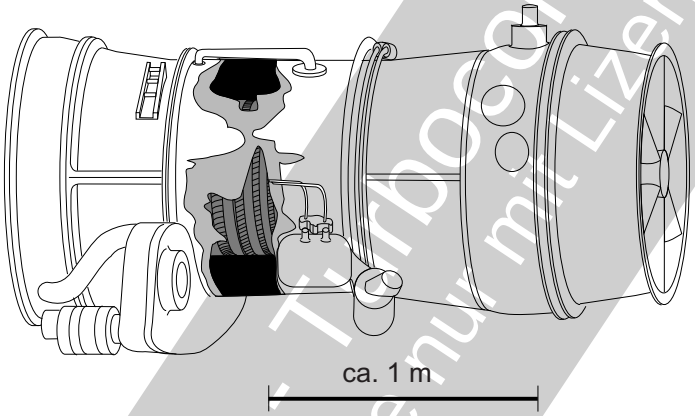
Bild 2.2.2.5-1: *Als junger Ingenieur in den 60 er-Jahren, wurde ich eines Tages zu einem Versuchsprüfstand gerufen, weil ein Triebwerk abgebrannt sei. Dass ein Triebwerk aus massivem Metall abbrennen könne, war für mich äußerst unverständlich. Am Prüfstand konnte ich mich jedoch davon überzeugen, dass der Verdichterbereich des Triebwerks alle Merkmale eines Brandes der metallischer Bauteile aufwies. Obwohl ich als Ingenieur wusste, dass z.B. beim autogenen Schneidprozess Stähle durch Zufuhr von Sauerstoff örtlich verbrannt werden, war mir nicht bewusst, dass im Luftstrom eines Verdichters massive Metallteile verbrennen können.*

So machte ich mich erst einmal in einem Chemiebuch schlau, dass Titan bei ausreichendem Sauerstoffangebot und Erreichen einer hohen Zündtemperatur brennt. Um die Vorgänge besser zu verstehen, nicht zuletzt zur Abschätzung des Risikos solcher Brände, konzipierte ich einen einfachen Reproduktionsversuch.

Ein dünnes Titanblech, das etwa einem der abgebrannten Schaufelblätter des Verdichters entsprach, wurde in einen Schraubstock eingespannt und mit einer Handschleifmaschine bearbeitet. Mein Kollege lenkte einen Luftstrahl aus einer Druckluftdüse auf die stark erhitzte Schleiffläche. Wir beobachteten die Bildung weißleuchtender Funken. Offenbar verbrannten die Zerspanungspartikel noch

Reproduktion von Schäden

Nicht selten geben einfache Demonstrationsversuche entscheidende Erkenntnisse.



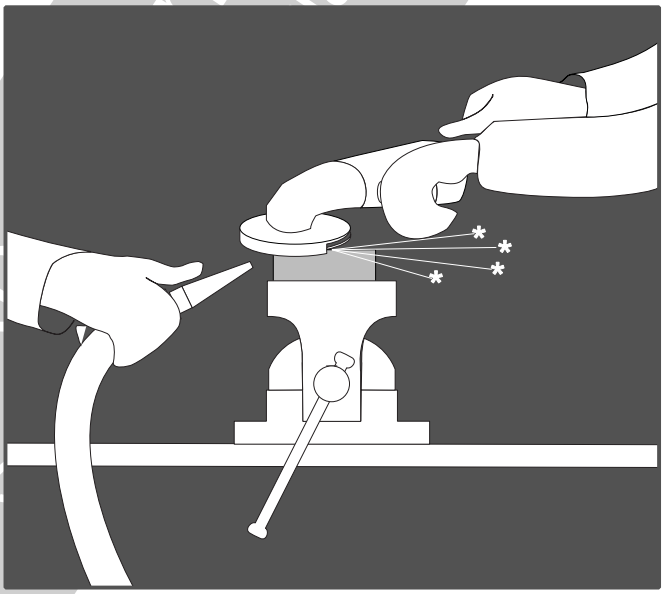


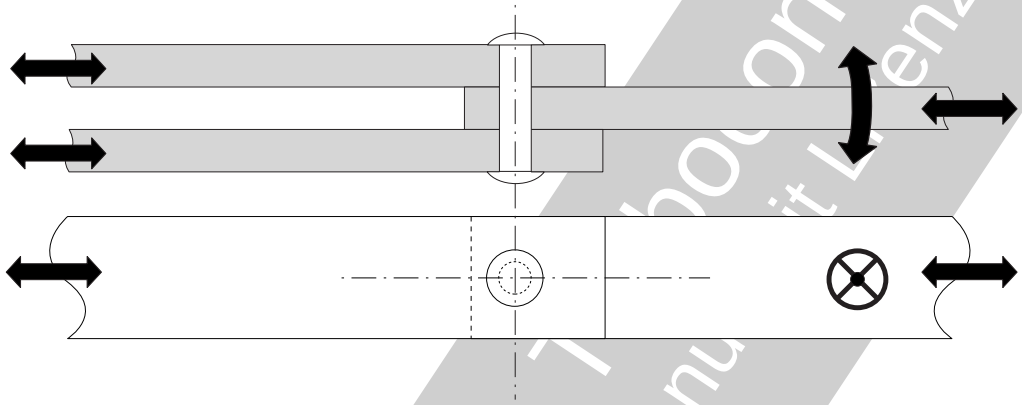
Bild 2.2.2.5-1

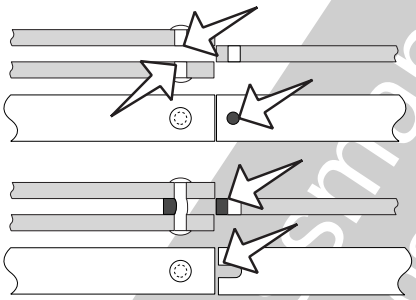
während ihres Fluges. Einen solchen Effekt kann man beim autogenen Schneidprozess an Stählen ebenfalls beobachten. Es war also möglich, durch einen Schleif- oder Anstreifvorgang Titan örtlich so zu erhitzen, dass die Zündtemperatur erreicht wird.

Mit dieser Erkenntnis waren wir in der Lage, die Schadensentstehung und den Schadensablauf einigermaßen zu verstehen. So erfolgte die Zündung, wie sich später herausstellte, durch einen Anstreifvorgang. Druck und Geschwindigkeit des Luftstroms im unbeschädigten Verdichter hatten anscheinend ausgereicht, das Feuer kurzfristig aufrecht zu erhalten.

© Axel Rohmann - Turboconsult
als Skript nur mit Lizenz

Abhängig von der Belastung können Bauteile sehr unterschiedliche Schwachstellen zeigen.

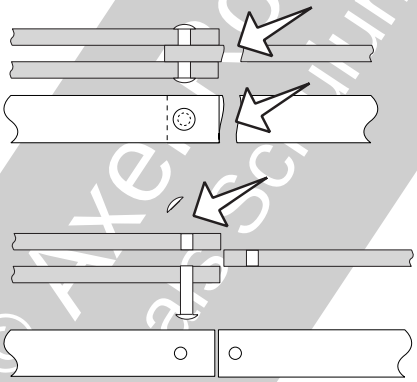




Versagen bei zügiger Überlastung

Abscheren des Niets

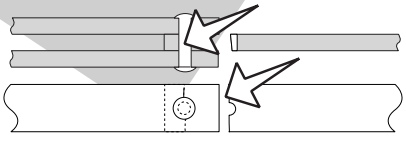
Ausreißen der Lasche



Versagen bei hoher dynamischer Beanspruchung

durch Bruch am Steifigkeitssprung

Schwingbruch am Nietkopf



Versagen bei niedriger dynamischer Last und Reibschädigung (Fretting)

Bild 2.2.2.5-2

© Axel Hoffmann - Technologie
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 2.2.2.5-2: *Je nachdem welche schädigenden Einflüsse bei der Prüfung wirksam werden, kann* ***der selbe Versuchsaufbau zu total unterschiedlichen Ergebnissen führen****. Es ist deshalb von entscheidender Bedeutung, dass* ***alle relevanten Einflüsse simuliert*** *werden, und die Belastungsparameter ausreichend betriebsnah sind. Besonders gefährlich sind Versuche, die höhere Festigkeiten oder eine längere Lebensdauer als im praktischen Betrieb vorgaukeln. Dagegen bedeuten Versuche, die „auf der sicheren Seite liegen“ zwar möglicherweise erhöhte Prüfzeiten und Prüfkosten, gefährden aber nicht die Funktion im Betrieb. Tritt z.B. während der mechanischen Belastung* ***Korrosion*** *auf, oder entsteht* ***Reibverschleiß*** *an den Kontaktflächen (Frettingzonen, Bild 5.9.3-6), oder wirkt bei Heißteilen statische Ermüdung (Zeitstand,* ***Kriechen****; Bild 5.3.2-4), so können abhängig von der Belastungszeit unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Ist z.B. die zyklische Belastung im Betrieb niedrigfrequent und der Versuch wird zur Prüfzeitabkürzung hochfrequent durchgeführt, so können sich bestimmte Einflüsse nicht (betriebsnah) auswirken. Diese Massnahmen können sowohl Einfluss auf die gemessenen Festigkeiten haben als auch die Versagensstellen verändern. Als Beispiel für die Abhängigkeit der ermittelten Festigkeiten, Lebensdauern und Schwachstellen in einem Bauteilversuch von den Versuchsparametern, soll eine Nietverbindung dienen. Die Verbindung sei durch eine Kombination aus Zug-Druck- und Wechselbiegung beansprucht.*

- Bei ***stetig zügiger Belastun****g ist je nach Dimensionierung ein Abscheren des Niets oder einem Ausreißen der mittleren Lasche zu erwarten.*

- Wenn man annimmt, dass bei ***hoher dynamischer Belastung*** *mit örtlich merklicher plastischer Verformung (im LCF-Bereich,Bild 5.4.1.1-2) noch keine gefährliche Verschleißschädigung an den Kontaktflächen auftritt, dürfte ein Bruch am Steifigkeitssprung oder ein Abplatzen des Nietkopfes infolge eines* ***Schwingbruchs*** *eintreten .*

- Bei ***niedriger dynamischer aber hochfrequenter Beanspruchung****, unterhalb der Dauerfestigkeit des ungeschädigten Werkstoffes, ist bei einer* ***Reibschädigung*** *mit einem Bruch, ausgehend von der Nietbohrung, zu rechnen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 2.2.2.5-3: *Standardprüfaufbauten der Triebwerkstechnik sind die sog.* ***Schleuderstände****. In diesen, gewöhnlich zur Minimierung der Antriebsleistung, evakuierten Gefäßen werden Rotoren oder Rotorkomponenten auf Prüfdrehzahlen gebracht. Die Versuche können statisch durch einmaliges Hochfahren (z.B. bei Überdrehzahlversuchen) oder zyklisch (z.B. bei LCF-Lebensdauerversuchen) durchgeführt werden.*

Aus Erfahrung weiß man, dass nur betriebsnahe Parameter zu brauchbaren Ergebnissen führen. So hat sich bei Titanlegierungen gezeigt, dass bei zyklischen Versuchen im Bereich der Betriebstemperaturen die Drehzahlspitzen eine ausreichende Zeit (einige Minuten) lang gehalten werden müssen (Haltezeit = ***„Dwell-time****"Bild 5.4-12 und Bild 5.4-13 und Band 3*)), um die tatsächlich relativ kurzen Lebensdauern eines Schadens im praktischen Betrieb zu simulieren.*

Um ausreichend aussagefähige Ergebnisse zu erhalten, ist es unabdingbar, dass der Prüfling in Werkstoff und Bearbeitung, gegebenenfalls auch in den Fehlern, mit dem Betriebsteil nahezu identisch ist. So ist z.B. ein Versuch zumindest suspekt, bei dem Scheiben getestet werden, die nach einem anderen ***Erschmelzungsverfahren*** *(Band 3*) oder nach einem anderen* ***Schmiedeverfahren*** *(Band 3*) hergestellt werden, als die im Betrieb befindlichen Originalteile.*

Andererseits sind vergleichende Versuche mit gleichen Aufbauten und Versuchsparametern sinnvoll, um Bauteile mit Änderungen zuzulassen.

Bei Bauteilen wie Turbinenscheiben, die im Triebwerk merkliche ***Temperaturgradienten*** *aufweisen sind die Wärmespannungen zu berücksichtigen (Bild 5.4.2.1-2). Zyklische Schleuderversuche mit überlagerten betriebsnahen Temperaturgradienten gehören zur „hohen Kunst" der Prüftechnik. Gewöhnlich gelingt es nur, einen stationären Temperaturgradienten der zyklisch rotierenden Scheibe zu überlagern. Eine Simulation der veränderlichen Gradienten des instationären Betriebs (z.B. Start, Abstellen) scheitert gewöhnlich daran, dass die Wärme im Vakuum nicht ausreichend schnell aus der Scheibe abgeführt werden kann.*

*) Veröffentlichung voraussichtlich 2014

Beispiel 2.2.2.5-1 (Bild 2.2.2.5-3, Lit. 2.2.2.5-1): An einem Hubschraubertriebwerk trat im Betrieb nach ca. 6500 Starts der Bruch des Turbinenrads der 1. Stufe vom Gaserzeuger auf. Mehrere gelaufene Scheiben anderer Triebwerke des gleichen Typs zeigten bei der Überprüfung kleine Risse im vorderen Übergangsradius zum Nabenansatz. Es wurde im Schleuderstand mit einem **zyklischen Schleuderversuc**h (im **LCF-Bereich**) versucht, den Schaden zu simulieren und zusätzlich mittels Computerrechnungen die Beanspruchung zu ermitteln. Die Prüfung erfolgte bei **Raumtemperatur** (!), obwohl das Bauteil mit Sicherheit im Betrieb hohen Temperaturgradienten ausgesetzt ist. Die Drehzahlspitze wurde 20 % über der 100% Betriebsdrehzahl gewählt, was eine um 44% höhere Prüfspannung gegenüber der Betriebsspannung (ohne Wärmespannungen!) entsprach.

Die Versuche erfolgten an drei Turbinenrädern die bereits im Betrieb zwischen 5000 und 7000 Starts erfahren hatten. Zwei der Räder wiesen bereits kleine Risse im Übergangsradius auf. Damit lag die Annahme eine Vorschädigung im kritischen Bereich nahe. Bei den Schleuderversuchen zeigten zwei der drei getesteten Turbinenscheiben ein vom Triebwerksbetrieb abweichendes Schadensverhalten. In diesen beiden Fällen gingen die zum Bruch führenden Risse von den kühlluftführenden Verschraubungsbohrungen zur Dichtplatte in der Scheibenmembrane aus. Die 3 D-Rechnung zeigte, dass diese Bohrungen sowohl im Versuch als auch im Betrieb hoch überlastet sind. Trotzdem erfolgte der Betriebsbruch im Nabenradius.

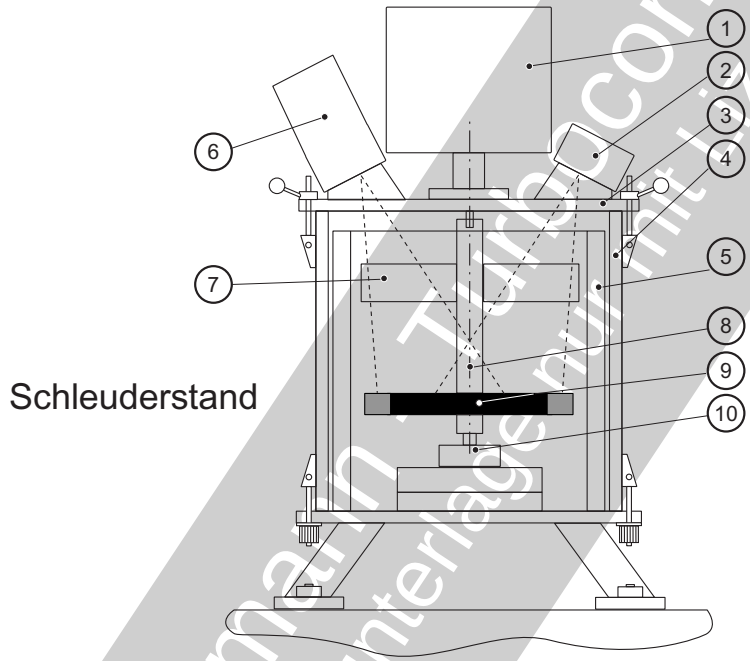
In der Literatur wird die Vermutung aus-

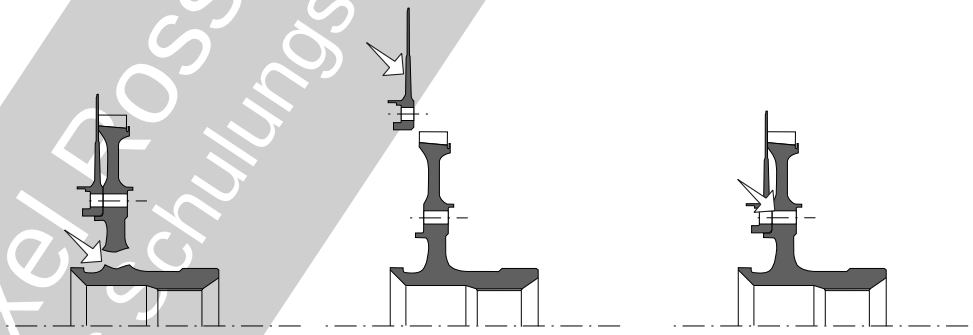
Fortsetzung im Rahmen auf Seite 2.2.2.5-7

© Axel Kossmann - Turbopensum
alle Rechte unterliegen
Lizenz

Reproduktion von Schäden

Einen Betriebsbruch im Schleuderstand zu reproduzieren, ist oft äußerst schwierig.





Bruch im Übergangsradius (Betriebsbruch dessen Reproduktion im zyklischen Schleuderversuch nicht gelungen ist).

Bruch der Dichtungsplatte (zykl. Schleuderversuch 1).

Bruch der Bolzenbohrung (zykl. Schleuderversuch 2).

Bild 2.2.2.5-3

© Axel Rossmann - Tübingen
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fortsetzung von Beispiel 2.2.2.5-1

gesprochen, dass die Verfälschung auf Grund einer Stützwirkung infolge des hohen Spannungsgradienten um die Bohrung auftrat. Dies mag einer der entscheidenden Einflüsse gewesen sein; es liegt jedoch nahe zu vermuten, dass sowohl die für die Rechnung angenommenen Betriebsdaten als auch die Prüfung bei Raumtemperatur zu weit entfernt von der Realität der Betriebsbeanspruchungen lagen.

Zitat: „The lesson learned here is the knowledge that the evidence of a spin rig test is limited if the actual part is sensitive to the thermal gradients of the engine environment.“

Demonstrationsversuch für ein Zwischenwellen-Ölfeuer

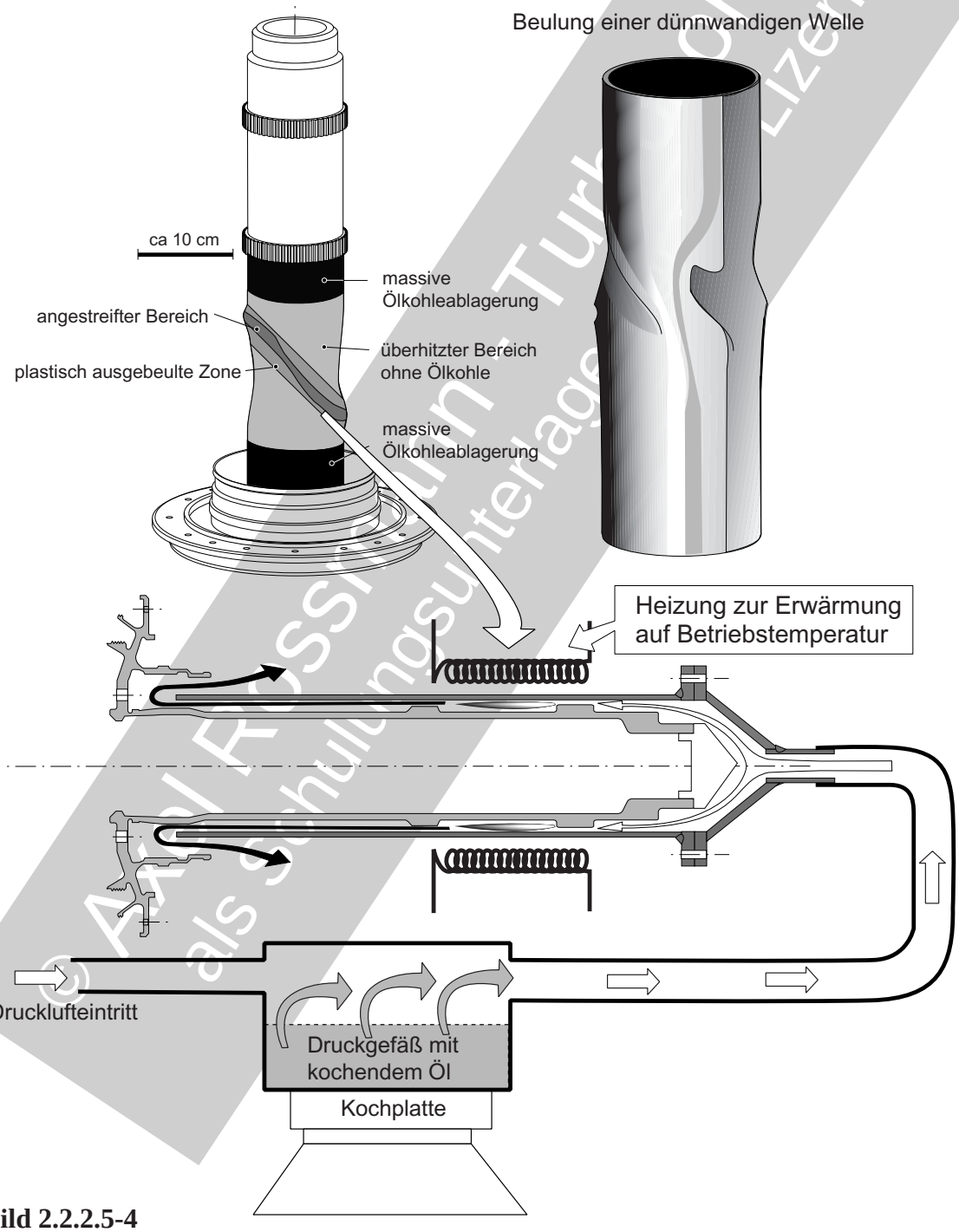


Bild 2.2.2.5-4

© Axel Rossmann - Turbokonsult
als Schulungsunterlage - Lizenz

Bild 2.2.2.5-4: *In einem mehrwelligen Triebwerk eines zweistrahligen Kampfflugzeugs traten während eines Erprobungsflugs mit hoher Geschwindigkeit in niedriger Höhe starke Vibrationen auf, die zum Abschalten des betroffenen Mehrwellentriebwerks führten. Die Demontage des Triebwerks mit drei konzentrischen Hohlwellensträngen ergab, dass eine innen laufende Welle offenbar im Betrieb extrem überhitzt wurde. Die* ***Welle zeigte eine plastische Verformung*** *die einen* ***spiralförmig umlaufenden Wulst*** *bildete. Starke Ölkohleablagerungen in der Welle deuteten auf ein Ölfeuer hin. Die Mehrheit der involvierten Experten vermutete, dass die Ursache für die Aufheizung des Wellenschafts und der Verformungswulst die Folge eines Anstreifvorgangs der Welle im Zusammenhang mit extremen Biegeschwingungen war. Wie sich ebenfalls herausstellte, fehlten nach dem Flug mehrere Liter Öl, was aber auf ein Ölleck als Folge des Schadens zurückgeführt wurde. Die Möglichkeit eines* ***Ölfeuers*** *(Band 2 Kapitel 7.1.4) wurde ebenfalls erwogen, jedoch als wenig wahrscheinlich eingeschätzt. Es war z.B. nicht plausibel, warum überhaupt ein „****Zwischenwellenfeuer****“ möglich war, und wie es sich gegebenenfalls im fraglichen Bereich stabilisieren konnte.*

Ein sehr erfahrener Prüfingenieur erstellte innerhalb weniger Stunden einen Prüfaufbau der trotz seiner Einfachheit die Vorgänge überzeugend demonstrierte. Er ordnete die Wellen wie im Betrieb konzentrisch zueinander jedoch nicht rotirend an, erhitzte auf einer Kochplatte das Triebwerksöl (richtiger Öltyp) in einem Gefäß, durch das er heiße Druckluft, entsprechend den Bedingungen im Triebwerk, leitete. Die ***öldampfführende Heißluft*** *wurde durch einen Rohranschluss in den Ringraum zwischen die Wellen geführt und diese auf Betriebstemperatur gebracht. Es gelang unter der Simulation extremer Betriebsbedingungen das Öl-Luftgemisch zu zünden. Wie sich schnell zeigte, wirkte ein ringförmiger Wuchtbund in der Welle als „****Flammhalter****“ und stabilisierte die Ölflamme so, dass der Wellenschaft in Bruchteilen einer Minute derart aufgeheizt wurde, dass er sich unter dem, zwischen Turbine und Verdichter zu übertragenden Torsionsmoment, vergleichbar mit dem Betriebsschaden plastisch verformte.*

Der Versuch ergab weiter, dass unter diesen Betriebsbedingungen der Ölverlust von mehreren Litern in Minutenschnelle bei einem starken Ölfeuer durchaus realistisch ist.

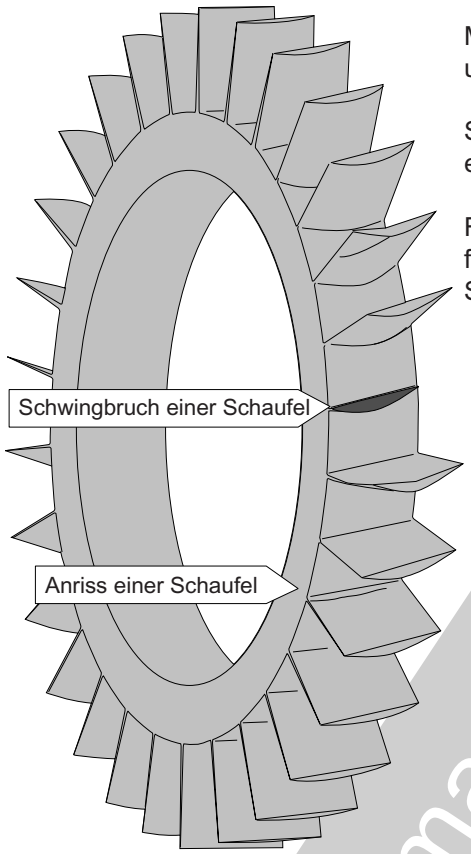
Spätere Messungen an anderen Erprobungstriebwerken bestätigten diese Beobachtungen und Schlussfolgerungen.

Bild 2.2.2.5-5: *Bei einem Kampfflugzeug brach das Nachbrennerrohr während des Startvorgangs ab. Die Schubdüse mit dem Reststück des Nachbrenners wurde nur noch durch die vier Betätigungsstangen der Schubdüsenverstellung gehalten. Der Start konnte erfolgreich abgebrochen werden.*

Eine Untersuchung ergab, dass es sich bei dem Bruch in dem ca. 1 mm starken Mantelblech wahrscheinlich um einen Schwingbruch handelt, der von Sicken für die Betätigungsstangen ausging. Das rechtzeitige Auffinden der Risse durch eine zerstörungsfreie Prüfung im eingebauten Zustand war kaum möglich, da der Riss relativ lang auf der Innenseite des Rohrs in einer konstruktionsbedingten Kerbe verlief. Nicht klar war, inwieweit zyklische und statische Wärmespannungen bei der Nachbrennerzündung und dem Nachbrennerbetrieb eine Rolle spielten. Auch war unklar, ob ein HCF-Bruch oder ein LCF-Bruch vorlag. Als Arbeitshypothese wurde angenommen, dass die Kräfte der Schubstangen sich über das Rohr abstützt und zu der Rißssbildung führten. Aufgabe eines Bauteilversuchs sollte es sein, den Betriebsschaden in allen typischen Makro- und Mikromerkmalen zu reproduzieren, um die Schadenshypothese zu überprüfen und eine weitere Klärung der ursächlichen Einflüsse und Belastungen zu finden.

Es wurden zwei Versuchsaufbauten erstellt. Ein Aufbau berücksichtigte die Arbeitshypothese, dass die Belastung durch die Schubstangen-

© Wolf Rosenberger - Turbocontrol
Absaugung nur mit Lizenz



Mögliche Ursachen für Blattbruch und Blattanriss

Schwingungsanregung durch eine Strömungsstörung?

Fremdkörpereinwirkung (FOD) als Ursache für Anrisskerbe und /oder anregende Strömungsablösung am Blatt?

Beispiel 2.2.2.5-2 (Lit. 2.2.2.5-4):

Zitat: „The core (of an advanced engine gas generator), which contained a number of advanced-technology features, failed....after about 6 hr. of runs at...test facilities.

...Inspection ot the ...core showed that one **blade was lost** from the second rotating stage of its five-stage, high-pressurerise compressor and that a second blade had become close to detatching before the tests were terminated. Inverstigators originally **believed** the failure might have been caused by ingestion of a **foreign object**, but teardown and inspection results have eliminated that suspicion. Instead, they are now focusing on „some type of **vibratory** action“ as a cause of failure....It sees that it could b a previously unknown type of **aerodynamic disturbance**...

The ...team is now **attempting to simulate the failure** ...

While no company likes failures, they are not uncommon with advanced turbine engine gas generator cores, and **each failure helps expand the knowledge base**, an official said...“

Kommentar: Dieses Beispiel zeigt wie wichtig eine **Erprobungen neuer Technologien** unter **echten Triebwerksbedingungen** ist. Weil es sich offenbar um einen sog. „Bling“ handelt (Skizze schematisch) , dem eine Dämpfung an den Schaufelfüßen fehlt, ist mit einer besonderen Anregungsempfindlichkeit zu rechnen.

Eine Untersuchung von Proben unter Laborbedingungen mag eine Voraussetzung für betriebsnahe Tests sein, sie ersetzt jedoch Tests an Turboprüfständen nicht, und diese wiederum nicht die Erprobung unter echten Betriebsbedingungen in Triebwerken. Im Fall des Bling ist die individuelle Anregungsstärke für den Einsatz entscheidend.

kräfte Ursache für die Rissbildung ist. Mit diesem Aufbau gelang es jedoch trotz großer Überlasten und vieler Bemühungen nicht, einen betriebsähnlichen Riss zu erzeugen.
*Ein zweiter Versuchsaufbau beruhte auf Überlegungen eines erfahrenen Versuchsingenieurs. Mit dem, für die Konzipierung erfolgreicher Bauteilversuche unverzichtbaren „Ingenieurgefühl“ entwickelte er die Hypothese, dass das Rohr durch wiederholte Verbiegung beim Kurvenflug und anderen g-Lasten (z.B. Landestoss) anreisst. Er entwarf einen Versuchsaufbau, bei dem das Nachbrennerrohr auf der „Triebwerksseite“ an einen Befestigungsbock („**B**“) geschraubt und auf der Gegenseite (Befestigungsflansch zum Triebwerk)*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Reproduktion von Schäden

Der Nachweis einer Schadenshypothese im Bauteilversuch ist die hohe Kunst der Schadensklärung und eine Voraussetzung für einen Abhilfenachweis.

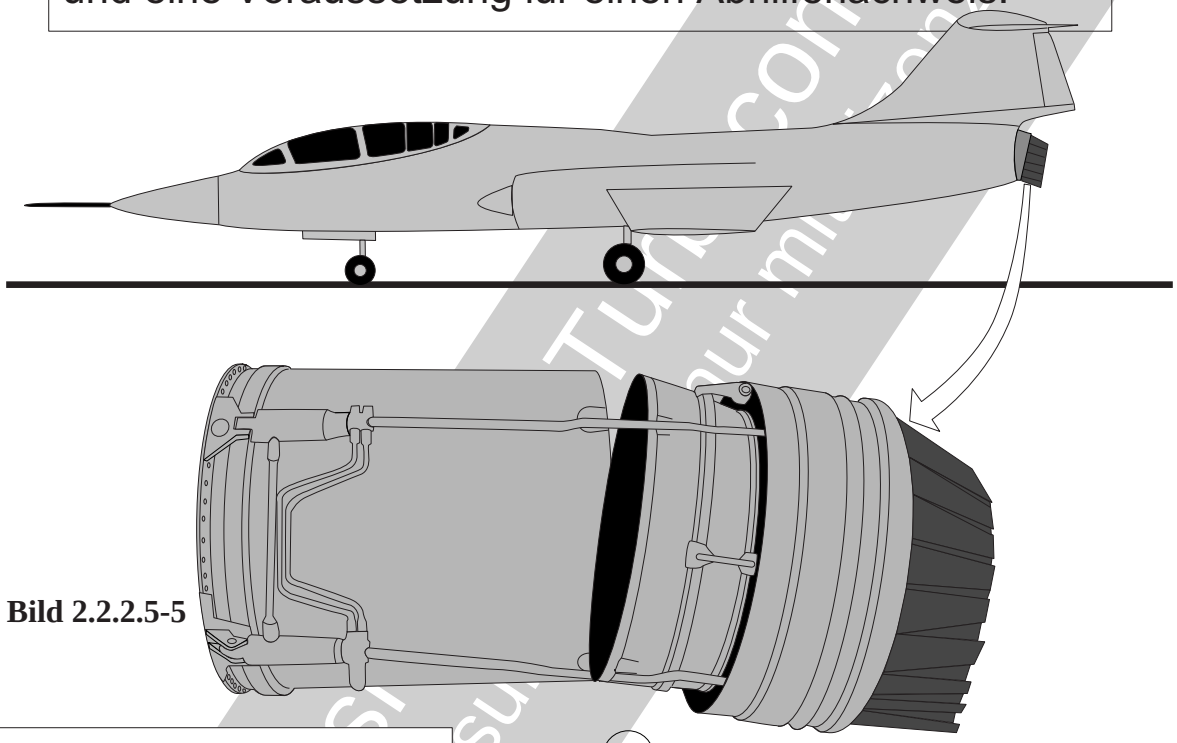
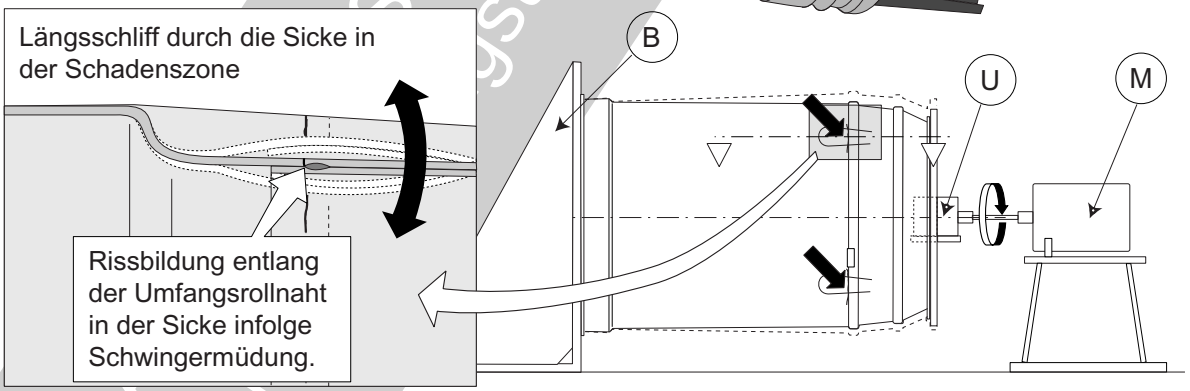


Bild 2.2.2.5-5



*konzentrisch in der Flanschebene ein mechanischer Unwuchterreger („**U**“) angebracht wurde. Mit dem Elektromotor „**M**“ konnte über die Drehzahl die Frequenz der Vibration eingestellt werden.*

*Es zeigte sich bei Beobachtung mit einem Stroboskop sofort, dass das Nachbrennerrohr eine umlaufende Biegeschwingung ausführte, bei der die **Sicken auf Grund ihrer Steifigkeit und besonderen Form im Anrissbereich starke Biegebeanspruchungen** erfahren. Damit war der Grund für die Anrissstelle erklärt und verstanden.*

Mit diesem Versuch war es nunmehr möglich Aussagen über die Rissausbreitung und den Einfluss konstruktiver und fertigungstechnischer Besonderheiten zu machen.

Dies ergab die Möglichkeit der Erprobung eines geeigneten Rissprüfverfahrens an eingebauten Triebwerken, sowie einer schnellen Entwicklung von Verbesserungen. Damit wurde die Voraussetzung für den Zulassungsnachweises der notwendigen Abhilfemassnahmen und Reparaturen geschaffen.

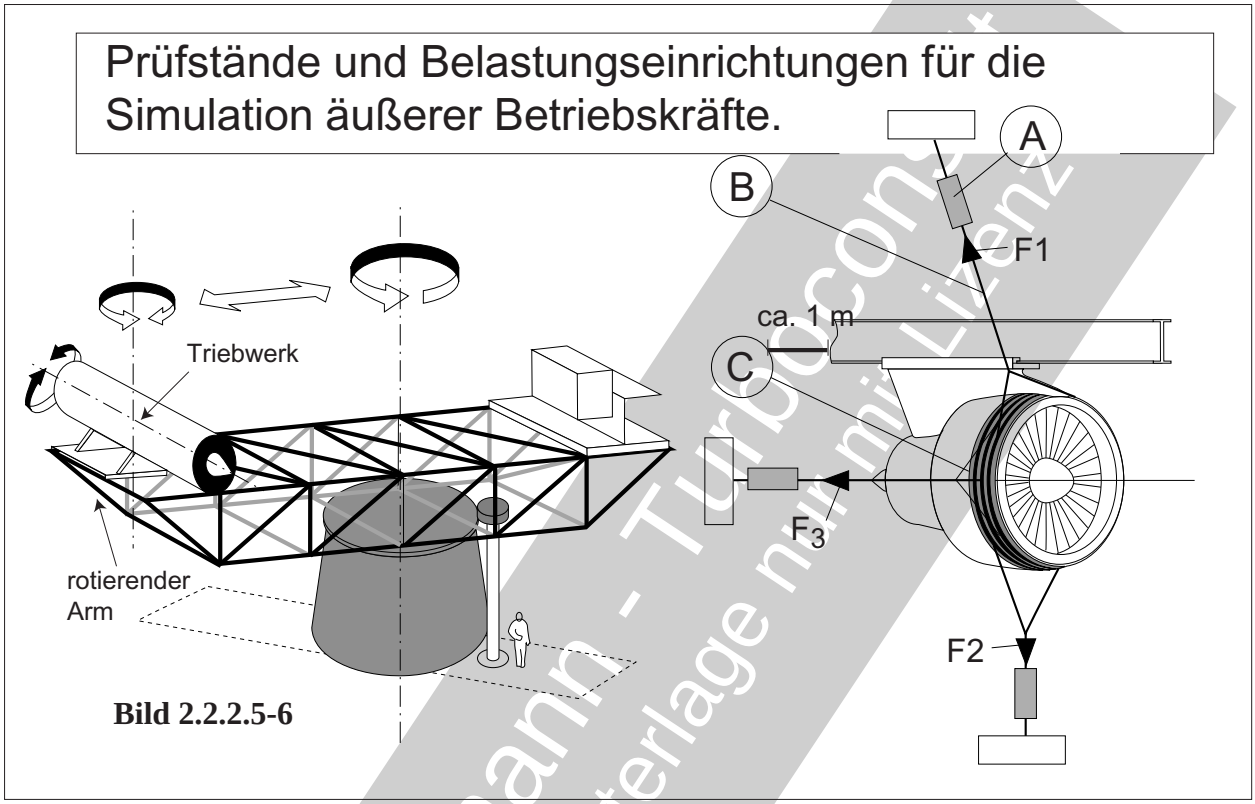


Bild 2.2.2.5-6

Bild 2.2.2.5-6: *In der oberen Skizze (Lit. 2.2.2.5-2) ist ein Prüfstandkonzept dargestellt, das die Prüfung zum Verhalten von Triebwerken unter hohen g-Lasten ermöglicht. Dadurch können unter anderem elastische Verformungen der Gehäuse und Rotoren und die davon beeinflussten Spaltänderungen an Schaufelspitzen und Labyrinthdichtungen untersucht werden.*

Dieses Beispiel soll zeigen, welcher versuchstechnische Aufwand für die Untersuchung wichtiger Triebwerksverhalten aufgebracht werden muss. Natürlich erfordert ein solcher Prüfstand eine längere Entwicklungs- und Erprobungszeit. Für einen Einzelschaden wird man in diesem Umfang wohl kaum Zeit und Kosten aufwenden. Der Prüfstand muss also bereits vorhanden sein, wenn er z.B. zur Reproduktion eines Schadens dienen soll. Fachleute sollten zumindest wissen, wie sie einen bereits vorhandenen geeigneten Prüfstand für ihr Problem finden können.

Die untere Skizze (Lit.2.2.2.5-2) zeigt eine Belastungsvorrichtung mit der Betriebskräfte auf die Gondel eines großen Fan-Triebwerks simuliert werden können. Dieses Beispiel demonstriert, wie durch einen relativ einfachen Aufbau erfolgreich versucht wird, Auswirkungen komplexer Betriebsbelastungen zu ermitteln.

*„**A**“ bezeichnet hydraulische Belastungszylinder, die über die Seile „**B**“ das Fan -Gehäuse „**C**“ mit den simulierten Betriebslasten (z.B. aerodynamische Lasten auf die Gondel, oder Landestöße) beaufschlagen. Mit einem solchen Aufbau versucht man, die elastischen Verformungen des Triebwerks und seiner Komponenten zu ermitteln, bzw. mit Berechnungen zu vergleichen, um dann Optimierungen durchführen zu können. Hierfür ist genaue Kenntnis der Belastungen in Größe und Richtung Voraussetzung.*

© Axel Rossmann - Turbocons
Diese Unterlage nur mit Lizenz

Empfehlungen zur Reproduktion von Schäden

Die Reproduktion von Schäden ist auf Grund der Komplexität vieler Betriebsvorgänge (z.B. Korrosion, Verschleiß, Erosion) eine „hohe Kunst“ und setzt überdurchschnittliches „Ingenieurgefühl“ und Erfahrung voraus. Sie ist ein wichtiger Wahrheitsbeweis und die Voraussetzung für die Verifikation des Erfolgs von Abhilfen.

• Beauftragen Sie mit diesen Arbeiten nach Möglichkeit nur jemanden, der bereits in anderen Fällen erfolgreiche Reproduktionen durchgeführt hat.

•Seien Sie sich klar darüber, dass in den seltensten Fällen eine befriedigende Reproduktion beim ersten Versuch gelingt! Iterative, zeitintensive Abläufe sind die Regel.

• Eine gelungene Rekonstruktion führt zu einem Schadensbild, das in allen relevanten makroskopischen und mikroskopischen Befunden mit dem Original übereinstimmt. Abweichungen vom Original zeigen eine (noch) ungenügende Reproduktion an.

• Setzen Sie den Versuchsaufbau zur Reproduktion in Einflüssen und Parametern so betriebsnah wie möglich an! Denken Sie daran, dass z.B. ein verkürzter Versuch eine erhöhte Belastung oder eine erhöhte Prüffrequenz (besonders bei Heißteilen) zu anderen Schadensmechanismen führen können und trotz gewissen Ähnlichkeiten (z.B. Bruchlage) keine brauchbare Rekonstruktion ergeben (Bild 2.2.2.5-2). Dies gilt in besonderem Maß bei der Bestimmung des Schädigungsgrads bzw. der Restlebensdauer.

© Axel Rossmann - Turbocon Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 2.2.2.5

2.2.2.5-1 U. Hessler, R.B. Domes, „LCF-Failure Analysis of an Aero-engine Turbine Wheel“, Proceedings of the „Third International Conference on Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials“, Berlin, 7-11 September 1992 Seite 665-668.

2.2.2.5-2 G.M. Mulenburg, J.G. Mitchell, „Simulation of Turbine Operational Loads“, AiAA/SAE 13 th Propulsion Conference, Orlando, July 11-13, 1977, Paper 77-912, Seite 6 und 7.

2.2.2.5-3 E.G. Stakolich, W.J. Stromberg, „JT9D Performance Deterioration Results from a Simulated Aerodynamic Load-Test“, AIAA-81-1588, AIAA/SAE/ASME 17th Joint Propulsion Conference, July 27-29. 1981, Colorado Springs Seite 1-14.

2.2.2.5-4 S.W. Kandebo, „GE and Allison Probe Core Engine Failure“, Zeitschrift „Aviation Week&Space Technology“, May 17, 1999, Seite 30.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2.3 Risikoabschätzung

Mit einer **Risikoabschätzung** muss jeder, technische Verantwotung Tragende im Berufsleben rechnen. Sie wird im Zusammenhang mit Maschinenelementen dann notwendig wenn es zum Ausfall kommen kann. Das erfordert nachvollziehbare Entscheidungen. Nicht selten handelt es sich um von Vorschriften festgelegte vorbeugende Maßnahmen wie **Rückrufaktionen**, die Information von Behörden, der Öffentlichkeit oder Kontroll-/Überwachungsmaßnahmen von Maschinen und Anlagen. Der notwendige Bewertungsmaßstab, im Beispiel in Form einer **Matrix aus Wahrscheinlichkeit und Folgen** (Bild 2.3-2, Lit. 2.3-4) ist gewöhnlich in Verträgen und/oder Vorschriften festgelegt. Anderenfalls muss der Maßstab (Matrix in Bild 2.3-2) auf Grund von Erfahrungen und Abschätzungen nach internen Vorgaben und Prioritäten selbst erarbeitet werden.

.

Es giltt: **Risiko = Häufigkeit (Eintrittswahrscheinlichkeit) x Auswirkung (Schadenausmaß)**

Die Bestimmung der **Eintrittswahrscheinlichkeit** bzw. **Ausfallwahrscheinlichkeiten** eines Maschinenelements bzw. einer Maschine oder Anlage über der Betriebszeit erfordert ausreichend Erfahrung. Diese kann mit Hilfe verschiedener Ansätze wie Versuchen und ausgewertetes Betriebsverhalten abgeschätzt werden (kein Anspruch auf Vollständigkeit):

- **Auslegung**, z.B. Ausfallwahrscheinlichkeit von Wälzlagern entsprechend Katalog.
- **Erfahrungen** und Ergebnisse aus der **Erprobung** in der **Entwicklung**.
- **Erfahrungen im Betrieb** mit dem Maschinenelement.in vergleichbaren Anwendungen und Betriebseinflüssen (z.B. Bild 3.3-3.1).
- **Zahl und Nutzung** der eingesetzten Teile.

Um die **Auswirkungen** eines Schadens werden von Faktoren wie Sicherheit, Kosten, Gefahren, Prestige bestimmtab. Sie zuschätzen ist in Fällen mit erkennbar großer Tragweite einem Gremium/Team vorbehalten. Diesem wird. Die Auswahl der Teilnehmer ist von nicht zu unterschätzender Bedeutung und nicht einfach. Es besteht das Dilemma, dass einerseits für die Technik verantwortliche Fachleute (z.B. aus Entwicklung und Konstruktion) erforderlich sind. Andrerseits die Schwachstellen und Versagensabläufe möglichst kritisch und vorurteilsfrei dargestellt werden müssen (Bild 2.2.1-4).

Dazu sind erforderlich:
- Überlegungen **gegenseitiger Beeinflussung der Komponenten** einer Maschine (Bild 3.3-2.1.1).
- Zu erwartende **Folgeschäden** an der Einzelmaschine und gegebenenfalls der Anlage in Abhängigkeit von der Zahl im Einsatz befindlichen Anzahl.
- Möglichkeiten eines **frühzeitigen Erkennens** und **Überwachung** (Bild 3.3-2.1.3, Bild 3.3-2.2 und Bild 3.3-4).

In diesem Kapitel wird versucht am Beispiel der **Vorgehensweise** bei militärischen Flugtriebwerken eine **technischen Risikoanalyse** aufzuzeigen. Es ist davon auszugehen, dass für bestimmte Anwenduungsfälle wie Kernkraftwerke oder Kraftfahrzeuge eigene Systematiken bestehen und gegebenenfalls zu befolgen sind. Die hier gezeigten Grundüberlegungen dürften jedoch eine gewisse Allgemeingültigkeit haben.

In den weitaus meisten Fällen ist die Zuverlässigkeit einer solchen Risikoabschätzung entscheidend von der **Erfahrung und Expertise** der daran Beteiligten abhängig. Dazu gehört ein erheblicher Teil '**schwarzer**' **Kreativität** um mögliche, realistische unerwünschte/gefährliche Situationen zu erarbeiten. Dabei ist das '**Ingenieurgefühl**' ('Bauchdenken') erfahrungsgemäß von großer Bedeutung. Panik und der Wunsch nach absoluter Sicherheit sowie äußere fachunkundige Einwirkung sind keine guten Ratgeber. Absolute Sicherheit gibt es nicht! Besonders bei Sicherheitsrelevanz ist es zur Vermeidung grober Fahrlässigkeit (strafbar) wichtig den „**Stand der Technik**" zu berücksichtigen. Dieser wird von allen frei zugänglichen Veröffentlichgungen /Literartur bestimmt. Das kann auch fremdsprachige Literatur betreffen. Aus diesem Grund sind **nicht technisch motivierte Entscheidungen** (Firmenpolitik) zumindest für eine Interne Risikoabschätzung eher riskant und **von den für die Analyse fachlich Verantwortlichen abzulehnen**.

Es wird sich zeigen, dass die Zahlen in der Beurteilungsmatrix lediglich der Übersichtlichkeit dienen. Eine mathematische Aussage haben sie nicht, obwohl dies bei flüchtiger Betrachtung so erscheinen mag (Bild 2.3-2). Zunächst ist es erforderlich die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls/Schadens und die die Auswirkungen der Folgen zu benennen. Dazu sollten üblicherweise in der Technik verwendete, definierte **Begriffe** in Deutsch und Englisch dienen (Bild 2.3-1). Sie finden umgangssprachlich lediglich eine 'diffuse' Beschreibung.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Vorbeugende Risikominimierung:

Risiken aus der **Produkthaftung** und **Entwicklungsrisiken** lassen sich bereits früh in einem Projekt minimieren.

Entscheidend sind Zusagen, Garantien und Verträge unter Berücksichtigung des **Stands der Technik**. Dabei kommt es auf jedes Detail an. Die Technik sollte Basis juristischer Ausgestaltung sein. Erforderlich sind:

- Möglichst genaue Definition der Produkteigenschaften in Zusammenarbeit mit Kunden und gegebenenfalls Behörden.
  Der entsprechende Vertrag sollte beispielsweise auch den Nachweis dieser Eigenschaften, z.B. in genau spezifizierten Abnahmeläufen, festlegen. Dabei können scheinbare 'Nebensächlichkeiten' von großer Bedeutung sein.

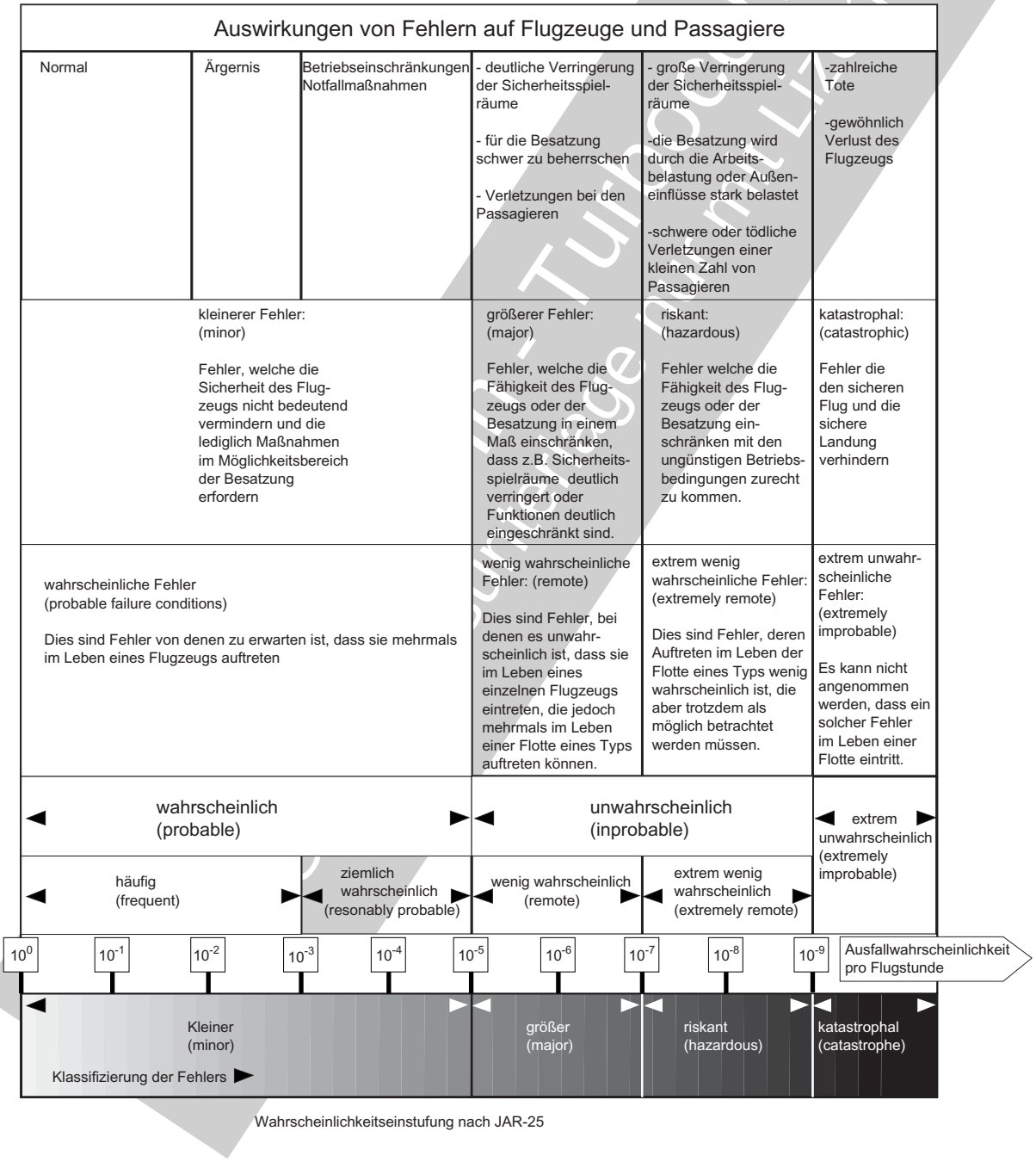
Beispiel: Für militärische Flugtriebwerke ist die 'Vogelschlagresistenz' in Versuchen nachzuweisen. Dabei Das Risiko eines unzulässigen Schadens durch Versagen der Verdichterbeschaufelung minimiert sich entscheidend wenn man bei einem Kampfflugzeug den Einlauf in die Betrachtungen einbezieht. Dazu dient im Abnahme-/Nachweisversuch eine 'Prallplatte'. Hier zerspritzt der Vogel bei der typisch hohen Aufprallgeschwindigkeit (Fluggeschwindigkeit). Das verhindert gefährlich große Fremdkörper.

- Vertragliche Quantifizierung der Risiken und gegebenenfalls erforderlichre Aktionen (Bild 2.3-2). Dazu gehören Festlegungen der Schwellen einer Meldepflicht oder Rückrufs.

- Erfahrung mit der Technik unter den vorgesehenen und spezifizierten Betriebsbedingungen und allen schadensrelevanten Einflüssen. Zu berücksichtigen sind Wartung, Überwachung und Inspektionen.
- Anwendungsbezogene Ausfallstatistiken erarbeiten.
- Kenntnis der Vorschriften und Gesetzeslage. Hierzu gehört auch diem Produkthaftung. Das ist für abnahmepflichtige Maschinen und Anlagen von besonderer Bedeutung.

© AxelPossmann-Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Diese Tafel zeigt die zu unterschreitende Fehlerwahrscheinlichkeit um bestimmte Schadensrisiken zu vermeiden.



Wahrscheinlichkeitseinstufung nach JAR-25

Bild 2.3-1

Bild 2.3-1 *(Lit 2.3-1 und 2.3-2): Die JAA (European Joint Aviation Authorities) hat für große Transportflugzeuge in der JAR (Joint Aviation Requirements) 25. 1309 eine Fehlerklassifikation und eine Wahrscheinlichkeitseinstufung (Fehler pro Flugstunde) vorgenommen. Als Merkmale dienten hierfür die Auswirkungen der Schäden bzw. Fehler auf das Flugzeug und die Passagiere sowie die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses während einer Flugstunde. Im Folgenden wird der englische Wortlaut dieser Klassifikation angegeben. Das nebenstehende Bild zeigt in tabellarischer Form eine deutsche Übersetzung der Begriffe und die zugehörige Einstufung.*

Catastrophic:

Failure Conditions which would prevent continued safe flight and landing

Hazardous:

Failure conditions which would reduce the capability of the aeroplane or the ability of the crew to cope with adverse operating conditions to the extent that there would be:

I *a large reduction in safety margins or functional capabilities; or*

II *physical distress or a higher workload such that the flight crew cannot be relied upon to perform their tasks accurately or completely; or*

III *serious or fatal injury to a relatively small proportion of the occupants.*

Major:

Failure conditions which would reduce the capability of the aeroplane or the ability of the crew to cope with adverse operating conditions to the extent that there would be, for example

I *a significant reduction in safety margins or functional capabilities;*

II *a significant increase in crew workload or in conditions impairing crew efficiency, or*

III *discomfort to occupants, possibly including injuries.*

Minor:

Failure conditions which would not significantly reduce aeroplane safety and which involve crew actions that are well within their capabilties. Minor failure conditions may include, for example:

a. *a slight reduction in safety margins or functional capabilities.*

b. *a slight increase in crew workload, such as routine flight plan changes, or*

c. *some inconvenience to occupants.*

Probable Failure Conditions:

Those anticipated to occur one or more times during the entire operational life of each aeroplane.

Improbable Failure Conditions:

Remote: *Unlikely to occur to each aeroplane during its total life but which may occur several times when considering the total operational life of a number of aeroplanes of the type.*

Extremely remote: *Unlikely to occur when considering the total operational life of all aeroplanes of the type, but nevertheless has to be considered as being possible.*

Extremely Improbable Failure Conditions:

Those so unlikely that they are not anticipated to occur during the entire operational life of all aeroplanes of one type.

© Axel Rossmann - Turbocon
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 2.3-2: *Diese, bei Luftfahrttriebwerken angewendete Vorgehensweise kann als Beispiel für eine Risikoabschätzung im Maschinenbau dienen. Gegebenenfalls ist sie entsprechend maschinenspezifischen Vorschriften/Gesetze verändert.*
Luftfahrttriebwerke weisen wegen

- *hoher Drehzahlen*
- *hohen Drücken*
- *hohen Temperaturen*
- *besonderem Einsatz*

eine nicht zu vernachlässigendes Risikopotential auf. Dieses muss beherrscht werden. Bei Schäden und Problemen sollte deshalb eine nachvollziehbare ***Risikoabschätzung*** *durchgeführt werden, welche die Basis für weitere Aktionen und deren Dringlichkeit bildet. In Lit. 2-20 (MIL-Spec 882-C) ist das Vorgehen und die Dokumentation im Rahmen von Risikoabschätzungen spezifiziert.*
Voraussetzung für die Beherrschung der Risiken ist

- *Erkennung der Probleme*
- *Erkennung möglicher Auswirkungen*
- *Abschätzung der Häufigkeit*
- *Klassifizierung des Risikos*
- *Abhilfemaßnahmen*

Die Probleme werden auf der Basis des vorliegenden Erfahrungsschatzes identifiziert. *Hierbei werden alle Bauteile in Bezug auf ihre Versagensmöglichkeiten, Versagenshäufigkeit und deren Auswirkungen betrachtet und in einem Dokument (z.B. „Hazard Analysis Report“) festgehalten. Theoretische Betrachtungen zu den kritischen Auswirkungen von Schäden bzw. Problemen und deren möglichen Ursachen stützen die Erfahrungen und schaffen die Relevanz zum betrachteten Triebwerkstyp. Die Schäden werden gewöhnlich nach ihrer Gefährlichkeit für den Betrieb und das Luftfahrzeug in Kategorieen (CAT) eingeteilt. Verwirrenderweise findet man bei der Auswertung bereits eingetretener eine Einteilung in sog. „Level“ mit umgekehrter Zählrichtung (Lit. 2.3-3, Bild 2-3.4). Trotzdem können sie* ***für die Einstufung in CAT hilfreich*** *sein.*
Typische Schäden in CAT 1 welche die höchste Gefahrenstufe kennzeichnet sind:

• *Hochenergetische Vorgänge die aus dem Triebwerk hinauswirken. Hierzu gehören:*

- *Bruchstücke (z.B. von Scheiben)*
- *Stichflammen (z.B. Flammen der Brennkammer oder Titanfeuer)*
- *Explosionen (z.B. Staubexplosionen)*

• *nach außen tretende oder äußere Feuer wie:*

- *Kraftstofffeuer*
- *Ölfeuer*
- *Titanfeuer*

• *Verunreinigungen der Kabinenluft bzw. der Atemluft der Besatzung*

• *Versagen der Triebwerksaufhängung*

• *hoher asymetrischer Schub (z.B. durch Fehler am Schubumkehrer)*

• *Schubverlust bei kritischen Flugmanövern (z.B. während der Rotation beim Start).*

Die Häufigkeiten für die Klassifizierung (siehe auch Bild 2.3-1 nach JAR-25 für eine typische Verkehrsflugzeugflotte) können in Abhängigkeit von der betroffenen Flottengröße, den typischen Betriebszeiten, den Inspektionsintervallen usw. durchaus unterschiedlich sein und müssen mit den zuständigen Stellen festgelegt werden. Dabei helfen:

- *Auslegung und Berechnung*
- *Erfahrung mit anderen Baumustern*
- *Statistiken*
- *Berücksichtigung von „burn-in“ und „**wear- out**“ Effekten (siehe Bild 2.3-4).*

© Axel Rossmann - Turbocon sult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Typische Vorgehensweise bei einer Risikoabschätzung.

- Festlegung der Häufigkeiten

  Nicht beobachtete Schäden, die aber nicht ausgeschlossen werden können

  auf Basis der Auslegung (Berechnung)

  auf Basis von Erfahrung mit anderen Baumustern

- Klassifizierung der Häufigkeiten
  z.B.: frequent, probable, occasional, extremely remote, improbable

- Klassifizierung der Auswirkungen

  z.B.: catastrophic, critical, marginal, negligible
  werden den CAT I bis CAT IV zugeordnet (siehe Tabelle 1 unten)

- Bewertung nach den "Hazard Index" (HI)

Tabelle1

frequency of occurence	failure rate	hazard categories (CAT)			
		I catastrophic	II critical	III marginal	IV negligible
frequent	$\geq 10^{-3}$	1	3	7	13
probable	10^{-3} - 10^{-5}	2	5	9	16
occasional	10^{-5} - 10^{-7}	4	6	11	18
extremely remote	10^{-7} - 10^{-9}	8	10	14	19
improbable	$\leq 10^{-9}$	12	15	17	20

Einzelfall

Die in Tabelle 1 ermittelten Hazard Indices ergeben nach Tabelle 2 (mit den zuständigen Behörden festgelegt) die Risikobewertung mit eventuell notwendigen Aktionen.

Tabelle2

HI	assessment	further actions
1 - 5	high risk	unacceptable
6 - 11	moderate risk	acceptable with review
12 - 20	low risk	acceptable without review

Bild 2.3-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die mögliche Weiterentwicklung von Schäden ist zu berücksichtigen sowie die gültigen Vorschriften für Inspektion und Überwachung. Beim konkreten Schadensfall werden entsprechend Tabelle 1 (hier beispielhaft) die ***Hazard Indices*** *(HI)* ***als Zahlen ermittelt.*** *Diese Phase der Zuordnung der Schadensmodi zu den Indices ist ein besonders erfahrungsabhängiger Vorgang und entzieht sich gewöhnlich der ausschließlich mathematischen Ermittlung.*

Ist die Risikoabschätzung mit der Zuordnung der in Tabelle 1 ermittlelten Hazard Indices in Tabelle 2 erfolgt, ergeben sich daraus unmittelbar die Aktionen. Die dunkelgrauen Felder entsprechend Tabelle 2 kennzeichnen inakzeptable Risiken. Hellgraue Felder lassen Überwachungen bis zur endgültigen Abhilfe zu. Diese Einordnung bestimmt auch die vorgeschriebene Unterrichtung der zuständigen Behörden und Betreiber.
Man erkennt, dass eine Einstufung als sog. ***„Einzelfall“*** *eine „failure Rate“ von improbable bedeutet. Damit wären keine Massnahmen notwendig. Diese Bewertung sollte nur dann erfolgen wenn Ursachen, Zusammenhänge und Abläufe einwandfrei geklärt sind. Leider ist meist das Gegenteil bei einer Enstufung zum Einzelfall zu beobachten (****Bild 2.3-3****)*
Eine solche ***Risikoabschätzung ist für jeden denkbaren relevanten Fehlermodus vorzunehmen****. Können z.B. als Folge eines Schadens sowohl ein Ölfeuer mit Wellenbruch als auch ein nicht „containbarer“ Haircut der Beschaufelung auftreten, so sind beide Möglichkeiten in einer Risikoabschätzung unter Ermittlung der Hazard Indices gesondert zu betrachten.*

Bei spielen der Ermittlung der Hazard Categories Erfahrung und damit auch subjektive Einschätzungen eine wichtige Rolle. Es handelt sich also hier um eine sehr sensible „Prozedur“, bei der Sicherheit Vorrang hat aber erfahrungsgemäß auch große ökonomische Risiken und Prestigeverlust nicht ausgeklammert werden können.
Die einzuleitenden Abhilfemaßnahmen erfordern folgende Hauptschritte:

- Feststellung und Bewertung der Ursachen auf der Basis einer Problem-Schadensanalyse (Kapitel 2.1).

- Schadensform ausschließen (z.B. durch konstruktive Änderungen)

Der "Einzelfall" bedeutet für Viele:
Man braucht nichts machen

Vorraussetzung für die Einstufung als "Einzelfall" ist die genaue Kenntnis der Ursache!

"Ausreißer": Entspricht nicht den Eigenschaften der Mehrheit.
"Sonderfall": Entsteht durch eine unzulässige Eigenschaft.
Verwandte Probleme: Ausschließen einzelner "unpassender" Messwerte einer Messreihe.

Bild 2.3-3

- Schadenshäufigkeit reduzieren (z.B. durch Zwischeninspektionen)

- Schadensauswirkungen „entschärfen“ (z.B. Einführung einer Feuerlöschanlage)

© Axel Rossmann - Technologie Consulting
als Schulungsunterlage nur

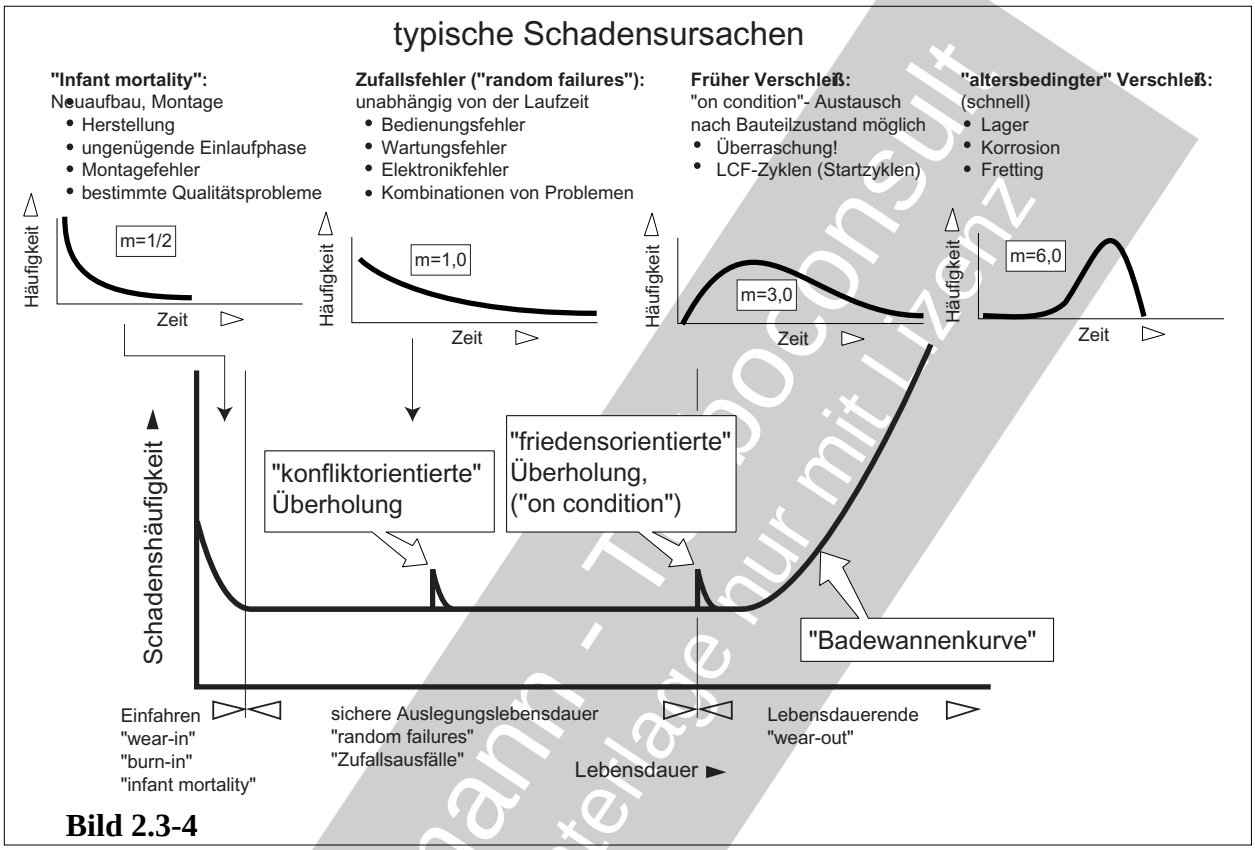


Bild 2.3-4

***Bild 2.3-4**: Die Schadensstatistik lässt erkennen, dass nach einer Überholung die Wahrscheinlichkeit eines Schadens besonders hoch liegt. Ein solches Verhalten zeigt sich in dem typischen Verlauf der Schadenshäufigkeit über der Betriebszeit (Badewannenkurve, Skizze unten). Die erhöhte Schadensrate beim Neuteil bzw. nach einer Überholung wird im angelsächsischen als **„infant mortality", „wear-in" oder „burn-in"** bezeichnet. Dies ist u.a. auf Fremdkörperschäden, z.B. als Folge von liegen gebliebenem Werkzeug, Befestigungselementen oder Hilfsmaterial, zurückzuführen. Der Anstieg der Schadensrate zum Lebensdauerende bzw. nach langen Laufzeiten wird im Englischen „**wear-out**" genannt. Sie ist die Folge normaler Alterung wie Ermüdungsvorgängen, Korrosion und Verschleiß.*
*Die Badewannenkurve steht in einem wichtigen Zusammenhang mit der **Überholungsphilosofie** bzw. der Festlegung von Überholungsintervallen. Is diese „**konfliktorientiert**" wird die Überholung bereits in den vorderen Bereich der sicheren Auslegungslebensdauer gelegt um im Konfliktfall Triebwerke im optimalen Zustand zur Verfügung zu haben. Eine „**friedensorientierte**" Vorgehensweise wird dagegen die Überholung „on condition" (nach Teilezustand) vornehmen oder erst zu Beginn der „wear off" -Phase ansetzen.*

© Axel Bossmann - TU Bosconsult
Ausschnittsvorlage nur mit Lizenz

Literatur 2.3

2.3-1 P.D. Vinall (CAA) „SAFETY AT SEA AND IN THE AIR CONFERENCE“ „Engine Reliability.“

2.3-2 J.W. Bristow, „The meaning of life“, Zeitschrift „The Aeronautical Journal“, June 2000, Seite 264-270.

2.3-3 The Federal Aviation Administration (FAA) and The Aerospace Industries Association (AIA), „2nd Technical Report on Propulsion System and Auxilary Power Unit (APU) related Aircraft Safety Hazards“, January 31, 2005. Seite 1-107.

2.3-4 A.Rossmann, „Die sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte triebwrekstechnik, Band 1“, June 2000, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

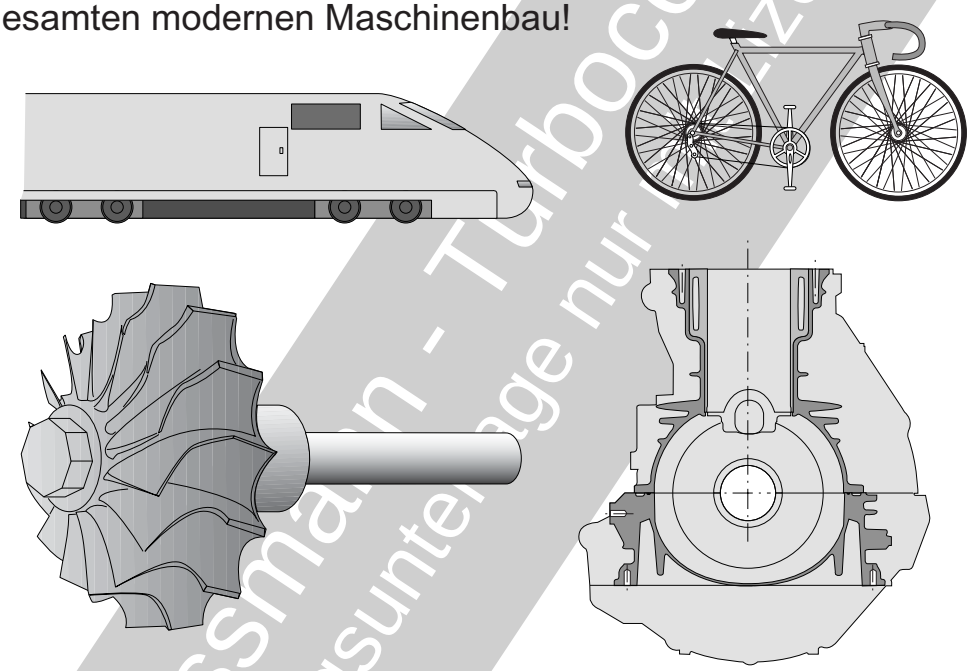
Leichtbau

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3. Vom Maschinenbau zum Leichtbau

Leichtbau hat viele Gesichter, man findet ihn im gesamten modernen Maschinenbau!



© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Konstruktionen die eine **Minimierung ihres Strukturgewichts** zum Ziel haben, lassen sich pauschal dem Begriff Leichtbau zuordnen. Der Trend zum Leichtbau hat sich nun verstärkt auf den **gesamten Maschinenbau** übertragen. So wird der Maschinenbau zunehmend zum Leichtbau. In der Literatur (Lit. 3-4) werden die Leichtbauprinzipien Konzept-, Gestalt- und Verbundleichtbau oder Bedingungs-und Stoff- Leichtbau (Lit. 3-5, Bild 3-2) unterschieden. Damit rücken nicht nur für Blechstrukturen bestimmte Konstruktionsmerkmale immer mehr in den Vordergrund (Lit. 3-3).

- Möglichst gleichmäßige **hohe Beanspruchung der gesamten Konstruktion** bzw. des Volumens.
- Weitgehende **Ausnutzung der Festigkeit**, d.h. möglichst hohes Spannungsniveau.
- Nutzung der verfügbaren Räume für hohe **Tragfähigkeit und Steifigkeit**.

Die **Festigkeitsauslastung** setzt eine möglichst genaue und umfassende Kenntnis aller relevanten Betriebsbeanspruchungen voraus. Darüber hinaus erfordern Leichtbaukonstruktionen die besondere Berücksichtigung von Kraftfluss, Werkstoffeigenschaften, Fügungen, Umgebungsbedingungen, Sicherheit und Zuverlässigkeit. Diese Forderungen gelten längst nicht mehr nur für Blechbauweisen sondern inzwischen für weite Bereiche des allgemeinen Maschinenbaus. Die Realisierung erfordert geeignete Fertigung, Funktion und Eigenschaften. Leichtbauten lassen sich drei Haupttypen zuordnen: Differential-, Integralbauweise (in Kombination als integrierende Strukturen, Bild 3-7) und Verbunde. Der **Trend geht zweifelsfrei zur integralen Bauweise** (Bild 3-14 und Bild 3-15) **und zu Verbunden** (Bild 3-2).

Bild 3-1 *(Lit. 3-3 bis Lit. 3-19): Hier soll anhand* ***typischer Beispiele*** *der heutige Stellenwert des Leichtbaus verdeutlicht werden. Man erkennt, dass es sich um Technologien handelt, die oft bereits aus der Luftfahrttechnik (Flugzeugzellen, Turbotriebwerke) seit Jahren bekannt und erfolgreich erprobt sind (Bild 3-2 und Bild 3-11). Aus den Beispielen lässt sich ein Trend zur Kombination verschiedener Werkstofftypen (z.B. Metalle mit faserverstärkten Kunststoffen - FVK) erkennen. Das erfordert anwendungsangepasste Konstruktionen für die nicht selten aufwändige Pionierarbeit notwendig ist. Auch das Betriebsrisiko ist durch praxisrelevante Erfahrungen auf das akzeptierte Maß der konventionellen Bauweisen zu minimieren.*

Verkehrssysteme*: Hier steht die Energieeffizienz durch möglichst geringes Gewicht bei hohen Sicherheitsanforderungen im Vordergrund. Dieser Aspekt dürfte sich mit der Einführung alternativer (elektrischer) Antriebe noch verstärken.*
Kraftfahrzeuge*: Leichtbau in Karosserie (Bild 3-7, Lit. 3-20), Motor (Bild 3-15, Lit. 3-7) und Fahrwerk (Bild 3-14). In der Karosserie kommen Werkstoffe mit höherer spezifischer Festigkeit (Bild 3-4) zum Einsatz. Typisch sind hochfeste Stahlbleche, leichtere Werkstoffe wie Aluminium und Magnesium in der tragenden Struktur sowie Faserverbundwerkstoffe (FVK). Dies erfordert* ***angepasste Konstruktionsprinzipien*** *(z.B. 'Spaceframe', Bild 3-4) um den technologiespezifischen Vorteilen und Schwächen gerecht zu werden (Lit. 3-21). Die, im Vergleich zu Stahl sehr niedrige Steifigkeit (E-Modul 1/3 von Stahl, Bild 3-5) muss ausgeglichen werden. Das erfordert das Crashverhalten und die Torsionssteifigkeit für Fahrverhalten. Diese Forderungen werden mit Gussknoten erreicht, welche stranggepresste Hohlprofile verbinden. An flächigen Strukturen werden dickere Wandstärken eingesetzt. So lässt sich das Gewicht einer Rohkarosserie um ca. 40% absenken. Für die Realisierung kommen angepasste Verbindungstechnologien wie Laserschweißen, Stanznieten, selbstfurchendes Schrauben, Kleben und Bördeln (Clinchen) zum Einsatz.*
Bahnen*: Der gleiche Trend wie beim KfZ ist auch hier zu beobachten. Anspruchsvoll ist besonders die Langlebigkeit und Ausfallsicherheit.*
Schiffe*: Für den Hochgeschwindigkeitseinsatz im Personenverkehr (z.B.Luftkissenfahrzeuge, Mehrrumpfboote) ist geringes Gewicht erforderlich. Zusätzlich ist mit sehr intensiver Korrosionsbelastung zu rechnen, was die Werkstoffauswahl weiter erschwert.*

Sportgeräte *sind schon immer eine Domäne des Leichtbaus. Dazu zählen sowohl Renn- und Sportwagen als gerade auch durch Muskelkraft bewegte Geräte wie Rennräder, Tennisschläger und die Skiausrüstung. Auf diesem Gebiet findet man aufwändige Verbundbauweisen. Sie nutzen nicht nur das geringe Gewicht, sondern auch die speziellen Vorteile der Technologien wie eine 'strukturierte' Elastizität (Lit. 3-22).*

Haushaltsgeräte*: Hier dürfte die Kostenreduzierung vor einer Gewichtseinsparung stehen, obwohl für die Handhabung durchaus von Bedeutung. Das gilt auch für den Heimwerkermarkt. Zusätzlich lassen sich Vorteile wie Korrosionsfestigkeit, Schwingungs- und Lärmdämpfung sowie elektrische Isolation nutzen.*

Alternative Energieerzeugung*: Für ein typisches Beispiel stehen Windenergieanlagen (WEA). Es handelt sich um statisch und dynamisch hochbelastete Maschinen, die Umgebungseinflüssen (z.B. Korrosion, Blitzschlag) intensiv ausgesetzt sind. Das Gewicht des Rotorkopfs aus Gondeln, Nabe und Flügeln muss möglichst niedrig sein, um die Belastung des Pylons zu minimieren.*

Klein- und Mikromaschinen*: Oft sind es konventionelle Geräte wie Flugapparate (Drohnen, z.B. Hubschrauber) oder Turbomaschinen (Bild 3-3) bei denen eine Miniaturisierung die*

© Axel Rossmann - Tu Ilmenau
das Copyright untersagt
das Kopieren dieser Seite

Der Leichtbau hat neben der Luftfahrtanwendung viele Bereiche des Maschinenbaus erobert. Dazu gehören auch ungewöhnliche.

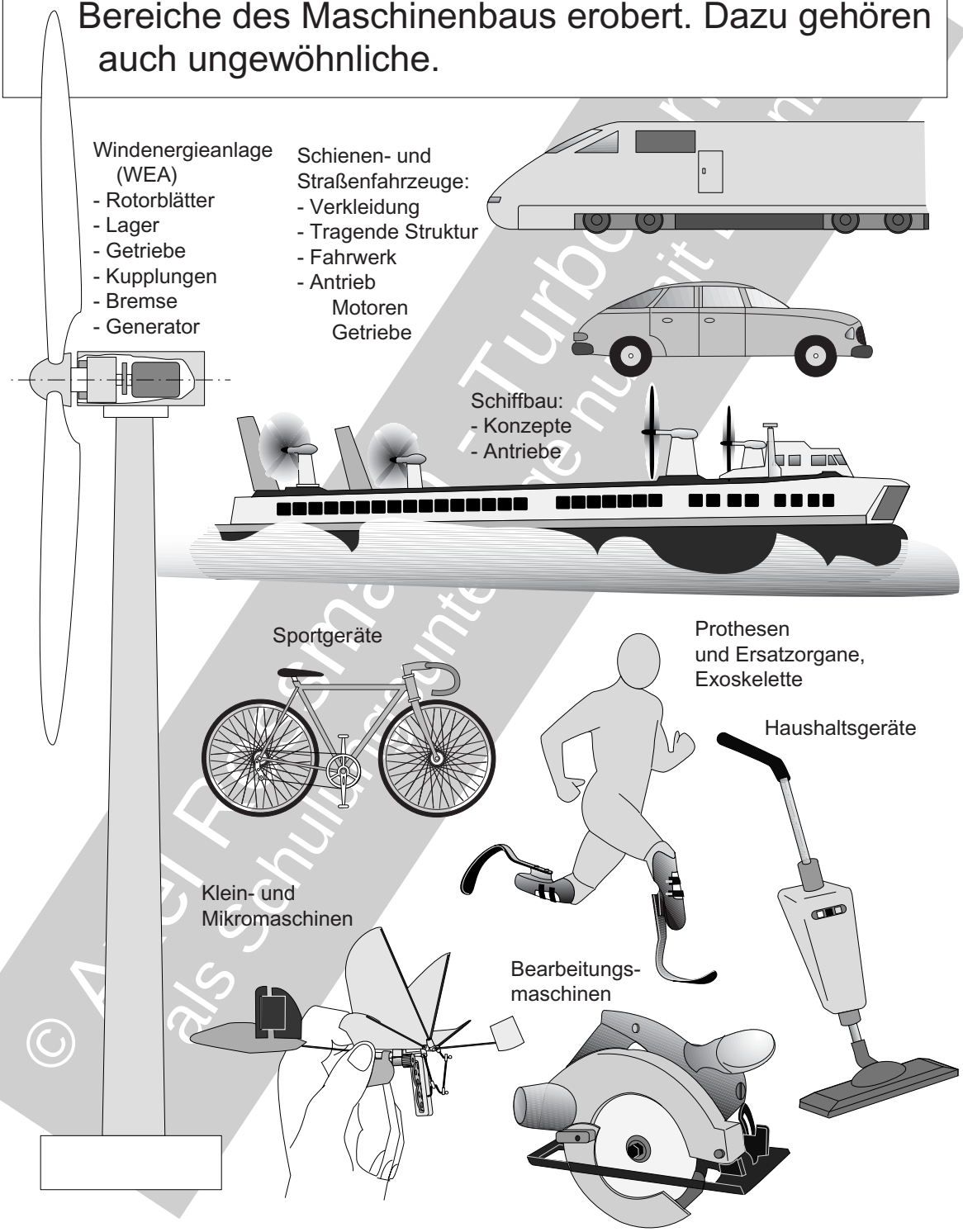
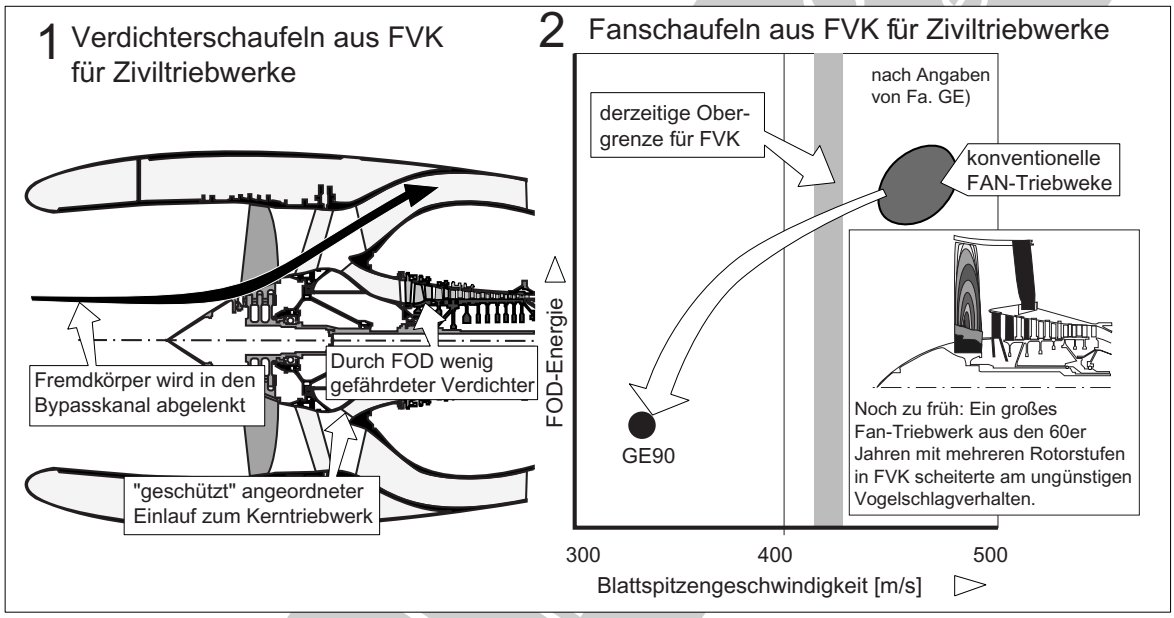


Bild 3-1

Handhabung durch einzelne Personen oder in kleinen Anlagen (z.B. Heizung/Energieerzeugung in Häusern) ermöglicht.

Prinzipien des Leichtbaus lassen sich unterschiedlichen Begriffen zuordnen. Oft findet man sie alle in einer einzigen Konstruktion.

Bedingungs-Leichtbau: Optimierung/Anpassung der Aufgabenstellung



Stoff-Leichtbau: Werkstofforientierte Optimierung nach spezifischen Daten (dichtebezogen) von Festigkeit (Reißlänge), Steifigkeit (elastische Verformung) und Volumen.

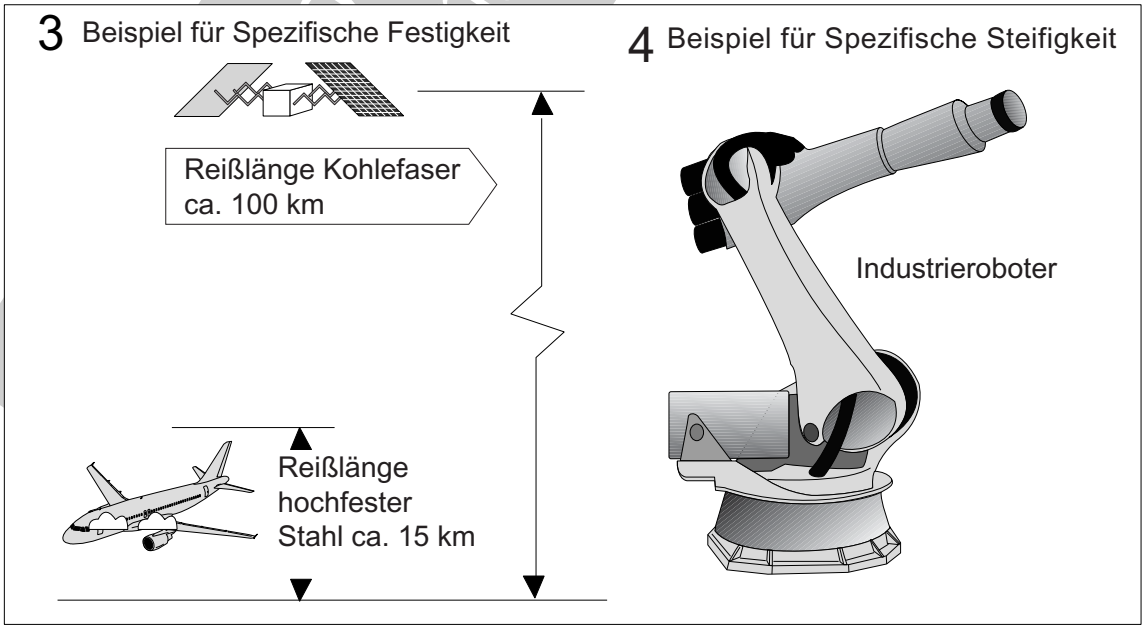


Bild 3-2

***Bild 3-2**: In der Literatur (3-5) findet man eine begriffliche **Systematisierung** des Leichtbaus.*

***Bedingungsleichtbau**: Minimierung der einwirkenden **Kräfte**. Trotz höherer Auslastung*

der Komponenten akzeptable Sicherheit durch ***Fail-Safe Verhalten****.*

Stoff-Leichtbau*: Dafür dienen* ***Werkstoffe*** *höherer spezifischer Festigkeit und Steifigkeit (Bild 3-4).Voraussetzung für den Erfolg einer* ***Technologie*** *ist, dass sie zur Serienanwendung kommt. Hier sind jedoch bestimmte Voraussetzungen wie günstige Fertigung und Kostenakzeptanz zu erfüllen.*

Form-Leichtbau*: Gestaltung mit optimalem Kraftfluss. Erfolgt mit geometrischer Optimierung der Struktur unter Berücksichtigung von* ***Krafteinleitung und Kraftführung****. Diesen werden die tragenden Querschnitte angepasst. Das geschieht insbesondere auch unter dem Gesichtspunkt dynamischer Beanspruchung.*

Wie man aus den später angeführten Beispielen sieht, genügt oft nicht eines dieser Merkmale allein einem Leichtbau. Um hohe Anforderungen zu erfüllen ist es notwendig, alle Vorgehensweisen/Philosophien zu nutzen. Die Realisierung benötigt folgende ***Voraussetzungen****:*

- Die spezifischen ***Vor- und Nachteile einer Technologie müssen erkannt und verstanden*** *sein. Nur so ist es möglich, die notwendigen Entwicklungsschritte für einen erfolgreichen Einsatz zu definieren.*

- Alle ***Auslegungs-, Gestaltungsspezifikationen und Richtlinien*** *sind erarbeitet und müssen abgesichert sein. Die Qualität als Basis der Auslegung ist zu gewährleisten.*

- Bereits die Projekt- und Entwurfsphase muss die optimale ***Nutzung der Vorteile der einzusetzenden Technologie*** *berücksichtigen. Das heißt, die Entwicklung von Technologien ist langfristig anzulegen (Lit. 3-2). Sie müssen* ***vor einer Projektphase vorhanden*** *sein. In der Anfangsphase ist Technologieentwicklung in eine* ***Strategie****, unabhängig von einem bestimmten Projekt, einzubinden. Die folgenden Beispiele (Lit. 3-2) zeigen die Notwendigkeit dieser Forderungen:*

Beispiel 1: *Um* ***FVK-Verdichterschaufeln und andere FVK-Bauteile*** *(Gehäuse, rotierender Nasenconus)* ***in einem Triebwerk*** *einsetzen zu können, muss das Vogelschlagrisiko minimiert werden (Bild 5.2.2-12, Lit. 3-1). Mit einer geeigneten* ***Kontur des Bypasskanals*** *lässt sich ein direkter Aufschlag des Vogels im Kerntriebwerk vermeiden. Bei Kampfflugzeugen kann der* ***Ansaugkanal*** *geeignet gestaltet werden. Trifft der Vogel zuerst auf dessen Wand, „zerspritzt“ er und die Schaufelbelastung wird mit den kleinen Teilchen minimiert. Voraussetzung für einen Erfolg ist, dass sich die Partikel nicht wieder sammeln können.*

Beispiel 2*: Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass sich* ***FVK-Fanrotorschaufeln*** *bei ausreichender Masse realisieren lassen. Dazu muss die Umfangsgeschwindigkeit unter einem Grenzwert liegen.So bleibt die Aufschlaggeschwindigkeit eines Vogels der spezifizierten maximalen Masse beherrschbar (Diagramm oben rechts, Lit. 3-2). Dies wird bei Auslegung und Gestaltung berücksichtigt.*

Beispiel 3*: Extremen Stoff-Leichtbau findet man schon immer in der Luft- und Raumfahrt. Hier spielt die spezifische Festigkeit (Reißlänge, Bild 3-5) eine große Rolle.*
Sie wird umso wichtiger, wenn Bauteile sich selbst belasten. Das ist bei hohen Beschleunigungen von Raketen und durch Fliehkräfte in Rotoren von Turbomaschinen der Fall. Zukunftsmusik ist die Vorstellung eines Lifts an einem durchgehenden Seil in den Orbit.

Beispiel 4*: Um schnelle Bewegungen mit Fertigungsrobotern durchzuführen, müssen hohe Massenkräfte überwunden werden. Dazu bieten sich Strukturwerkstoffe einer hohen* ***Reißlänge*** *an (Bild 3-5). Darüber hinaus erfordert die Genauigkeit der Position auch eine große* ***spezifische Steifigkeit*** *(Bild 3-5), um die elastischen Verformungen zu beherrschen.*

© Aventissimum Turbo Consult
Abschlussarbeiten Unterlagen

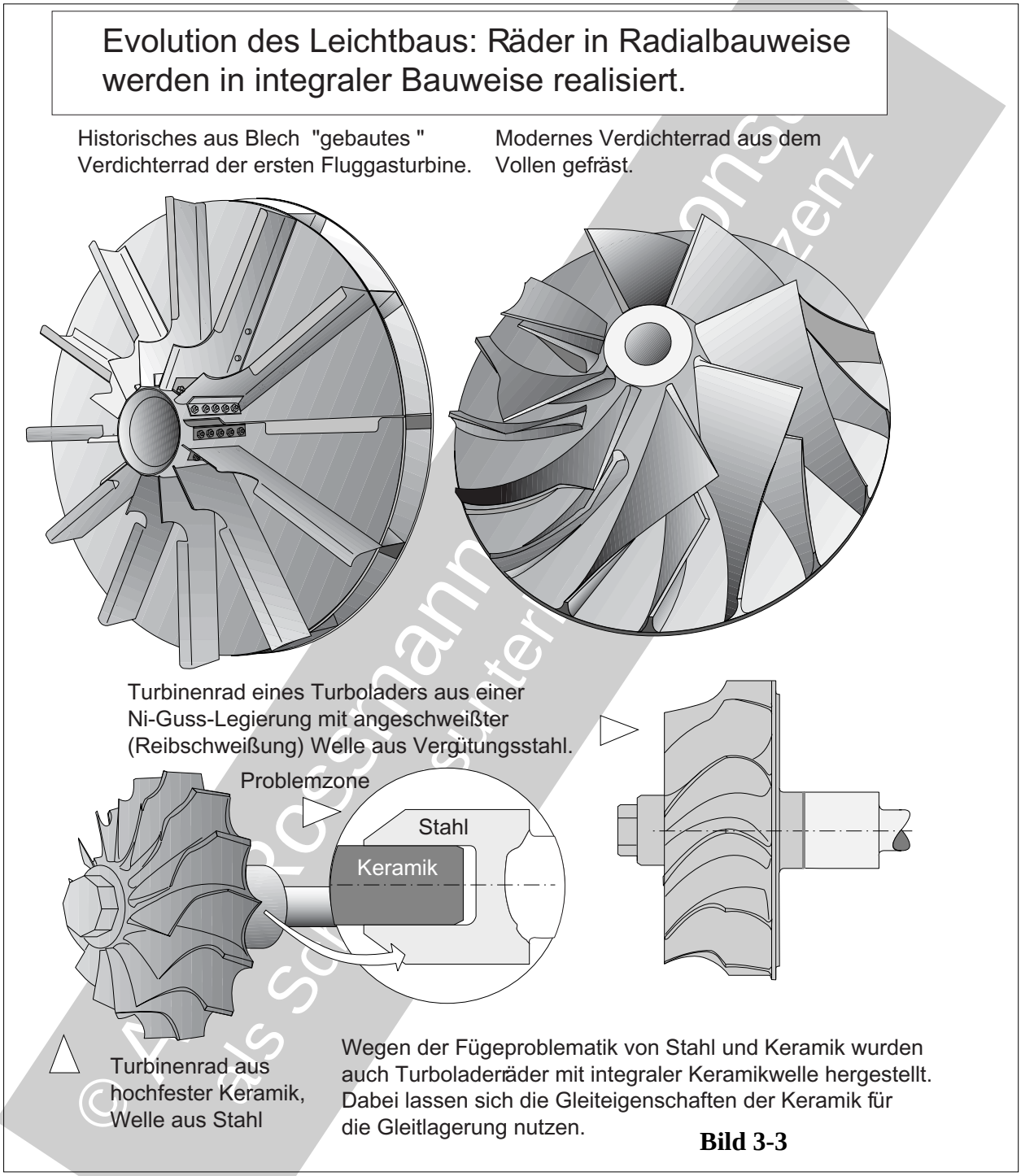


Bild 3-3

Bild 3-3 *(Lit. 3-19): Kompakte Bauteile werden im Leichtbau nach Möglichkeit in integraler* ***Bauweise*** *realisiert. Dieser Trend ist gut an* ***Rotoren von Turbomaschinen*** *zu erkennen (Bild 3-16). Erste Radialverdichter früher Turbotriebwerke wurden bereits vor 1940 aus Blechformteilen gefügt (Skizze oben links). Solche Konstruktionen findet man auch heute noch bei relativ niedrig beanspruchten* ***Lüfterrädern*** *in Industrie- und Haushaltsgeräten (Staubsauger). Die Fügung besteht aus* ***Nieten, Formschluss*** *oder* ***Schweißen****.*

Hochbelastete Rotoren von Turbomaschinen bestehen heute aus einstückigen ***Guss- oder Schmiedeteilen*** *(Skizze oben rechts). Dazu gehören auch* ***Turbolader****. Die Stahlwelle ist mit dem gegossenen Radkörper aus einer Ni-Le-*

Verbesserungen durch konsequente Anwendung eines Leichtbau-Konstruktionsprinzips.

Schema eines Karosserieknotens einer Spaceframekonstruktion aus Aluminiumlegierungen.

Gewicht und Steifigkeit der Rohkarosserie

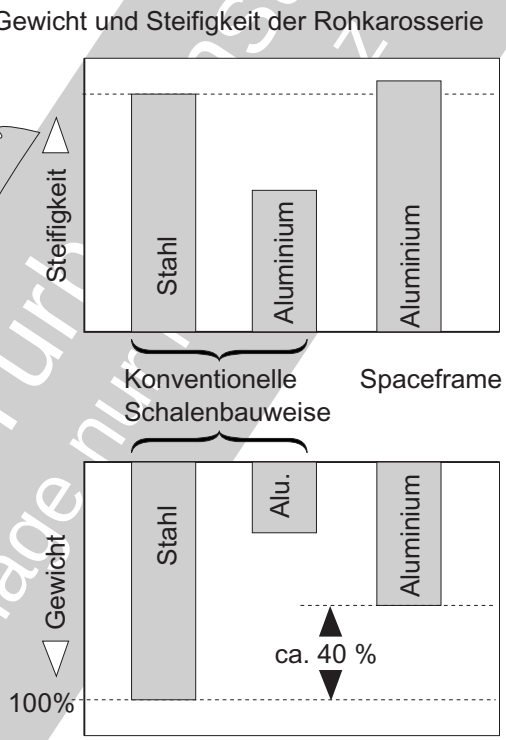


Bild 3-4

gierung mit Löten oder Reibschweißen gefügt (Skizze unten rechts). Auch Turboladerräder aus ***hochfester Keramik*** *(z.B. Siliziumnitrid, Bild 3-22) wurden bereits in den 80er-Jahren in Großserie hergestellt. Ein Beweggrund war das niedrige polare Trägheitsmoment und damit* ***gutes Beschleunigungsverhalten*** *(vermeiden des 'Turbolochs'). Motivation war auch die Gefahr eines Rohstoffmangels (Nickel und Kobalt). Wird dies wieder aktuell, ist durchaus erneut mit verstärkter Anwendung zu rechnen. Die* ***Verbindung zwischen Keramik und Stahlwelle*** *stellt den Konstrukteur vor eine große Herausforderung.* ***Unterschiedliche Wärmedehnungen und Steifigkeiten müssen trotz der Sprödigkeit*** *der Keramik sicher beherrscht werden. Eine Lösung sind* ***Schrumpfverbindungen****. Ihre* ***Formgebung ist auf die unterschiedliche Elastizität*** *von Welle und Rad abzustimmen. So lassen sich örtliche Überlastungen ausschließen.*

Bild 3-4 *(Lit. 3-21): Der Kraftfahrzeugbau steht wegen Energieeffizienz unter dem besonderen Zwang eine leichte Bauweise zu realisieren. Der Übergang von konventionellen* ***Stahlblechen auf Aluminiumlegierungen*** *erforderte mehr als nur einen Werkstoffwechsel. Neben dem* ***Gewicht*** *steht die* ***Steifigkeit*** *der Konstruktion im Vordergrund (Bild 3-5). Sie beeinflusst mit der Verwindung der Karosserie das Fahrverhalten. Weil der* ***Elastizitätsmodul der Aluminiumlegierungen*** *nur ca. 1/3 desjenigen von Stählen erreicht, kamen verstärkt Hohlprofile und/oder um ca. 40 % größere Wandstärken zur Anwendung. Diese Konstruktionen werden als 'Spaceframe'® bezeichnet. Sie müssen mit neuen oder* ***unkonventionellen Verbindungstechniken*** *realisiert werden. Dazu gehören auch* ***Verklebungen von Hohlprofilen*** *mit komplex geformten* ***Knoten aus Druckguss****. Es sei noch vermerkt, dass trotz einer vergleichbaren statischen Festigkeit die zu Stählen relativ niedrige Schwingfestigkeit*

© Assmann Universität Paderborn Kassel Nur für den Unterrichtsgebrauch

(eine echte Dauerfestigkeit besteht im Gegensatz zu Stählen nicht) und das Korrosionsverhalten (Bild 3-6) beherrscht werden müssen.

***Bild 3-5** (Lit. 3-6): Nimmt man als Anhaltspunkt die Festigkeitseigenschaften **niedrig legierter Stähle** als bevorzugten Werkstoff des 'konventionellen Maschinenbaus' lassen sich potenzielle Leichtbauwerkstoffe wie folgt bewerten:*

***Aluminiumlegierungen**:*
*Die **Bruchfestigkeit** der Stähle liegt etwa doppelt so hoch als die hochfester Aluminiumlegierungen. Trotzdem ist deren **spezifische Festigkeit** (Reißlänge) wegen der deutlich niedrigeren Dichte (Diagramm oben links) zumindest vergleichbar.*
*Die **Dauerfestigkeit** (eine echte besteht bei vielen Nichteisenmetallen und austenitischen Legierungen nicht) liegt bei Aluminiumlegierungen jedoch um ein mehrfaches (Faktor ca. 5) niedriger als bei Stählen (Diagramm oben rechts). Interessanterweise können sich hier Magnesiumlegierungen etwas besser verhalten. Bei Betrachtung der spezifischen Schwingfestigkeit wird der Nachteil gemindert, es bleibt jedoch ein Defizit. Kommen Schädigungen durch Korrosion dazu, kann die Kerbwirkung dieser Anfressungen die Schwingfestigkeit gefährlich verschlechtern. Das dürfte besonders auf die korrosionsempfindlichen Magnesiumlegierungen zutreffen (Bild 5.6.1-2).*
*Die **Steifigkeit**, ausgedrückt durch den Elastizitätsmodul (E-Modul) beträgt für Aluminiumlegierungen nur etwa 1/3 der von Stählen. Noch ungünstiger verhalten sich Magnesiumlegierungen (Diagramm unten links). Auch hier kann die niedrige Dichte dieses Manko nicht ausgleichen (Diagramm unten rechts) und muss durch geeignete Konstruktionsprinzipien ausgeglichen werden (Bild 3-4).*

***Titanlegierungen**: Sie haben sich in den bisherigen Leichtbauanwendungen wie dem Flugzeugbau, insbesondere in Flugtriebwerken und Hochleistungsmotoren des Motorsports trotz des hohen Preises durchgesetzt. Hier wurde ein reichhaltiger Erfahrungsschatz zu Schwächen und Stärken gesammelt, der vom allgemeinen Maschinenbau genutzt werden kann.*
*Die **Bruchfestigkeit** hochfester Titanlegierungen entspricht der von festen Stählen und übertrifft diese bei Berücksichtigung der Dichte (spezifische Festigkeit) deutlich (Diagramm oben links).*
***Dauerfestigkeit**: Die Dauerfestigkeit hochfester Titanlegierungen liegt im Bereich der Vergütungsstähle. Berücksichtigt man die um 40% niedrigere Dichte, wundert der Einsatz, besonders in dynamisch hochbelasteten Komponenten (z.B. Pleuel, Verdichterrotoren) nicht. Problematisch ist jedoch ein besonders großer, werkstoffspezifischer Schwingfestigkeitsabfall bei Schwingverschleiß (Fretting, Bild 5.9.3-4). Das erfordert besondere konstruktive Maßnahmen wie Verfestigung oder Zwischenschichten. Ein Vorteil ist die hohe Korrosionsfestigkeit der Titanlegierungen.*
*Ihre **Steifigkeit** bzw. der E-Modul liegt deutlich unter dem von Stählen. Die niedrigere Dichte gleicht aber diesen Nachteil mehr als aus (Diagramm unten rechts).*

***Faserverstärkte Kunststoffe** (FVK): Lagenaufbau und Faserrichtungen verhindern eine richtungsunabhängige Festigkeit und Steifigkeit (Anisotropie). Diese Eigenschaft muss den besonderen Anforderungen der Anwendung angepasst werden. Die Zugfestigkeit ist bei FVK, insbesondere wenn eine **Delaminationsschädigung** vorliegt, deutlich höher als die **nutzbare Druckfestigkeit** (Bild 3-12).*
***Bruchfestigkeit**: Wegen der Anisotropie der FVK-Werkstoffe lässt sich keine, den Metallen entsprechende, richtungsunabhängige Festigkeit angeben. Deshalb sind die Diagrammwerte bezüglich der Realisierbarkeit im Bauteil mit Vorsicht zu betrachten. Auch ist die Temperaturbeständigkeit auf Grund der Kunststoffmatrix sehr eingeschränkt (Langzeit um 100 °C). Trotzdem sind Kohlefaserverbunde (CFK)*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Abhängigkeit der Festigkeit und Steifigkeit von der Dichte eines Werkstoffs ist ein wichtiges Kriterium für die Anwendung im Leichtbau.

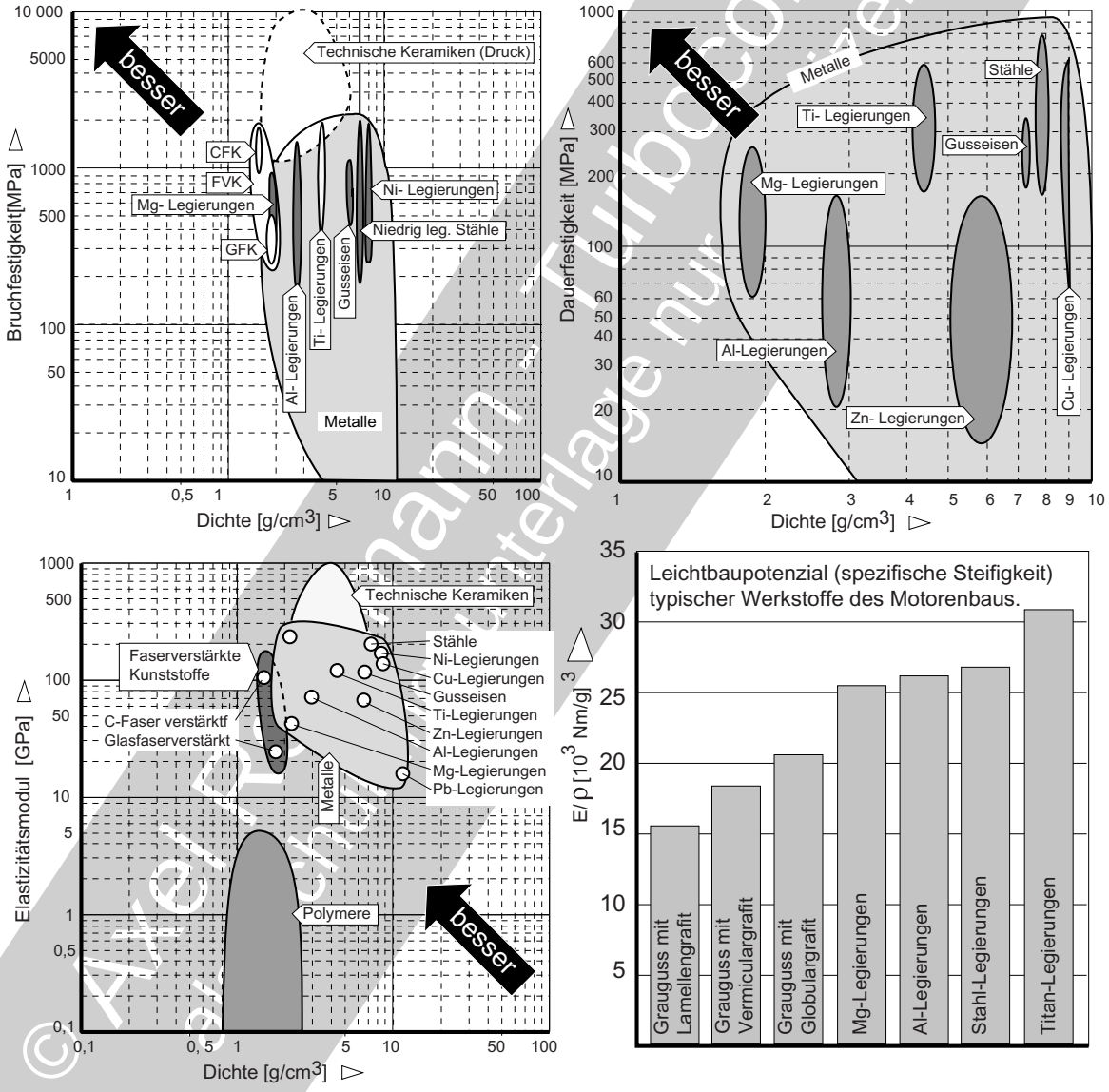


Bild 3-5

wegen der geringen Dichte bei Nutzung gerichteter Festigkeit, Metallen überlegen (Diagramm oben links).

Dauerfestigkeit**: Eine Schwingfestigkeit mit dem Versagenskriterium der Ermüdungsrissbildung wie bei Metallen gibt es für FVK-Werkstoffe nicht. Sie **versagen in der Ermüdungsphase durch Delamination** (Auflösung des Verbunds). Dies lässt sich als Fail Safe-Verhalten nutzen. Es führt zur erhöhten inneren **Dämpfung** und kann so hochfrequente Schwingungen bzw. Resonanzen vermindern. Da es nicht zu einem Querriss kommt, ist trotz der Ermüdung eine **hohe Restzugfestigkeit gegeben.

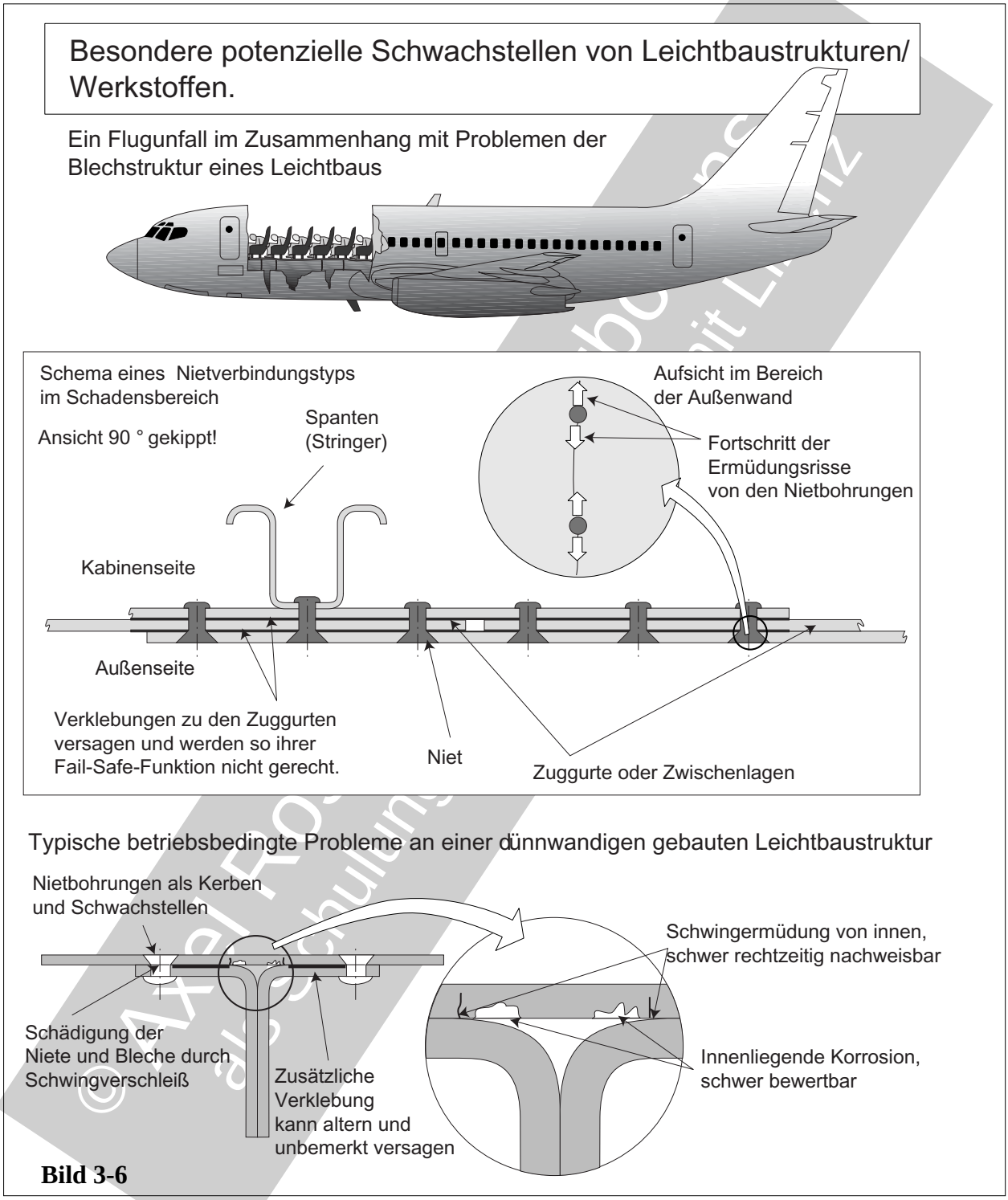


Bild 3-6

Bild 3-6 *(Lit. 3-23): Dieser Unfall ist ein eindrucksvolles* ***Beispiel für konstruktionsbedingte Wartungs- und Überholprobleme eines Leichtbaus aus hochfesten Aluminiumwerkstoffen****. Er war Anstoß für verstärkte Aktivitäten zum Einfluss der „Human Factors“. Der Versagensablauf begann im Bereich einer* ***Nietverbindung****. Entlang der Lochreihe längs der Kabinenwand entstanden an mehreren Stellen* ***Schwingrisse,*** *nachdem die zusätzliche* ***Klebeverbindung*** *des eingenieteten Zuggurts versagte. Sie war für ein* ***Fail-Safe-Verhalten der Verbindung*** *gedacht, wies aber, wahrscheinlich wegen der nicht einfachen Fabrikation, Mängel auf. Nach dem Versagen der Verbindung kam es zum dargestellten Schaden.*

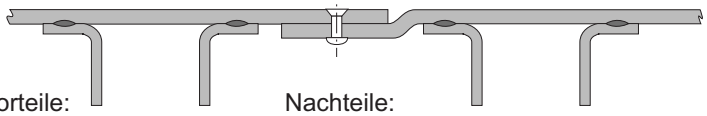
*Aus den **Schlussfolgerungen des Untersuchungsberichts** der zuständigen Behörde lässt sich in Auszügen zusammengefasst entnehmen:*
*- Vor dem Lösen der Klebeverbindungen mit nachfolgender Korrosion und Ermüdungsrissen war bereits **ca. 14 Jahre früher in einem Bulletin vom Flugzeughersteller gewarnt** und waren wiederholte Inspektionen gefordert worden. **Das potenzielle Schadensausmaß wurde jedoch nicht erkannt**.*
*- Beim Betreiber lagen **ausreichend Informationen** vor, um das Lösen der Klebeverbindungen mit einer Rissbildung im Metall (indirekt) in Verbindung zu bringen.*
Das hätte für die Durchführung des Wartungsprogramms ausreichen müssen, um Rissbildung zu erkennen und rechtzeitig zu reparieren.
*- Die **Aufsichtsbehörde** hätte die Inspektionen von einer (offenbar besonders kritischen) Überlappungsverbindung auf alle erweitern müssen.*
*- Es war nicht herauszufinden, ob der Betreiber tatsächlich die in einer ein Jahr früher ausgegebenen **Airworthiness Directive** (AD) geforderte **Wirbelstromprüfung** durchgeführt hatte oder ob die Prüfung unzureichend war. Diese **Prüfung hätte auch zusätzliche Ermüdungsrisse im Metall angezeigt**.*
*Die Anweisungen der **AD** ließen es wegen einer **Ungenauigkeit** zu, dass das Wartungspersonal den Austausch einer kritischen Nietsorte nicht vornahm.*
*- Von der Aufsichtsbehörde wurde **kein ausreichendes Wissen der von ihr zugelassenen Mechaniker** gefordert. Dies war jedoch erforderlich, um moderne Flugzeuge zu warten und zu prüfen. Grund für Wissensdefizite waren dem Stand der Technik **nicht mehr zeitgemäße Schulungsunterlagen**.*
*- Es gab **Arbeitsbedingungen (Human Factors)**, die sich nachteilig auf eine **visuelle und zerstörungsfreie Prüfung** auswirkten. Das konnte dazu führen, dass zu erkennende Schäden nicht festgestellt wurden (Lit. 3-27).*
*- Das **Betreibermanagement übersah menschliche Faktoren,** um eine erfolgreiche Prüfung zu motivieren. Hierzu gehörte die Konzentration auf Korrosion und Rissbildung kritischer Verbindungen. Spätere Informationen zeigten, dass dieser **Mangel offenbar bei vielen Betreibern** des betroffenen Flugzeugtyps bestand.*
*- Ein ein Jahr früher durchgeführtes nationales Überprüfungsprogramm (NASIP) der Betreiberflotte **fand die Schwachstellen nicht**.*
*Zusätzlich war die Überwachungsbehörde mit dem Verbindungsproblem **nicht besonders vertraut** und es fehlten **Informationen** zu absichernden Programmen der Behörde mit dem Flugzeughersteller.*
*Die Schlussfolgerung der Untersuchung für die **Hauptschadensursache** lässt sich wie folgt zusammenfassen:*
*Der Flugunfall ist auf das **Versagen des Wartungsprogramms** des Betreibers zurückzuführen. Gefährliche Trennungen der **Klebeverbindungen und Ermüdungsschäden,** die das Versagen der Kabine auslösten, wurden deshalb **nicht erkannt**.*

***Kommentar**: Auch wenn die Hauptursache von den Behörden in Mängeln des Wartungsvorgangs gesehen wird ist festzustellen, dass die folgenden **leichtbauspezifischen Einflüsse letztendlich die Voraussetzung für das Problem schufen**:*
- Kombination von Klebe- und Nietverbindung
- Fail Safe-Verhalten nicht gewährleistet.
- Schwierige/Unsichere Prüfung im Betrieb, offenbar besonders der Klebeverbindung im Frühstadium der Schädigung.
- In Meeresatmosphäre sehr korrosionsgefährdet.
- Schwingbrüche wurden nicht erkannt.
- Schulung für Wartung und Reparatur.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bewährte Bauweisen des Leichtbaus

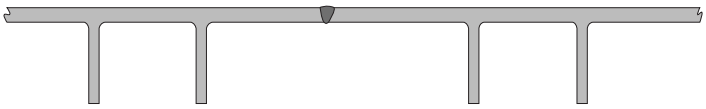
Leichtbau am Beispiel einer **flächigen Struktur**



Vorteile:
- Fail-Safe- Verhalten
- einfaches Reycling
- Reparaturfreundlich
- universelle Fügung
- Schwingungsdämpfung

Nachteile:
- Verbindungsgewicht
- Kerbwirkung
- Korrosion
- Zerstörungsfreie Prüfung
- Arbeitsaufwand

Differentialbauweise
(konstruktive Aufbautechnik)
- Punktuelle Verbindungen durch Nieten, Kleben und Punktschweißen.



Vorteile:
- Optimale Gewichtsreduzierung
- Gießtechnisch herstellbar
- Kraftfluss optimierbar
- besser automatisierbare Fertigung
- Hochfeste komplexe Bauteile
- Zerstörungsfreie Prüfung

Nachteile:
- Verbindungsgewicht
- Kerbwirkung
- Ungedämpft/Schwingungen
- Korrosion
- Rissprüfung
- Reparatur kann problematisch sein
- Materialeinsatz bei Herstellung durch Zerspanung

Integralbauweise
(einstückig)
- Guss, Schmieden, spanende Bearbeitung, Schweißen, Kleben, Pulvermetallurgie, Elektrochemische Bearbeitung Rapid Prototyping, Galvanoplastik.

Beispiele für integrale Bauweisen **komplexer Geometrien**

Heckklappe mit Innenstruktur aus Magnesium-Druckguss und einer verklebten Beplankung aus Aluminiumblech

Integrales Verdichterrad ('Blisk') aus einem Titan-Schmiederohling gefräst.

Lüfterrad eines großen Fahrzeugmotors. Material: kurzfaserverstärkter Thermoplast.

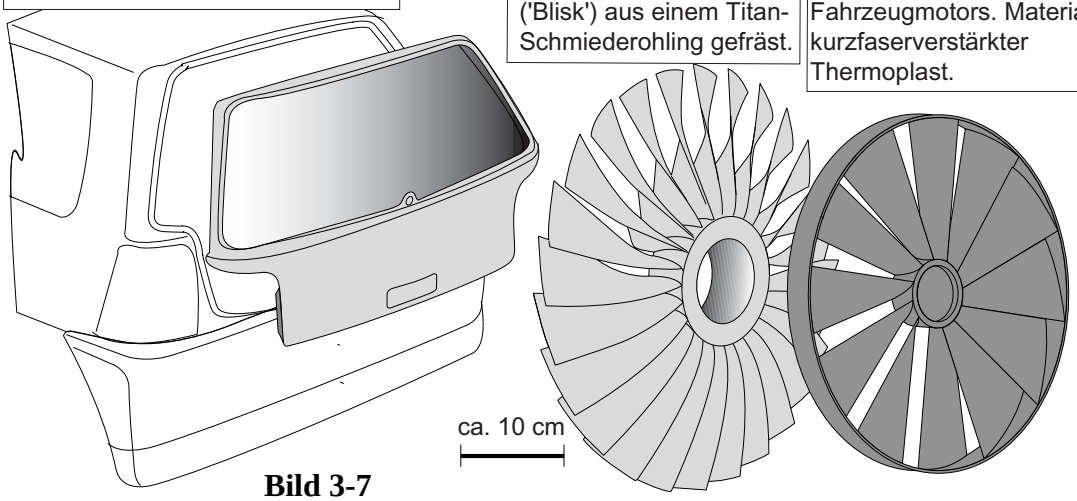


Bild 3-7

Bild 3-7 *(Lit. 3-3 und Lit. 3-4): Neben beanspruchungsbezogenen Begriffen (Bild 3-2) lassen sich* ***Leichtbaustrategien auch Bauweisen zuordnen****. Dabei unterscheidet man die* ***Differentialbauweise*** *und die Integralbauweise (Rahmen oben, Bild 3-3). Jede hat ihre spezifischen Stärken und Schwächen.*

Bei der konventionellen Differentalbauweise wird das Bauteil aus mehreren Elementen ge-

Einführung: Leichtbau

In Leichtbaukonstruktionen sind wegen der elastischen Nachgiebigkeit, dünnen Querschnitten und hoher Festigkeitsauslastung möglichst alle Betriebseinflüsse zu erfassen. Dazu gehören auch solche, die bei konventionellen Konstruktionen nicht berücksichtigt werden mussten.

Beispiele (kein Anspruch auf Vollständigkeit):

Innere Kräfte:
- Beschleunigung
- Kreiselkräfte
- Unwuchten

Innere Spannungen:
- Eigenspannungen Herstellung
- Wärmespannungen

Äußere Kräfte:
Stoßbelastungen
Trägheitskräfte

Korrosion:
- Werkstoff, - kombinationen
- Gestaltung (Hohlraum)
- Betriebsatmosphäre
- Lagern/Stillstandszeiten
- Betriebsmittel

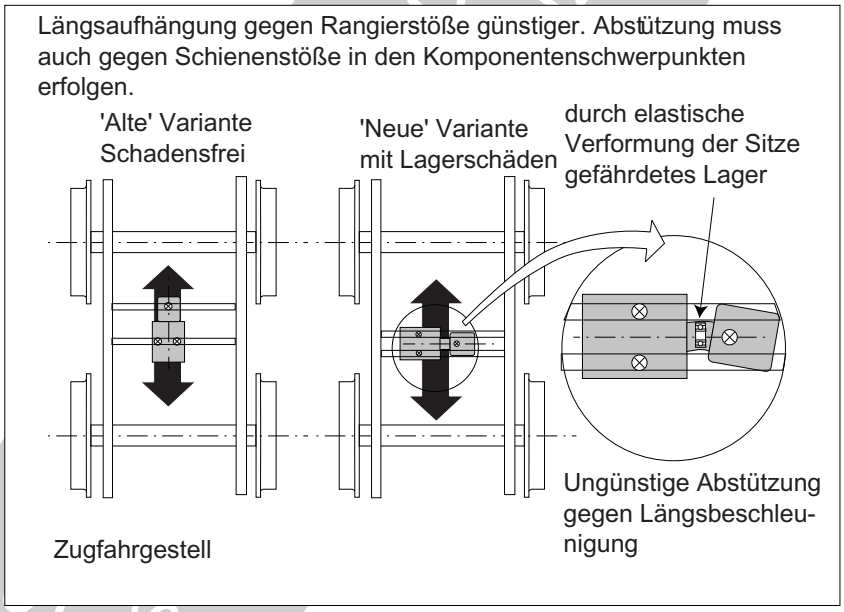


Bild 3-8

fügt. Sie werden nach Möglichkeit aus genormtem Halbzeug auf einfache Weise hergestellt. Diese Bauweise wurde insbesondere bei Flugzeugen und Luftschiffen angewendet.

*Die **Integralbauweise** versucht mit möglichst wenig Fügungen ein stoffschlüssiges Bauteil herzustellen. Dazu werden gegossene und/oder spanend hergestellte Elemente komplexer Geometrie genutzt. Im Flugzeugbau geht man seit Langem so vor. Das wurde vom Fahrzeugbau übernommen. Typisches Beispiel sind Türen mit einem komplex strukturierten Leichtmetalldruckgussrahmen (Al- und Mg-Legierungen). Dieser wird mit Flächenteilen aus anderen Metallen und/oder Kunststoffen zur 'Hybridbauweise' kombiniert (Skizze unten links). Dazu kann es erforderlich werden, Fügeverfahren bauteilspezifisch zu optimieren (Kleben, Nieten, Schrauben). Unterschiedliche Werkstoffe können jedoch besondere Massnahmen zum Korrosionsschutz (Elementbildung) erfordern.*

Die Skizze unten rechts zeigt einen sog. 'Blisk' (engl. Bladed Disk, Bild 3-16). Es handelt es sich um ein gefrästes und/oder durch Reibschweißen gefügtes Verdichterrad vorderer Stufen (Fan). Solche Bauteile findet man heute in militärischen und zivilen Flugtriebwerken. Als Lüfterräder (Bild 2.2.2.1-7), z.B. für Kühler, sind sie seit Langem im Maschinen-/Fahrzeugbau üblich.

***Bild 3-8: Konventionelle Bauweisen** deren Gewicht nicht erste Priorität ist, zeichnen sich durch eine relativ massive Bauweise, insbesondere größere Wandstärken aus. Damit verfügen sie neben hohen **Festigkeitsreserven über große Steifigkeit**. Geht man zu Leichtbau über, kann gerade deren **elastische Nachgiebigkeit** zu **unverhofften Problemen** führen. Ein Beispiel sind **Schwingungen und Überlastungen** der Lager rotierender Bauteile. In einem solchen Fall löste die ungünstige **Krafteinleitung** das frühzeitige Versagen von Lagern*

im Betrieb aus. Ein Beispiel ist das dargestellte Druckluftaggregat für Waggonbremsen. Bei einem neuen Modell wurde, anders als bisher, eine Orientierung der Aggregatlängsachse quer zur Fahrtrichtung gewählt. Das ließ Rangier- und Schienenstöße als Biegebelastung quer auf das Gehäuse einwirken. Dabei wurde dessen 'wespentaillenartiger' Querschnitt zwischen Verdichter und Elektromotor, in dem sich ein Wälzlager befand, stark elastisch deformiert. Dies führte zu ***Lagerüberlastung*** *und -versagen. Die Schäden wurden längere Zeit, wegen der Reibrostbildung (elastische Mikrobewegungen, Bild 5.9.3-2) am äußeren Lagersitz, als Korrosion missdeutet. Auch der Effekt der Steifigkeitsprobleme war offenbar nicht bewusst. Daran erkennt man die Bedeutung der Grundkenntnisse technischer Problemanalysen.*

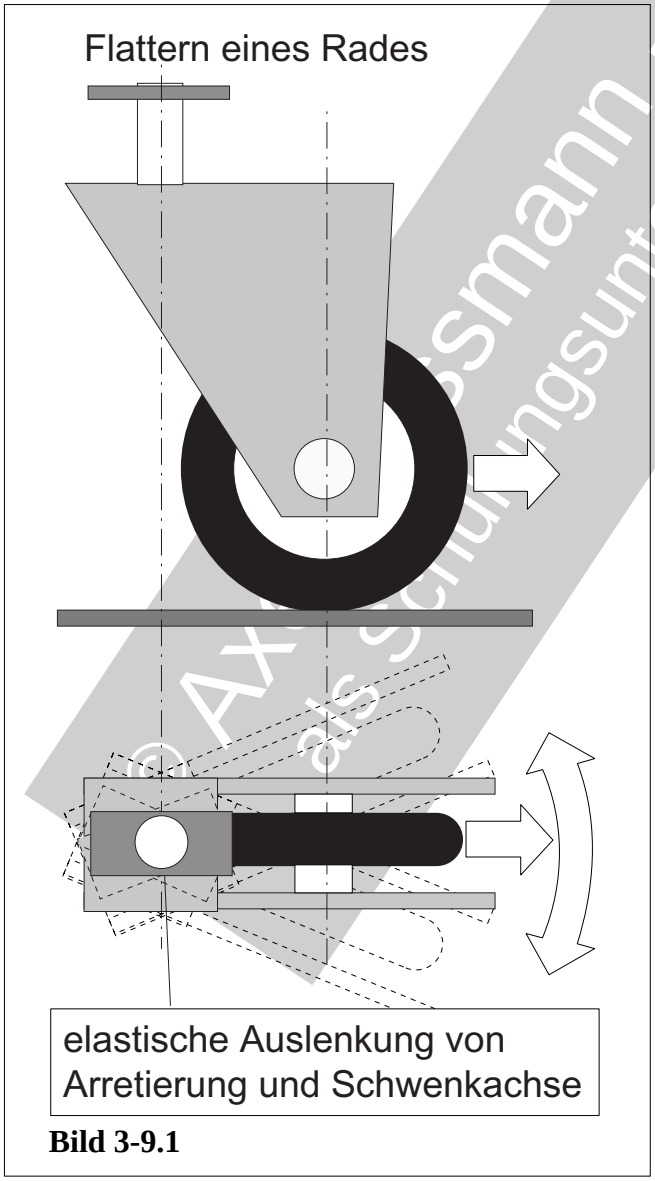


Bild 3-9.1

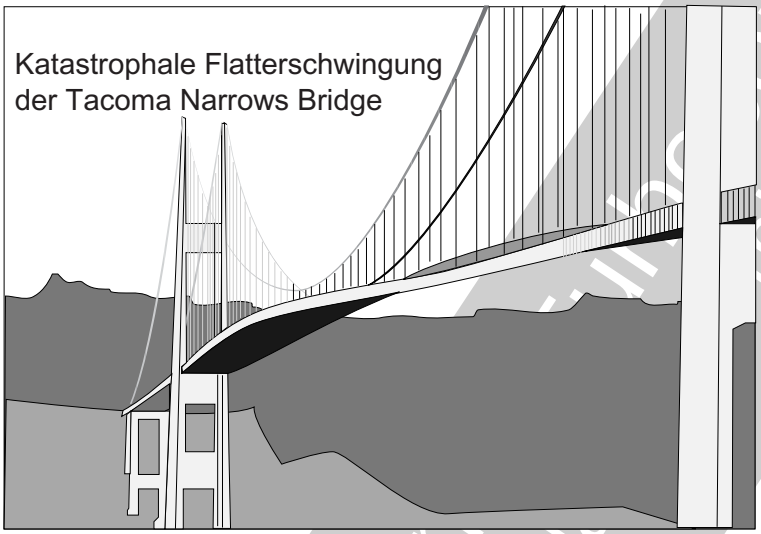
Bild 3-9.1 und Bild 3-9.2 *(Lit 3-2): Eine* ***Flatterschwingung*** *ist ein* ***selbsterregter, selbstverstärkender Vorgang****. Dieser kann unterschiedlicher Natur sein. Beispiele sind* ***aerodynamische und mechanische Anregungen****. Mechanisch erregtes* ***Flattern tritt bei Rädern*** *auf. Das ist der Fall, wenn die Aufstandsfläche in Fahrtrichtung ungünstig zum Durchstoßpunkt der Schwenkachse des Rads liegt. Auslösend wirkt ein Spiel in der Führung. Elastische Verformungen sorgen für die Rückstellung. Die Vorwärtsbewegung speist die nötige Energie ein.*

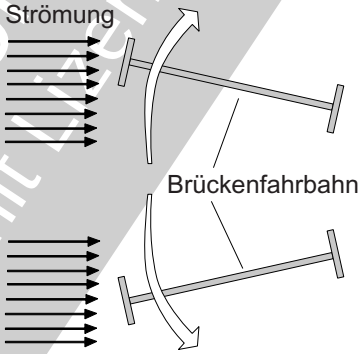
In Wechselwirkung mit einer teilweise oder vollständig abgelösten Strömung können Bauteile und Maschinen (z.B. umströmte Flächen wie Schaufeln von Strömungsmaschinen, Lit. 3-2) zu ***gefährlichen Schwingungen*** *(Flattern) angeregt werden. Dabei spielt eine sich periodisch ablösende* ***Wirbelbildung*** *eine Rolle (Kármán'sche Wirbelstraße, Bild 3-9.3). In solchen Fällen ist in kürzester Zeit mit katastrophalem Versagen zu rechnen (Bild oben). Die Gefahr nimmt mit schlanken,* ***aerodynamisch hoch belasteten Querschnitten****, wie sie für modernen Leichtbau typisch sind, zu.*

Auslösend wirken ***kleine Schwingungen*** *des Schaufelblattes, wie sie auf vielfältige Weise, z.B. durch die Strömungsstörungen vor und hinter dem umströmten Bauteil, angeregt werden. Die Blattschwingungen beeinflussen die Strömung so, dass pulsierende Gaskräfte entstehen. Sie wirken auf das Blatt selbstverstärkend. Den Anregungsmechanismus zeigt die Skizze unten. Um in den Zustand des Flatterns zu gelangen, ist* ***zunächst eine ausreichend große Schwingungsauslenkung des Schaufelblattes erforderlich****. Eine solche Schwingung kann auf verschiedene Weise angeregt werden. Typische Anregungen sind Strömungsstörungen oder in Turboverdichtern Änderungen des*

© Axmann - TU Berlin
als Schulungsunterlage nicht freigegeben

Flatterschwingungen sind nicht nur ein Problem von Flugzeugtragflächen. Umströmte Leichtbauten sind potenziell gefährdet.





Flatternde Tragflächen bei Erprobungsflug eines Segelflugzeugs.

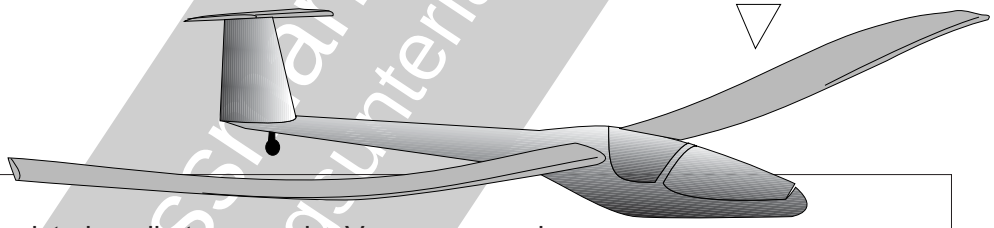
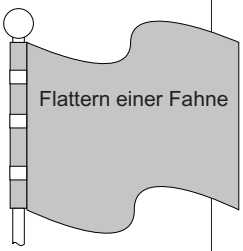
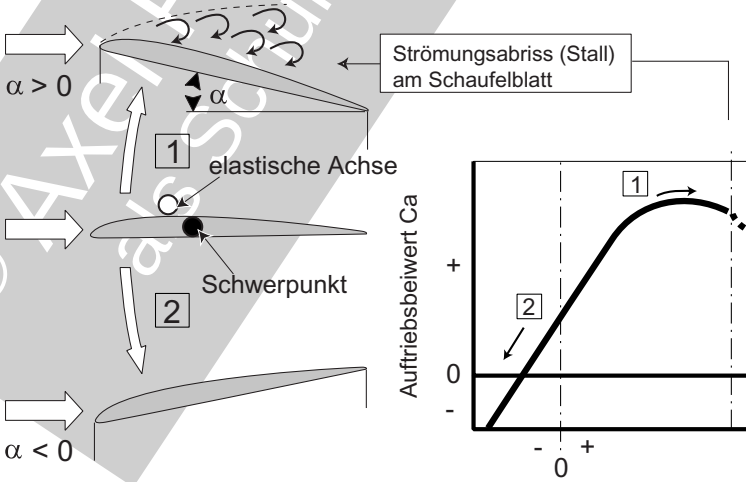
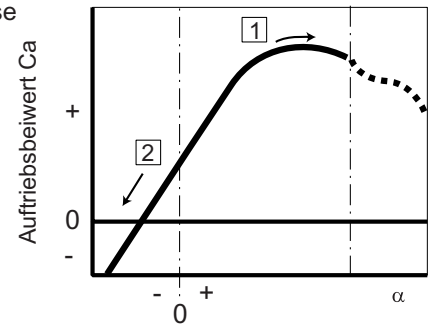


Bild 3-9.2

Flattern ist ein selbsterregender Vorgang, aus dem kaum mehr herauszukommen ist. Ein Versagen des Bauteils ist häufig die Folge.







Flattern einer Verdichterschaufel im Bereich der Abreißzone

© Axel Rossmann
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Spitzenspalts am Umfang. Das Schaufelprofil tordiert nicht nur bei einer ***Torsionsschwingung*** *(besonders gefährlich) sondern, wegen der Winkeländerung der Blattsehne, auch bei einer* ***Biegeschwingung.*** *Damit verändert sich der Anströmwinkel. Reicht die Aus-*

lenkung aus, kommt es zum Strömungsabriss („1“). Als Folge fällt die auslenkende Gaskraft ab. Das Bauteil schwingt elastisch zurück. So verringert sich der Anstellwinkel, die Strömung kommt wieder zum Anliegen („2“). Die Gaskraft (Auftrieb) baut sich erneut auf.
Es handelt sich also um eine Interaktion von mechanischen und aerodynamischen Kräften. Aus dem Flatterzustand herauszukommen ist schwer. Eine Druckabsenkung genügt in Strömungsmaschinen dazu gewöhnlich nicht. Dagegen ist eine Änderung der Zuströmgeschwindigkeit notwendig.
Die Auslenkung hängt auch von der ***Steifigkeit des gesamten Schwingungssystems*** *ab, dessen Element die eigentliche angeregte Komponente ist.*
Flattern tritt auf, wenn eine ***Flattergrenze*** *(es gibt entsprechend der Anregungsart mehrere Flattertypen) überschritten wird. Dieser Schwingungsvorgang ist in* ***Turbomaschinen*** *nicht nur auf Schaufeln von Axialverdichtern beschränkt. Auch Schaufeln von* ***Radialverdichtern*** *und* ***Turbinen*** *können zum Flattern angeregt werden. Wie die Beispiele zeigen, kann Flattern bei sehr unterschiedlichen Maschinen und selbst an* ***Bauwerken*** *(Flattern einer Leichtbau-Hängebrücke 1940) auftreten. Im dargestellten Fall handelt es sich um das seitlich angeströmte Doppel-T-Profil der Fahrbahn einer Hängebrücke.*
Bei ***Flugzeugtragflächen und Steuerflächen*** *(mittlere Skizze) liegt ein äußerst gefährlicher Zustand vor, der unbedingt zu vermeiden ist. Entsprechende Nachweise müssen bei der Entwicklung und Auslegung geführt werden.*

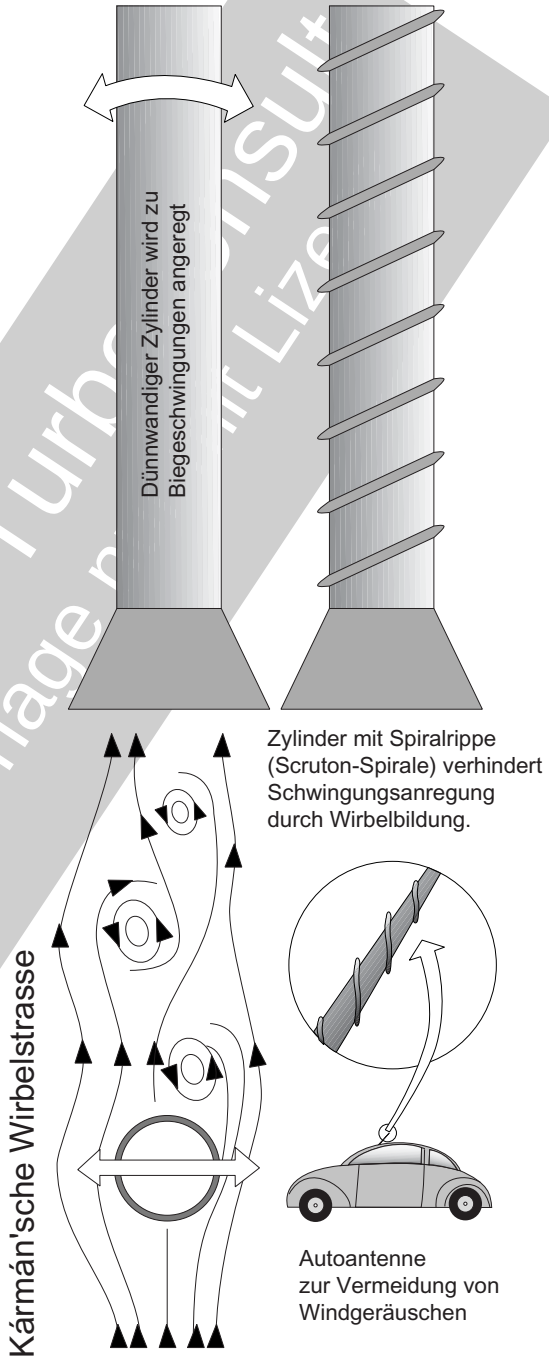


Bild 3-9.3

Merke:

Das ***Flattern einer Fahne*** *beruht lediglich auf einem rhythmischen Ablösen von Strömungswirbeln. Ein, einem steifen Profil vergleichbarer Auftrieb, liegt nicht vor. Der Vergleich mit einer Schaufel hinkt deshalb erheblich.*

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nicht Lizenz

Bild 3-9.3 *(Lit. 3-39 und Lit. 3-40): Unter bestimmten Strömungsbedingungen (Re-Zahl- bildet sich eine* ***Kármán'sche Wirbelstraße****. Dabei entstehen auf der* ***Leeseite eines stehenden Körpers,*** *hier einem Zylinder, zwei gegenläufige, sich* ***periodisch ablösende Wirbelblasen****. Ihre Ablösefrequenz wird von der Strouhal-Zahl bestimmt. Die Wirbelbildung erzeugt* ***Querkräfte*** *auf den Körper/Zylinder welche diesen auslenken. Im* ***Resonanzfall*** *kommt es zu gefährlichen* ***Biegeschwingungen****, dem aerodynamischen* ***Flattern****. Dieser Effekt wird auch für die Schwingungsanregung verantwortlich gemacht, die letztendlich die Tacoma-Brücke zum Einsturz brachte (Bild 3-9.2). Hier entstand die Wirbelstraße hinter den Seitenplatten der Brücke.*

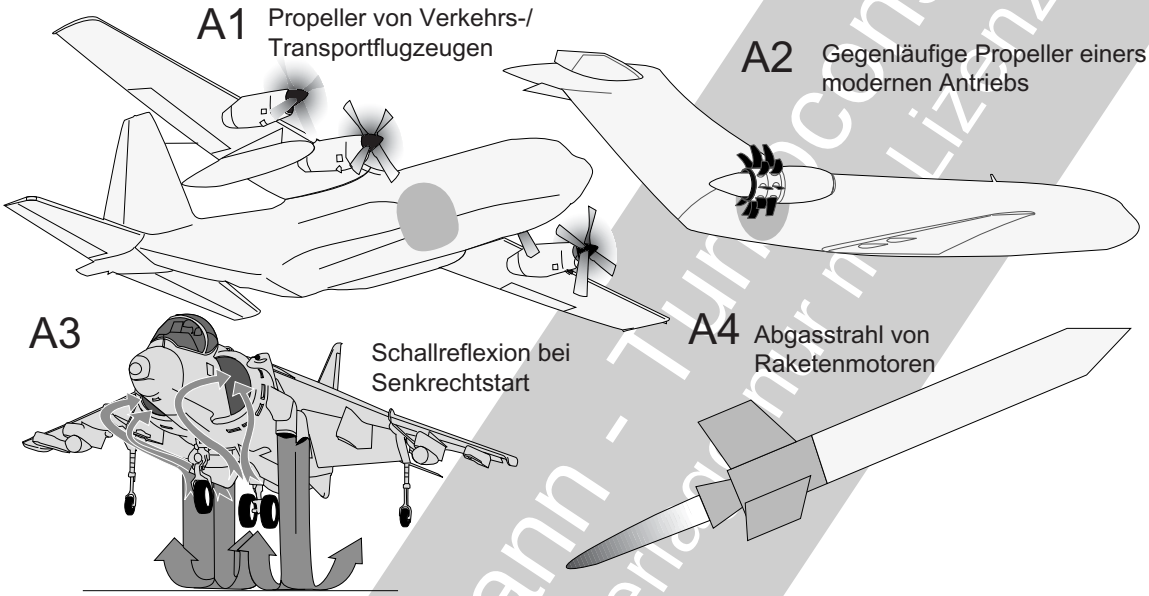
Bei Zylindern lässt sich eine gefährliche Wirbelerregung mit einer ***spiralig umlaufenden Rippe*** *(Wirbelbrecher, Scruton-Spirale) verhindern. Diese Konstruktion nutzt man bei leichten elastischen Bauten wie Kühltürmen und Kaminen. Bei* ***Dachantennen*** *von Autos unterdrückt man so lästige* ***Pfeiftöne****.*

Bild 3-10 *(Lit 3-13 und 3-41): Leichtbauteile sind wegen hoher Elastizität und geringem Strukturgewicht für hochfrequente* ***Schwingermüdung*** *empfindlich. Hierzu zählt die* ***Schallermüdung****. Sie führt zu Rissbildung bis zum Bruch. Betroffen sind besonders* ***Beplankungen von Flugzeugzellen****. Als Anregung dienen Schallschwingungen, d.h. hochfrequente Druckschwingungen der Luft. Die oberen Skizzen zeigen einige typische Beispiele bei denen Schallermüdung von besonderer praktischer Bedeutung ist (Lit. 3-24). Sie musste vom Konstrukteur berücksichtigt werden. Dazu gehört auch der Heckbereich von* ***Kampfflugzeugen mit Nachbrenner*** *(Bild 5.2.5-2). Oft hat erst die* ***Betriebserfahrung auf das Problem aufmerksam gemacht****. Besonders belastet sind* ***quer zur Propellerebene*** *angeordnete Flächen („****A1****"). Neue Entwicklungen hochtouriger, vielblättriger Propeller, insbesondere auch gegenläufige, dürften das Problem verschärfen (Lit. 3-14). Dies ist ein Grund, warum beim dargestellten Versuchsflugzeug die* ***Propeller am Rumpfende*** *(„****A2****") angebracht wurden. Auch* ***Senkrechtstarter*** *(„****A3****") haben sich als besonders schallermüdungsgefährdet gezeigt. Der heiße* ***Abgasstrahl*** *im Zusammenhang mit Reflexionen am Boden stellt eine besonders intensive Lärmquelle dar. Ähnlich sind die Abgasstrahlen von* ***Raketentriebwerken*** *(„****A4****") für den hinteren Teil der Rakete gefährlich. Wegen der hohen Schallfrequenz können kurze Brenndauern für einen Schaden ausreichen.*

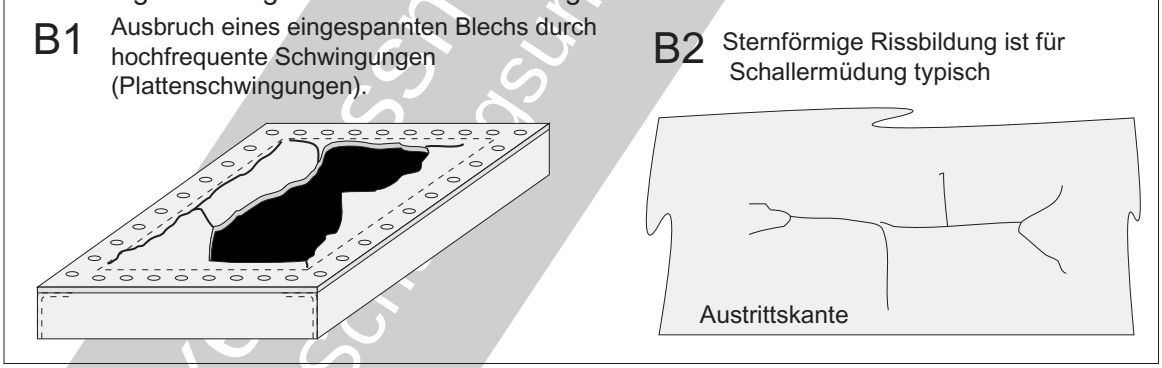
Mit etwas Glück und Fachkenntnis lässt sich von Rissen und Ausbrüchen auf Grund des ***Schadensbilds*** *auf Schallermüdung als Ursache schließen. Typisch sind verzweigte Risse („****B2****") und flächige Ausbrüche („****B1****") in dünnen Blechen (Plattenschwingungen). Die Empfindlichkeit gegen Schallermüdung lässt sich mit einer Optimierung der* ***Versteifungen*** *(Anordnung, Dicke) minimieren. In Extremfällen wurden sogar Flugzeugrümpfe mit aufwändigen Elementen zur Schallabsorption und sogar aktive Anordnungen ('Gegenschall') in Betracht gezogen und erprobt.*

© Axel Rossmann - Turbotours
als Schulungsunterlage nutzbar

Leichtbaustrukturen können auf hochfrequente Belastungen empfindlich reagieren, die im 'normalen Maschinenbau' nicht berücksichtigt werden.



Schwingermüdung durch Schalleinwirkung:



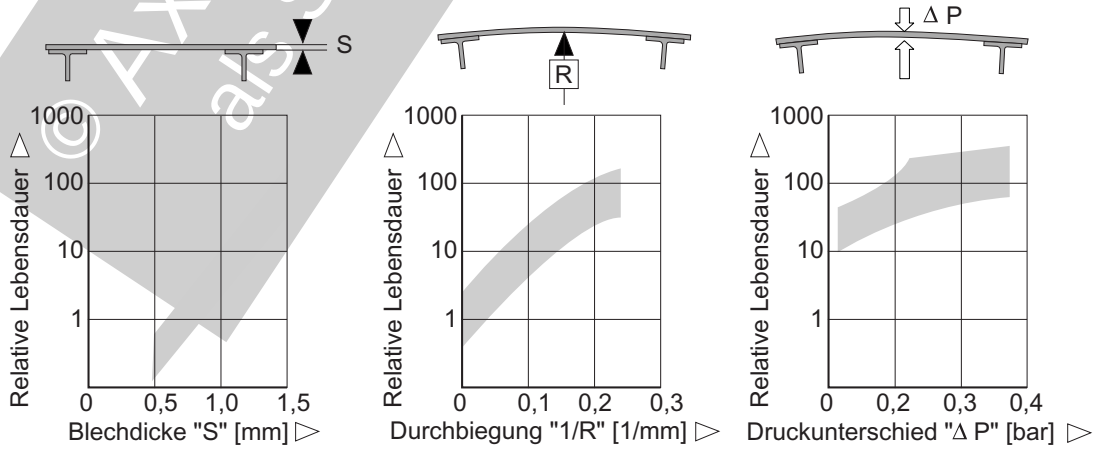
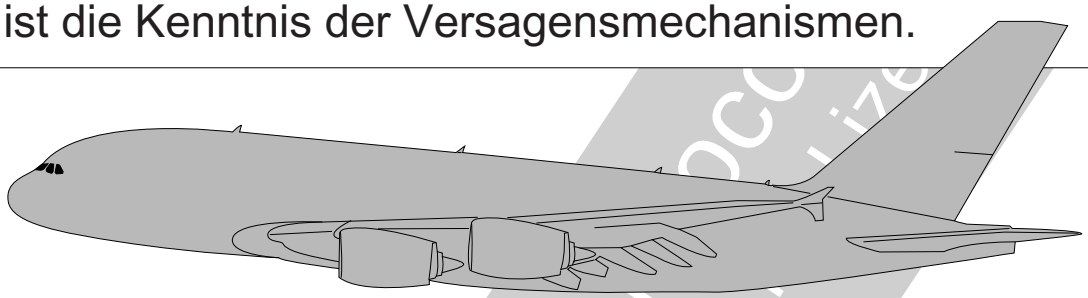


Bild 3-10

© Axel Aßmann - Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Im Leichtbau kommen zunehmend bisher im allgemeinen Maschinenbau unübliche Werkstoffe und Werkstoffverbunde zur Anwendung. Voraussetzung ist die Kenntnis der Versagensmechanismen.



Schichtverbunde aus Faserlagen (Aramid, Glas), Metall (Aluminiumlegierung)

Aramid **R**einforced **Al**uminium **L**aminate (ARALL)
Glass **A**luminium **Re**inforced Laminate (GLARE)

Lagenaufbau (symmetrisch)
eines Glare-Werkstoffs

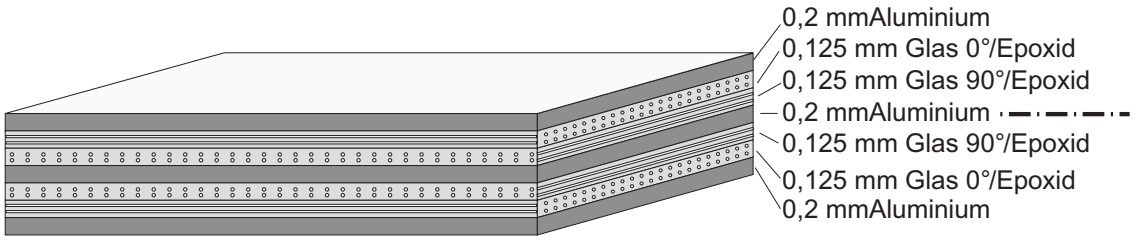


Bild 3-11

Bild 3-11 *(Lit. 3-26): Für die* ***Zellenbeplankung*** *eines modernen Großraum-Verkehrsflugzeugs wurde ein* ***Schichtwerkstoff*** *(GLARE) aus mehreren abwechselnden GfK-Lagen (Glasfaser-Kunststoff, engl. GRP) und Aluminiumblechen gewählt. Den Lagenaufbau mit Faserorientierung zeigt die untere Skizze. Die* ***Symmetrie*** *ist notwendig, um Verzug zu vermeiden. Die Steifigkeit (niedriger E-Modul) dieses Verbunds liegt unter der massiven Aluminiums. Für hochfrequente Schwingungen entsprechend einer Schallermüdung (Bild 3-10) ist jedoch die* ***innere Dämpfung*** *von besonderer Bedeutung. Auf diese Schwingermüdung hatten praxisvergleichbare Betriebseinflüsse wie Temperaturwechsel offenbar keinen nennenswerten Einfluss. Erstaunlicherweise zeigte sich der Lagenaufbau zumindest für Schallermüdung von untergeordneter Bedeutung. Dabei erwiesen sich Klebeverbindungen Nietverbindungen überlegen. Das* ***Fail-Save-Verhalten*** *(Bild 3-19) solcher Schichtstrukturen sollte nicht unterschätzt werden. Ist doch ein schnell fortschreitender Ermüdungsriss, wegen der Faserverstärkung und dämpfender Delaminationen, sicher nicht so gefährlich wie in einem homogenen Blech (siehe auch Bild 4.3-24).*

Bild 3-12 *(Lit. 3-2):* ***Unterschiedliches werkstoffspezifisches Versagen*** *ist in der Konstruktion zu berücksichtigen.*
Wird z.B. ein einseitig eingespannter ***metallischer Träger*** *mit aufgedicktem Einspannquerschnitt („****A1****“) statisch biegebelastet (Skizze oben links), erfolgt plastische Verformung und* ***Rissbildung quer zur zugbelasteten Oberfläche****. Ein Riss führt zu beschleunigtem Festigkeitsverlust und zum Bruch.*

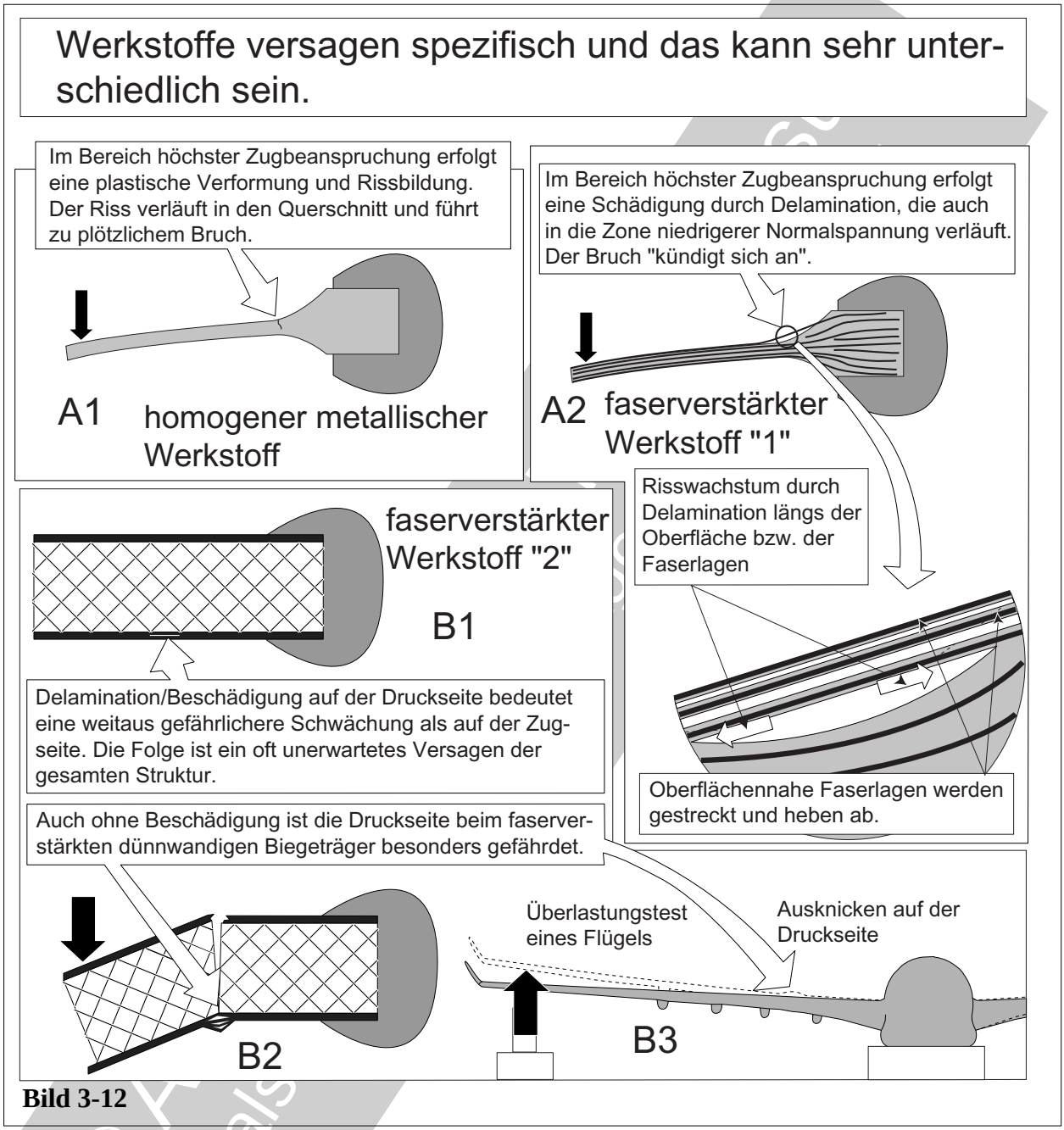


Bild 3-12

*Ein Biegebalken aus **faserverstärktem Kunststoff** (FVK, „**A2**“) mit einer **Verstärkung an der Einspannung** wird zwar in der gleichen Bauteilzone wie der metallische versagen. Der **Versagensmodus** läuft jedoch mit einem **Abheben oberflächennaher Lagen**, also einer **Rissbildung längs der Oberfläche ab**. Die besonderen Versagensformen fasertechnischer Strukturen lassen sich ebenfalls an **Holz** beobachten (Lit. 3-50). Hier kann die **Bionik** (Bild 3-24) dem Verständnis dienen und bietet Ansätze für die **Anordnung und Orientierung tragender Faserlagen**. Dabei ist der Zugfestigkeitsabfall vergleichsweise moderat, denn die delaminierten Faserlagen können Zugkräfte übernehmen. So **kündigt sich der Bruch rechtzeitig an und kann somit abgefangen werden.***

*Besonders gefährdet sind **hohle Biegeträger** („**B1**“) wie Sandwichstrukturen oder Rohre (z.B. Masten, Schistöcke) aus FVK. Sie sind empfindlich für ein **Aus-/Einknicken der Druckseite** (Lit. 3-38, („**B2**“)). Dies gilt*

Das Schlimmste was man einer Verbindung von Faserlagen bzw. einer Klebverbindung antun kann ist Schälung ("Fischbüchseneffekt").

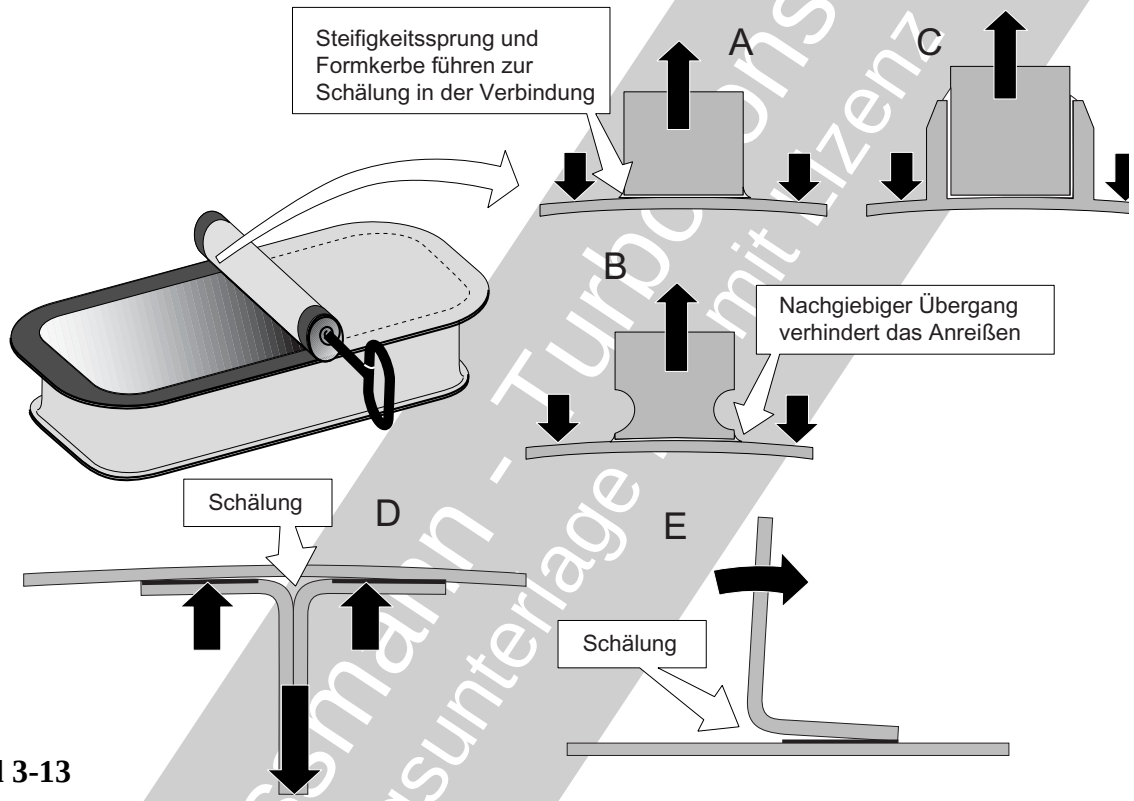


Bild 3-13

*besonders bei **örtlicher Beschädigung** und ist bei **Reparaturen** zu beachten.*
*„**B3**“ zeigt den Bruch eines **Flugzeugflügels** mit einer Beplankung aus faserverstärktem Kunststoff bei einer Überlastprüfung. Dabei versagt die druckbelastete Oberseite mit typischem Ausknicken (Lit. 3-38).*

***Bild 3-13** (Lit. 3-27):Das spezifische **Festigkeitsverhalten einer Lötung muss vom Konstrukteur berücksichtigt werden**.*
*Dabei ist besonders auf die Vermeidung einer **Schälbeanspruchung** („**Fischbüchseneffekt**“) zu achten. Es handelt sich um die Kombination von Biegung und Scherung. (Skizze oben). Diese Belastung ist nicht immer auf den ersten Blick zu erkennen. Er kann sich erst durch merkliche elastische und/oder plastische **Verformungen** ausbilden. Dafür sind Leichtbaustrukturen anfällig („D“ und „E“). Andererseits kann der Konstrukteur eine Elastizität auch nutzen, indem er im Bereich der Verbindung Steifigkeitssprünge vermeidet.*

***Gestaltungsbeispiele für Löt- und Klebeverbindungen:** Anzustreben sind möglichst **große Lötflächen die auf Schub beansprucht** werden („C“).*
*Müssen Lötungen auf Zug beansprucht werden, ist die Lötfläche zu vergrößern und darauf zu achten, dass keine Spannungserhöhungen durch **Steifigkeitssprünge** einwirken („B“). Auch **elastische Verformungen** während einer Zugbelastung dürfen **keinen Schäleffekt** auslösen („E“).*
*Falls nicht vermeidbar, ist der Schäleffekt mit einer **elastischen Gestaltung** zu minimieren („B“).*

© Axel Rossmann - Turbo Consult als Schulungsunterlage mit Lizenz

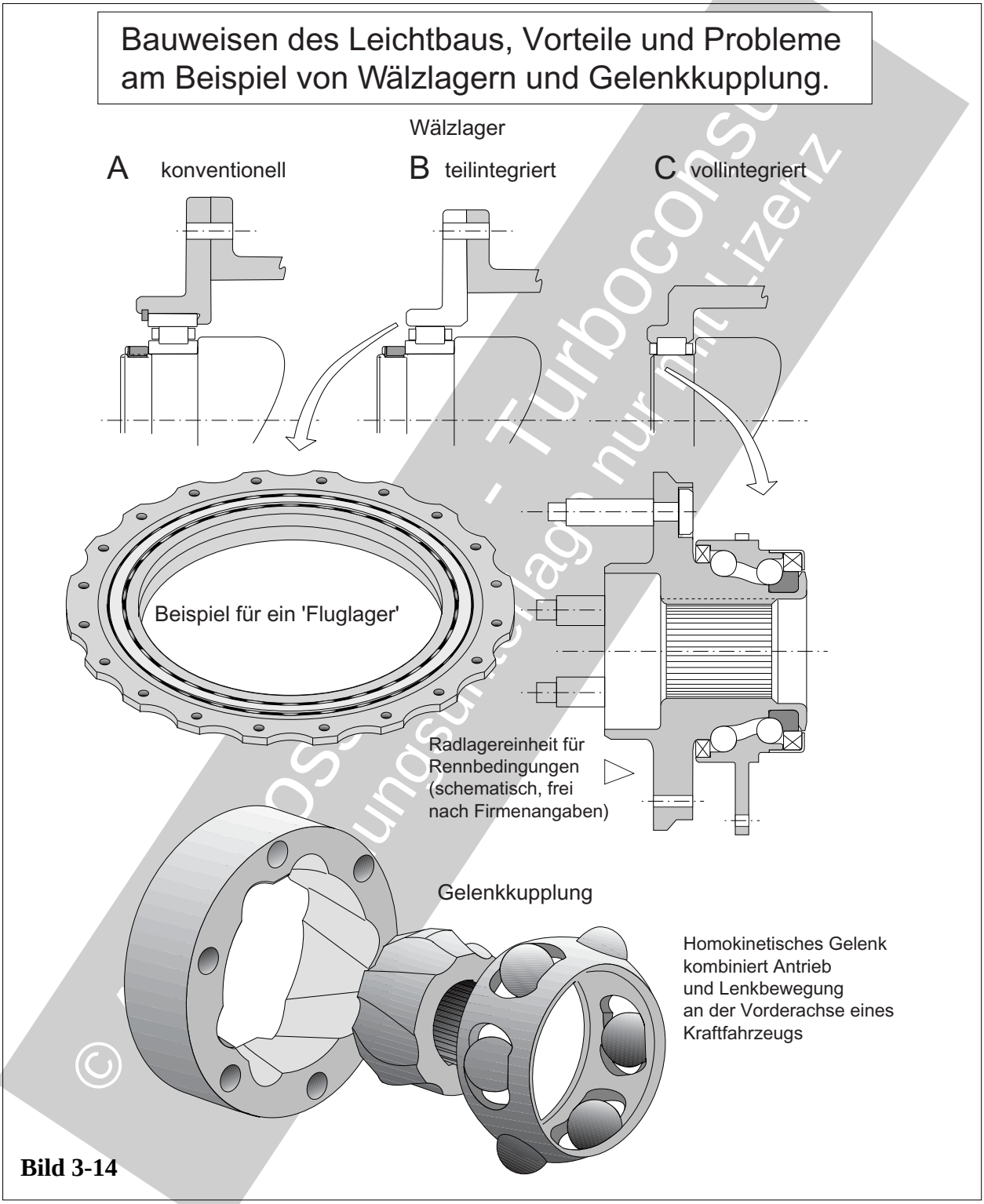


Bild 3-14

Bild 3-14 *(Lit.3-27): Auch* ***Wälzlagerungen*** *werden zum Leichtbau. Bei Radaufhängungen kommt man damit einer Forderung nach möglichst kleinen ungedämpften Massen entgegen. Im Flugtriebwerksbau ist die Gewichtsminimierung traditionell. Muss die Lagerung mehrere Aufgaben erfüllen wie Antriebs-, Brems- und Lenkkräfte aufnehmen, wird dies in komplexen Systemen verwirklicht (Skizze unten und Mitte rechts). Solche Lagerringe weisen komplizierte Geometrien auf, um die zusätzlichen Aufgaben zu übernehmen. Damit*

ist die für Wälzlager erforderliche höchste ***Werkstoffqualität*** *und die Gewährleistung der engen lagertypischen Maßtoleranzen eine Herausforderung. Die* ***Reparatur*** *solcher Teile ist gewöhnlich ausgeschlossen. Oft sind sie einem ganzen Belastungskollektiv ausgesetzt. Dazu gehören neben den Lagerkräften auch Korrosion und Verschleiß. Dies erfordert bei der Auslegung entsprechende Erfahrung und/oder einen anwendungsspezifischen Betriebstauglichkeitsnachweis.*

Bild 3-15 *(Lit. 3-3, Lit. 3-4 , Lit. 3-14 und Lit. 3-15): Leichtbau nutzt die Vorteile von* ***Verbundbauweisen****. Man findet nahezu alle denkbaren Kombinationen wie*

- ***Unterschiedliche Metalle****: Die Skizze oben links zeigt den Motorblock eines Kraftfahrzeugs. Die* ***Zylinderlaufbüchse besteht aus beschichtetem Aluminiumguss****. Sie ist in das Gehäuse aus einer* ***Magnesiumlegierung*** *eingegossen (Lit. 3-4).* ***Verschraubungen*** *zwischen den beiden Leichtmetalllegierungen bestehen* ***aus einer hochfesten Aluminiumlegierung*** *(Lit.3-7). Damit lässt sich eine* ***nutzbare Festigkeit*** *der Verbindung realisieren, die der mit Stahlschrauben sogar überlegen ist. Grund sind die besser abgestimmten Wärmedehnungen und Steifigkeiten (E-Moduli, Bild 3-4). Sie gewährleisten die sichere Schraubenvorspannung.*

- ***Metalle in Kombination mit keramischen Werkstoffen*** *findet man beispielsweise in* ***Schutzwänden gegen Durchschlag*** *(engl. Containment, Lit 3-28) energiereicher Teile wie Bruchstücke hochtouriger Zerspanungswerkzeuge (Skizze oben rechts, Lit. 3-3).*

Eine weitere Anwendung wird in Heißteilen von Motoren und Turbinen erprobt bzw. eingesetzt. Dazu gehören keramische Turboladerräder die mit einer Welle aus Vergütungsstahl gefügt sind (Bild 3-3). Die Skizze unten links zeigt eine keramische Turbinenleitschaufel mit einer metallischen Tragestruktur in lösbarer Hybridbauweise.

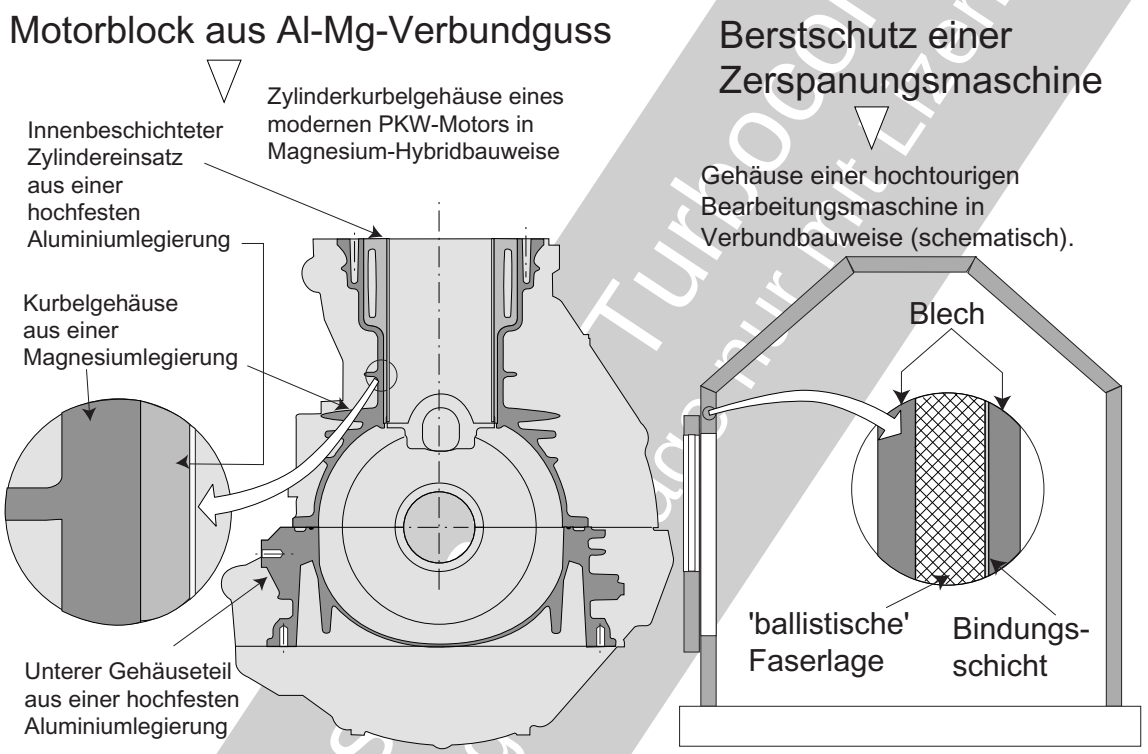
- ***Kunststoffe mit und ohne Faserverstärkung*** *zusammen mit* ***Metallen*** *findet man beispielsweise in Flugzeugen und Fahrzeugzellen und Kraftfahrzeugkarosserien. Typisch sind* ***Beplankungen*** *auf einem tragenden Metallskelett. Die Verbindung wird z.B. als Nietung oder untrennbar durch Einspritzen realisiert (z.B.* ***Stoßstangen****).*

- ***Faserstrukturen*** *(z.B. Gewebe)* ***mit monolithischen Keramiken.*** *Man nutzt diese als* ***ballistischen Schutz****, z.B. in* ***schusssicheren Westen****. Dabei übernehmen Keramikkacheln durch Zersplittern die Energieaufnahme am Ort. In den Faserlagen (Aramid - 'Kevlar') wirkt dagegen Reibung und Dehnung. Die Dehnung kann darunter liegende abstützende oder zu sichernde Strukturen noch hoch belasten.*

Eine besondere ***Problematik der Hybridbauweisen*** *aus* ***metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen****, insbesondere Keramiken, ist in der Skizze unten rechts dargestellt (Lit. 3-15). Es handelt sich um den* ***Kontaktbereich der Komponenten****. Unterschiedliche Wärmedehnung und Steifigkeit müssen mit geeigneten Konstruktionsprinzipien entschärft und sicher beherrscht werden.* ***Krafteinleitungen*** *dürfen wegen der Bruchgefahr spröde Werkstoffe nicht örtlich überlasten. Dies ist durch geeignete* ***Formgebung*** *der Kontaktfläche,* ***angepasster Steifigkeiten*** *tragender Querschnitte (Bild 3-3) und/oder* ***anformungsfähiger Zwischenlagen*** *zu gewährleisten. Auch chemische Vorgänge wie* ***Korrosion*** *oder* ***Reaktionen*** *(z.B. Siliziumkarbid mit Nickellegierungen bei hohen Temperaturen) müssen vermieden werden. Gleit- bzw.* ***Reibungseigenschaften*** *beeinflussen beispielsweise die* ***Spannungen*** *(Schub)* ***in Kontaktflächen*** *(Lit. 3-28).*

© Prof. Kessmann - TU München
Ausbildungsunterlagen nur zur privaten Nutzung

Der moderne Leichtbau nutzt häufig Verbundbauweisen.
Die Integration nichtmetallischer Werkstoffe in eine metallische Konstruktion ist eine besondere Herausforderung.



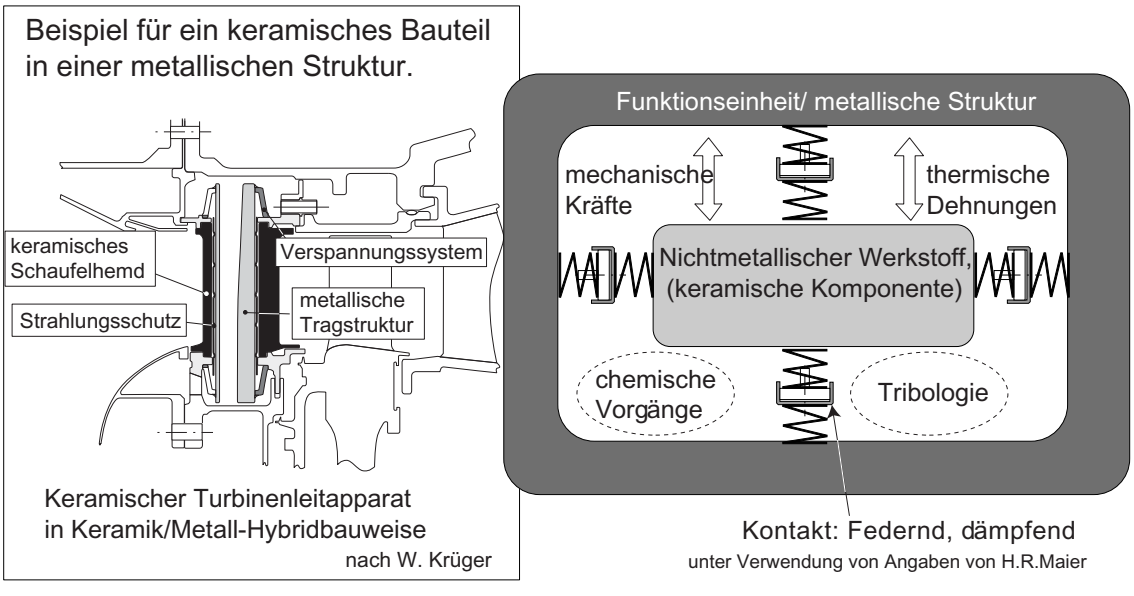


Bild 3-15

Bildbeschreibung vorhergehende Seite

Bild 3-16 *(Lit. 3-2): Anhand der Rotorscheibe des Verdichters eines Flugtriebwerks lässt sich die* ***Evolution des Leichtbaus*** *zeigen. Dieser Trend wird unterstützt, weil besonders in militärischen Anwendungen ein niedriges Gewicht höhere Priorität als minimale Bauteilkosten hat. Wie leicht zu erkennen, hat jede Bauweise Vor- und Nachteile.*

„A“ Konventionelle Bauart*: Die Schaufeln sind im Scheibenkranz in Nuten gehalten. Der Werkstoff von Schaufeln und Scheibe kann unterschiedlich sein und so den Betriebsanforderungen optimal angepasst werden. Z.B. Schaufeln aus FVK mit einer Scheibe aus einer Titanlegierung kombiniert. So besteht die Möglichkeit eines Austauschs von Schaufeln und/oder Scheibe. Bei geeigneter Gehäusekonstruktion (längsgeteilt) lässt sich dazu eine Halbschale vor Ort öffnen. Reibungsdämpfung an den Auflageflächen bietet einen gewissen Schutz vor Schwingüberlastung. Potenzieller Nachteil ist eine Schädigung hochbeanspruchter Auflagezonen durch Schwingverschleiß (Fretting, Bild 5.9.3-4). Andererseits schwächen die Schaufelnuten den Kranz. Deshalb ist dieser dicker, um im Nutbereich Tangentialspannungen aufzunehmen. So belasten höhere Fliehkräfte die Scheibe, die nun ebenfalls, besonders im Nabenbereich, aufgedickt werden muss.*

„B“ Integrale *(Scheiben-)* ***Bauweise*** *(engl. Blisk): Vorteil ist geringes Gewicht, weil der die Schaufeln tragende Kranz nicht von Nuten geschwächt wird. Dies minimiert das Gewicht im Nabenbereich. Die von den Ringstegen zu den Nachbarscheiben gebildete Hohlwelle hat so einen größeren Durchmesser, was die Steifigkeit erhöht. So verbessert sich das dynamische Verhalten des Gesamtrotors. Nachteil ist die fehlende Reibungsdämpfung an den Schaufelfüßen. Das erhöht das Risiko gefährlicher Resonanzschwingungen. Ein Tausch beschädigter Schaufeln ist nur begrenzt und in Spezialwerkstätten mit hochangepassten Verfahren möglich. Damit wird auch die Logistik komplizierter.*

„C“ Hybridbauweise *mit aufgesetzten Faserringen: Es handelt sich um einen Zwischenschritt von „B“ nach „D“. Sie befindet sich noch nicht im Einsatz. Die bei der integralen Ringbauweise zu erwartenden Probleme erscheinen deutlich gemildert. Insbesondere ist eine einfachere und zuverlässigere Qualitätssicherung der tragenden Faserringe in Fertigung und Überholung zu erwarten.*

„D“ Integrale Ringbauweise *(engl. Bling) befindet sich im Entwicklungsstadium. Um potenzielle Vorteile, insbesondere minimales Gewicht, zu realisieren, ist eine Hybridbauweise erforderlich. Dabei nutzt man integrierte oder aufgesetzte (hier nicht gezeigt) Faserringe. Das verspricht zusätzlich hohe Rotorsteifigkeit und innere Dämpfung zur Vermeidung gefährlicher Schwingungen. Demgegenüber steht eine sehr kostenintensive komplexe Fertigung. Zusätzlich ist die Qualitätssicherung und damit die Sicherheit in Fertigung und Betrieb (Überholung) nicht ausreichend geklärt.*

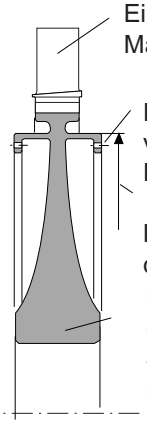
Bild 3-17 *(Lit. 3-23): Bauweisen mit einer* ***Vielzahl von Fasern oder Drähten*** *als tragendes Element bieten die Möglichkeit eines* ***Fail-Save-Verhaltens****. Das ist der Fall, wenn die kraftübertragende* ***Matrix*** *keine ausreichende* ***Festigkeit*** *und* ***Haftung*** *an den Fasern aufweist, um einen Querriss in diese zu leiten. Die einzelnen tragenden Filamente können jedoch brechen, ohne bereits die Sicherheit des Gesamtverbands akut zu gefährden. So besteht die Chance diese Schwächung rechtzeitig zu erkennen und das Teil auszutauschen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Der Trend zum "Leichtbau" ergreift den Maschinenbau immer mehr. Damit werden Erfahrungen aus den Luftfahrttechnologien wichtiger.

Die Evolution des Leichtbaus am Beispiel der Rotorscheibe eines Turboverdichters

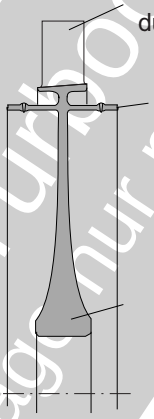
"A" Konventionelle Bauart



Vorteile:
- Reparaturfreundlich (Schaufeltausch, Scheibentausch)
- Schwinggedämpft
- Werkstoff von Schaufel und Scheibe optimal anpassbar.

Nachteile:
- Schwere Bauart
- Montageaufwand (Rotorverschraubung)
- Probleme des Schaufelfußes (Schwingverschleiß)

"B" Integrale Bauweise (Blisk)

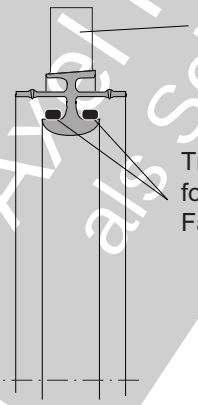


Vorteile:
- geringes Gewicht,
- großer Durchmesser (erhöhte Steifigkeit)

Nachteile:
- Ungedämpft
- Austausch von Schaufeln oder Scheibe aufwändig
- Reparatur anspruchsvoll und eingeschränkt
- Logistik komplizierter

Hybridbauweisen mit aufgesetzten tragenden ffasertechnischen Ringen

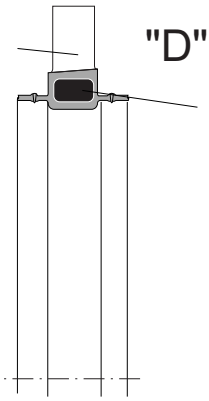
"C"



*) Nachteile gelten weniger für diese Bauweise mit aufgesetzten Ringen.

Integrale Ringbauweise mit integrierter Faserverstärkung (Bling)

"D"



Vorteile:
- extrem leicht
- hohe Rotorsteifigkeit
- Dämpfung
- großer Nabendurchmesser

Nachteile *):
- Komplexe Fertigung mit hohen Kosten
- Schwierige Qualitätssicherung
- Schlechte Überwachbarkeit einer Betriebsschädigung
- kein Schaufeltausch
- Reparaturprobleme

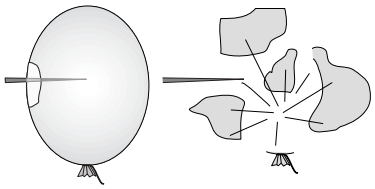
Bild 3-16

© Axel Rossmann - Turbomaschinen
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bildbeschreibung vorhergehende Seite

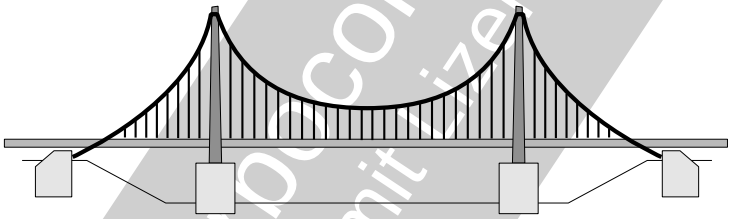
Probleme von Bauteilen aus einem homogenen Werkstoff bei gleichmäßig hochbelastetem Volumen.

- Ein Rissfortschritt beschleunigt stark und ist schnell, damit nicht beherrschbar
- Die nutzbare Festigkeit sinkt bzw. das Versagensrisiko steigt mit dem belasteten Volumen bzw. der belasteten Oberfläche.



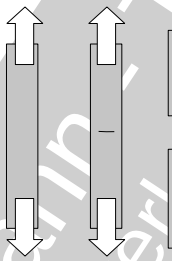
Leichtbau sollte "Fail Safe" Verhalten haben, Das erfordert Know How.
Hier verhindert ein Fleck Schnellkleber katastrophales Versagen.

Leichtbau hat bei der angestrebten möglichst hohen Belastung des gesamten Querschnitts spezifische Probleme.



Zugstab

Seil



Ein Problem des massiven Querschnitts: Unbefriedigendes Fail-Safe-Verhalten weil:

- Schneller Rissfortschritt,
- kaum abfangbar,
- katastrophales Versagen

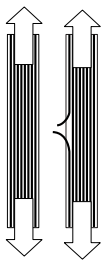


Bild 3-17

Dagegen ist eine Rissbildung in einem homogenen Werkstoff (Metall) bei schnellem ***Risswachstum,*** *insbesondere kurz vor und beim Restbruch, nicht ausreichend sicher abzufangen.*

Bild 3-18 *(Lit 3-2): Die* ***Konstruktionsphilosophie*** *spielt für* ***Rissverhalten und Versagensablauf*** *eine wichtige Rolle.*

- ***statisch bestimmte Bauweisen****, insbesondere wenn ein einziges Element die Betriebslasten überträgt, erscheinen zwar 'elegant' und sind der Rechnung gut zugänglich. Sie lassen aber meist wegen der Gefahr eines spontanen Versagens keine Risse zu. Solche Konstruktionen weisen kein* ***Fail-Safe-Verhalten*** *(siehe auch Bild 3-19) auf. Der Bruch eines tragenden Elements lässt das gesamte System sofort versagen. Risswachstum führt zu einem schnellen Belastungsanstieg im Restquerschnitt. Das beschleunigt den Riss zusätzlich. Nach relativ kurzer Betriebszeit, die ein rechtzeitiges Erkennen eher dem Zufall überlässt, kommt es zum Bruch mit katastrophalem Versagen. Hier muss sich die Lebensdauerauslegung auf die Inkubationsphase beschränken (Bild 4.3-1). Ein typisches Beispiel aus unserer Umgebung sind dreibeinige Varianten von Tischen und Stühlen (Skizze oben). Ein Wackeln, solange die drei Beine tragen, ist ausgeschlossen. Kommt es jedoch zum Bruch eines Beins, versagt das 'System' indem es unweigerlich umfällt.*

- ***Vielfach statisch unbestimmte Bauweisen*** *verhalten sich schadenstoleranter als statisch bestimmte. Da mehrere Elemente tragen, lagert sich bei Rissbildung und Bruch die Belastung um. So wird das geschädigte Element entlastet. Statische Unbestimmtheit entsteht z.B. wenn mehr als die unbedingt zur Kraftübertragung notwendigen Elemente daran beteiligt sind und/oder die Gelenkwirkung an den Knotenpunkten durch feste Verbindungen (z.B. Schweißungen) eliminiert ist.*

Bei vier Abstützungen steht ein Stuhl beim Bruch eines Beins durchaus noch. Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch bei drei Beinen er-

© Ad Rossum in TU Delft
Abschulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss von Konstruktionsphilosophien auf das Bauteilversagen bei Rissbildung.

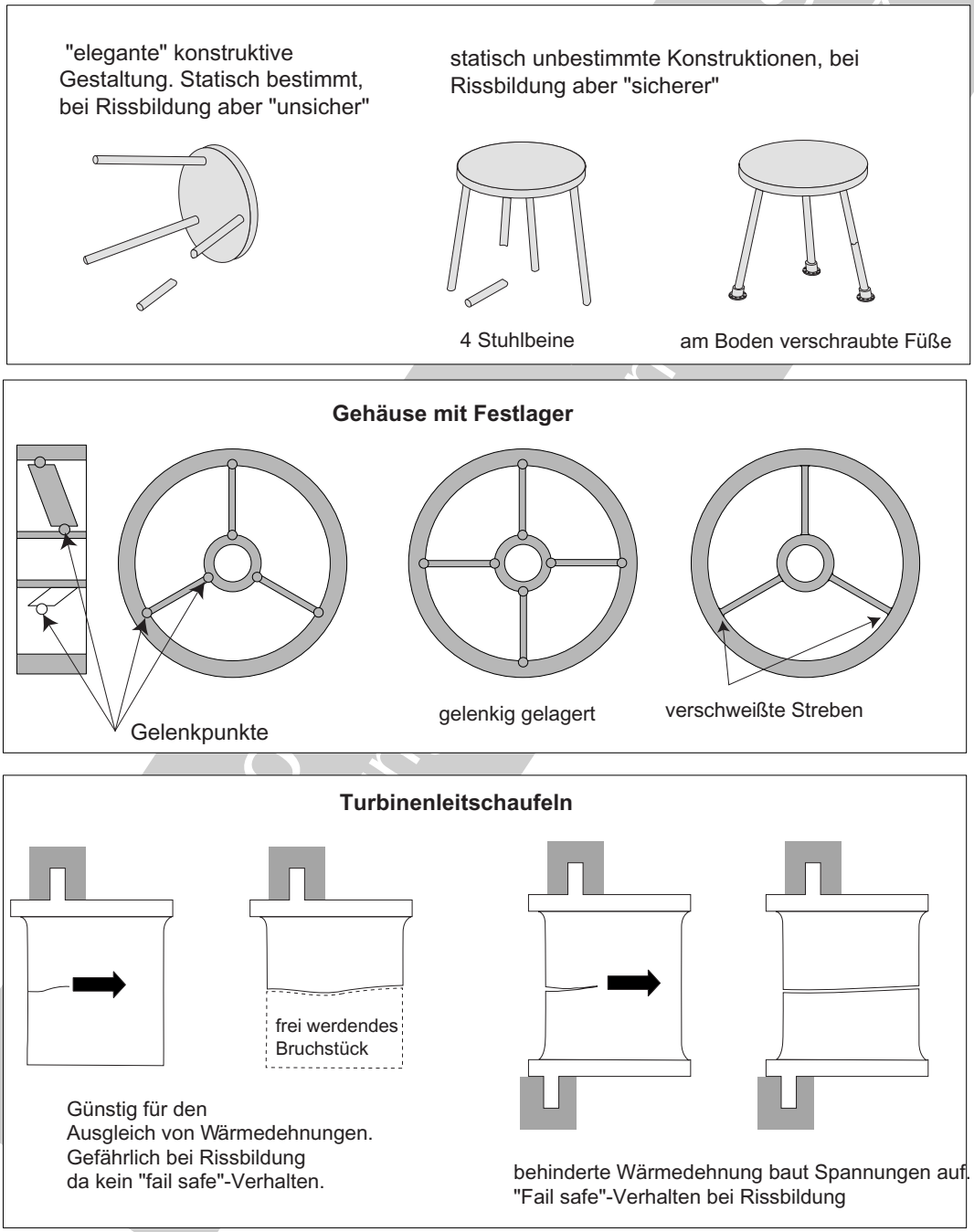


Bild 3-18

reichen, wenn diese fest mit dem Boden verbunden sind. Auch hier handelt es sich um eine statisch unbestimmte Variante. Bricht ein Bein, übernehmen die intakten Beine bei ausreichender Biegefestigkeit die Last.

In übertragenem Sinn lassen sich Lagerabstützungen in Gehäusen mit dem Beispiel des Stuhls vergleichen. Hier dürfte sich ein Strebenbruch bei den statisch unbestimmten Varianten durch Vibrationen und Anstreifvorgänge vor

einem katastrophalen Versagen bemerkbar machen.
Die untere Skizze zeigt am Beispiel einer Turbinenleitschaufel die ***Einflüsse der Befestigung auf den Schadensablauf****. Eine einseitige Befestigung entlastet zwar das Bauteil von Wärmespannungen. Bei einem Riss kommt es jedoch zum Abbrechen eines Blattstücks und umfangreichen Folgeschäden. Die rechte Variante führt zwar zu einer unübersichtlichen Belastung. Reißt das Blatt jedoch durch, ist nicht mit einem sofortigen Funktionsausfall und Folgeschäden zu rechnen. Eine Boroskopinspektion hat in diesem Fall die* ***Chance, den Schaden rechtzeitig zu erkennen****.*

Bild 3-19 *(Lit. 3-1): Im nebenstehenden Bild sind den Begriffen, die das sicherheitsrelevante Verhalten von Bauteilen beschreiben, typische Beispiele zugeordnet.*

Beispiel zu „Failsafety“:

Bei hochtourigen Werkzeugmaschinen besteht die Gefahr, dass Teile der rotierenden Spannvorrichtung oder das Werkstück abgeschleudert werden. Eine solche Situation kann auch bei Werkzeugen wie Fräsern oder Schleifscheiben auftreten (Lit. 3-14) . Der Begriff für das Auffangen solcher energiereicher Körper ist im englischen „Containing“. Meist wird durch besondere konstruktive Vorkehrungen, das sog. „Containment“ eine ausreichende Verstärkung des Gehäuses gegen Durchschlag erzielt.

Beispiel zu Fail Safe „1“:

Typisch sind Fehler, die in einem genau spezifizierten Bereich zulässig sind. Damit beeinflussen sie die Betriebssicherheit über den vorgesehenen Zeitraum nicht unzulässig. Solche Fehler sind z.B. Thermoermüdungsrisse in Turbinenleitschaufeln, wenn das Risswachstum sich typischerweise (Bild 5.4.2.1-2) verlangsamt und damit sicher beherrschbar ist.

Beispiel zu Fail Safe „2“:

Für diesen Fall ist das Rad eines Fahrrads ein schönes Beispiel. Der Bruch einer einzelnen Speiche macht sich wegen der ausreichenden Restfestigkeit durch Vibrationen und ein Anstreifen des Reifens am Rahmen bemerkbar. Auch ist der Ort des Schadens sofort erkennbar. Damit ist gewährleistet, dass es nicht zum Bruch der Felge und damit zum katastrophalen Versagen kommt.

Beispiel Fail Safe „3“:

Hierzu kann das Verhalten von Bauteilen zählen, die trotz einer erkannten Schädigung noch einen sicheren Betrieb zulässt. Versagen beispielsweise einzelne Drähte eines Spannseils (Bild 3-17) ist bei geeigneter Auslegung nicht mit dem spontanen Versagen des gesamten Querschnitts zu rechnen. Dabei macht sich günstig bemerkbar, dass der Bruch eines Drahtes nicht wie der Riss in einem homogenen Querschnitt die Reststruktur unkontrollierbar gefährdet (Bild 3-17).

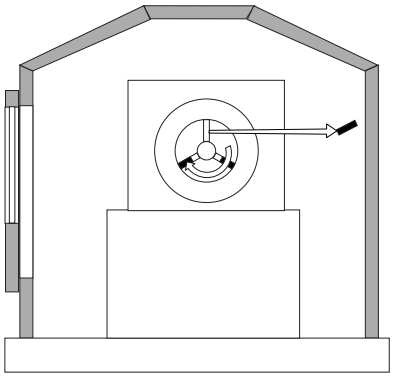
Beispiel zu „Fail Safe „4“:

Beim Bruch der Welle gibt die Turbine keine Leistung mehr an den Verdichter ab. Dadurch kann der Turbinenrotor innerhalb von Sekundenbruchteilen auf gefährliche Überdrehzahlen beschleunigt („Durchgehen“) werden. In einem solchen Fall darf es nicht zum Bersten des Rotors (dieser Vorgang wäre uncontained) oder zu einem unzulässigen axialen Versatz kommen. Es werden deshalb unterschiedliche konstruktive Maßnahmen ergriffen, um solche Gefahren auszuschließen. Wichtig ist, Überdrehzahlen beherrschbar zu begrenzen. Hierzu gehört eine geeignete aerodynamische Auslegung zusammen mit einer entsprechenden Berstsicherheit der Scheiben. Ein Abbremsen des Rotors bei gezieltem Kontakt mit dem Leitapparat (engl ‘Intermesh’, Lit 3-1) kann die Drehzahl ebenfalls effektiv begrenzen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

"Fail Safe", ein wichtiger Begriff mit unterschiedlichen Interpretationen und Realisationsmöglichkeiten.

verwandte Begriffe
englisch: Failsafety, Failure Tolerance, Damage Tolerance, Redundancy
deutsch: Schadenstoleranz, Redundanz

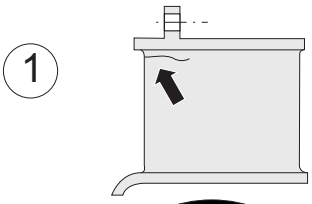


Was ist Failsafety bzw. Fail-Safe Verhalten?

Failsafety ist ein Konstruktionsprinzip, bei dessen Beachtung entstehende, teilweise oder totale Fehler und Schäden an einem Bauteil nicht zu einem katastrophalen Versagen des gesamten Gerätes führen.

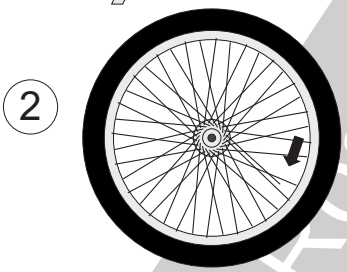
Beispiel: Schutz vor abfliegenden Teilen (Containment)

Failsafety bzw. Fail-Safe Verhalten lässt sich auf unterschiedliche Weise erreichen:



Fail-Safe (1):
bedeutet, dass eine beschädigte Struktur ihre Funktion weiterhin befriedigend erfüllt und keine katastrophalen Fehler oder Folgeschäden hervorruft, egal unter welcher Bedingung innerhalb des normalen Betriebsbereichs des Gerätes der Fehler entstand.

Beispiel: Turbinenleitschaufel

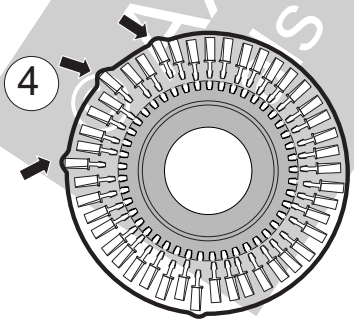


Fail Safe (2):
ist eine Konstruktion auch dann, wenn sich Fehler sicher erkennen lassen, bevor sie katastrophale Schäden anrichten können.

Beispiel: Fahrradspeiche

Fail-Safe (3):
ist eine Konstruktion nach MIL-Spec's der USA, wenn ein System fähig ist, 80% der ursprünglichen Auslegungslasten ohne Schaden auszuhalten, falls ein einzelnes Hauptelement des Systems beschädigt ist.

Beispiel: Tragseil



Fail-Save (4):
Ist eine Konstruktion nach den Gesichtspunkten der FAA, wenn durch Rechnung, Versuch oder beides nachgewiesen wird, dass ein katastrophaler Fehler oder eine übermäßige Verformung der Struktur, welche die gesamte Charakteristik des Gerätes maßgeblich beeinflussen könnte, nach einem Ermüdungsschaden oder einem einfachen Schaden an einer einzelnen Hauptstruktur nicht wahrscheinlich ist.

Bild 3-19

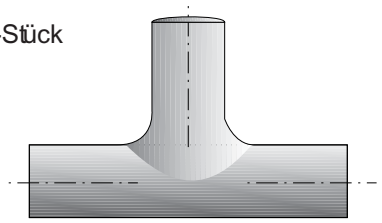
Beispiel: Bruch einer Turbinenrotorschaufel

© Axel Rossmann - Turbocons
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

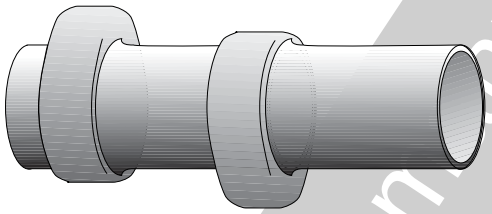
Bildbeschreibung vorhergehende Seite

Leichtbau erfordert form-und werkstoffangepasste Fertigungsverfahren. Dazu gehören 'neue' Form-gebungsverfahren, besonders für Hohlkörper.

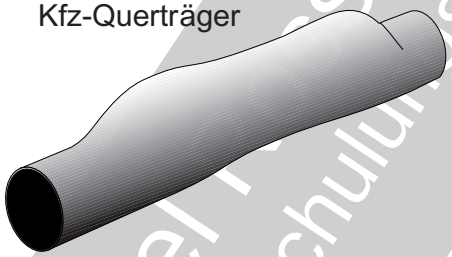
T-Stück



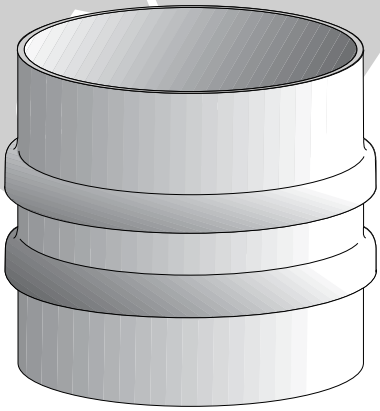
Teilstück einer gebauten Nockenwelle



Kfz-Querträger

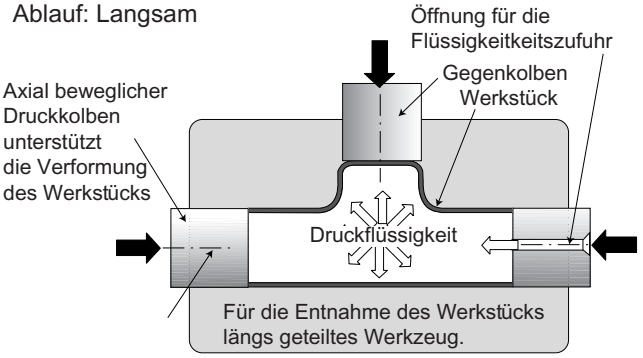


Hohlkörper mit Sicken



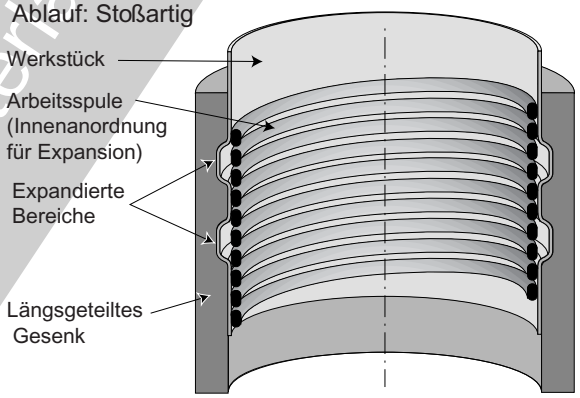
Innenhochdruck Umformung (Hydroforming)

Ablauf: Langsam



Magnetumformung (elektromagnetische Umformung)

Ablauf: Stoßartig



Umformung durch Unterwasserfunkenentladung

Ablauf: Stoßartig

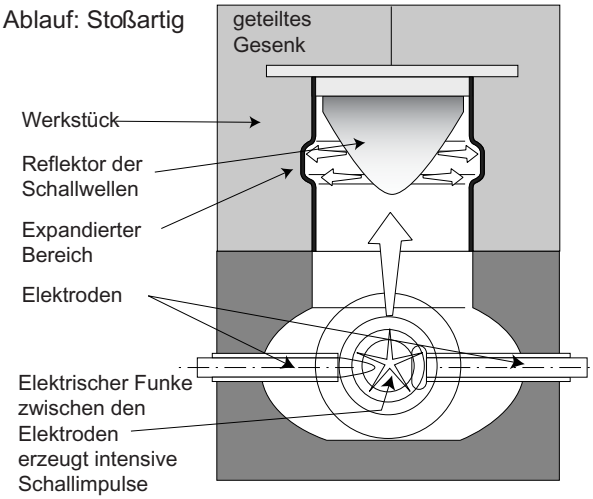


Bild 3-20

Bildbeschreibung nächste Seite

Bild 3-20 *(Lit. 3-8 bis Lit. 3-13): Leichtbaustrukturen finden immer mehr Eingang in den allgemeinen Maschinenbau. Häufig werden* ***aus Vollquerschnitten Hohlstrukturen für die notwendige Steifigkeit****. Dazu sind angepasste Sonderverfahren oder neue Fertigungsverfahren erforderlich.*

- ***Umformtechniken****: Hydroforming (Skizze oben rechts), Magnetumformen (Skizze Mitte rechts), Umformen mit Leistungsschallimpulsen (Funkenentladung, Skizze unten rechts).*

Bei einer Kaltumformung lässt sich gleichzeitig die Werkstofffestigkeit steigern (Kaltverfestigung).

- ***Schweißverfahren****: Elektronenstrahlschweißen, Laserschweißen, Diffusionsschweißen, Reibschweißen (Lit. 3-27).*

Solche Verfahren erfordern oft aufwändige bauteil- und werkstoffspezifische Anpassungen/ Optimierungen.

Bild 3-21 *(Lit 3-30 bis 3-33 und Lit. 3-35): Keramik insbesondere als hochfeste* ***Strukturkeramik*** *(Konstruktionskeramik, Bild 3-22) ist zu einem wichtigen Konstruktionswerkstoff mit großem Zukunftspotenzial geworden. Einem Einsatz in Großserie stehen in einigen Fällen noch die im Vergleich zu metallischen Bauteilen* ***hohen Herstellungskosten*** *(Rohteil und Nachbearbeitung) sowie die problematische* ***zerstörungsfreie Qualitätskontrolle*** *entgegen. Dies wird aber mit* ***Rohmaterialkosten****/-verfügbarkeit und der Forderung nach höheren* ***thermischen Wirkungsgraden von Kraftmaschinen*** *günstiger. Eine Rolle spielen werkstoffspezifische Eigenschaften, die sich vorteilhaft mit einer* ***angepassten Konstruktion*** *nutzen lassen.*

- Geringe Wärmedehnung.
- Korrosionsfestigeit, Oxidations- und HGK-Festigkeit.
- Gleiteigenschaften, Notlaufeigenschaften wie fehlende Fressneigung,
- Verschleißfestigkeit,
- Geringe Dichte, ca. 35 % konkurrierender Metalle.
- Festigkeitseigenschaften im Bereich der Metalle.

Warmfestigkeit, Temperaturbeständigkeit, hohe Steifigkeit (E-Modul).
Hohe Härte.

Doch Keramiken haben auch ***Nachteile****. Sie müssen bekannt und verstanden sein, um eine Konstruktion vor Schäden und Problemen zu bewahren. Allgemein gilt:*

Herstellung des Rohteils *ist im Gegensatz zur Anschauung (Kaffetasse, Sanitärkeramik) oft sehr aufwändig. Die Verfahren müssen bauteilspezifisch entwickelt werden, um die geforderte Qualität (z.B. entsprechende Proben) gewährleisten zu können.*

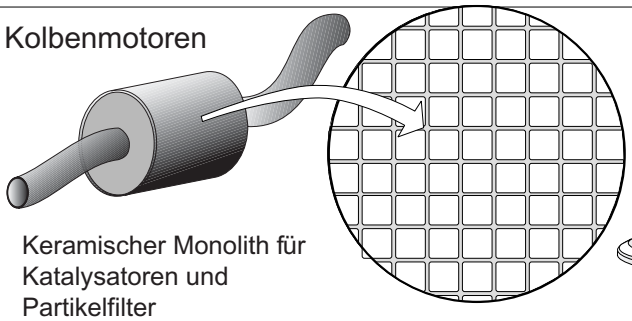
Nachbearbeitung*: 'Zerspanend' ist in vielen Fällen nur mit Diamantwerkzeugen möglich. Dabei besteht die große Gefahr einer unbemerkten Schädigung der Bearbeitungsfläche.*

Fortsetzung Seite 3-36

© Axel Rossmann - Turbomotor
als Schulungsunterlage nur mit Genehmigung

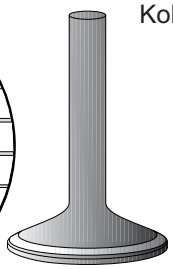
Keramische Bauteile sind auch Leichtbaukomponenten.

Kolbenmotoren

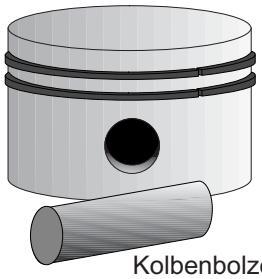


Keramischer Monolith für
Katalysatoren und
Partikelfilter

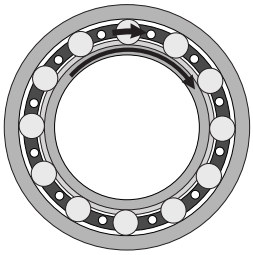
Kolben, Kolbenringe



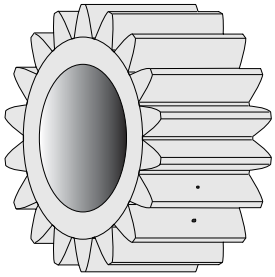
Ventile



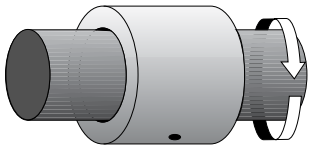
Kolbenbolzen



- Hybridlager (Wälzkörper keramisch)
- Vollkeramiklager

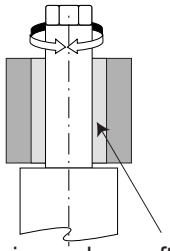


Getriebe
Zahnradpumpen



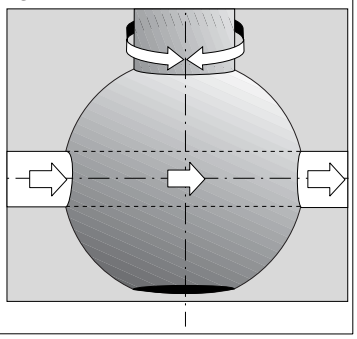
- Gleitlager (korrosive Medien, schlechte Schmierung)
- Luftlager

Schwenklager

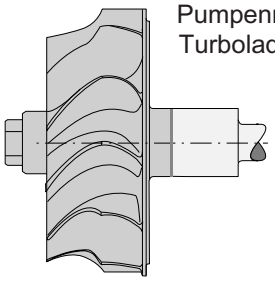


eingeschrumpfte
Keramikbuchse

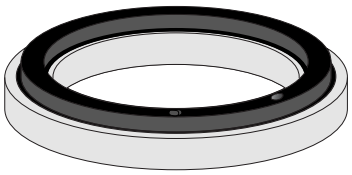
Schieber
Kugelhähne

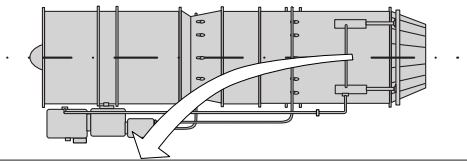


Pumpenräder
Turbolader

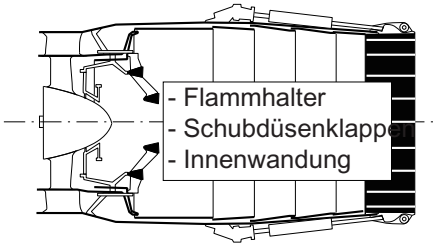


Gleitringdichtungen



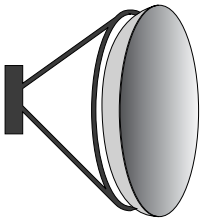


Schnitt durch den Nachbrenner



Luft- und Raumfahrt

Teleskopspiegel



Raketendüsen

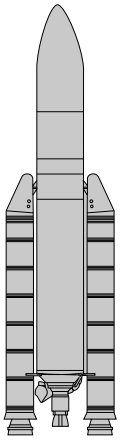


Bild 3-21

Fortsetzung von Seite 3-31

Dies kann zu einem gefährlichen Abfall der Festigkeit führen.

***Qualitätssicherung**: Je höher die genutzte Festigkeit, umso kleiner sind kritische Fehler (Bild 5.2.1-9 und Bild 5.2.1-10). Diese sicher auszuschließende Fehlergröße liegt gewöhnlich deutlich unter der Nachweisgrenze seriengeeigneter zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP, Lit. 3-30, Lit. 3-31 und Lit. 3-33). In einem solchen Fall bleiben nur sog. Proof-Tests. Dabei wird das Bauteil betriebsrelevant belastet. Das kann sehr anspruchsvoll sein, z.B. bei Turbolader- oder Pumpenrädern. Eine Qualitätssicherung durch Festschreibung der Herstellungsparameter ist denkbar. Es besteht jedoch die Gefahr, dass diese sich unerkannt verändern oder wichtige Einflüsse aus fehlender Erfahrung nicht überwacht werden.*

***Festigkeit**: Die Festigkeit spröder Werkstoffe, insbesondere von Keramiken ist je nach Anrisslage volumen- oder oberflächenabhängig (Bild 5.2.1-10). Dies ist in der Auslegung zu berücksichtigen und erfordert entsprechende 3D-Berechnungen mit realistischen Annahmen der höchsten Betriebsbeanspruchungen. Dabei sind auch kurzfristige Vorgänge (z.B. Thermoschock, Bild 5.4.2.1-3) zu berücksichtigen.*

***Steifigkeit**: Strukturkeramiken weisen im Vergleich zu Stählen einen hohen **E-Modul** auf. Deshalb können keramische Bauteile bereits kleine Dehnungsunterschiede schlecht ausgleichen und werden überlastet. Besondere Vorsicht ist bei schnellen **Thermowechseln** (steilen Thermo/-**Spannungsgradienten**, Bild 4.3-11) geboten.*

*Die **Dichte** hochfester porenfreier Keramiken liegt um 3g/cm^3 und ist deutlich niedriger als von Stählen. Damit ist ihre **spezifische Festigkeit** (Reißlänge) als Verhältnis von Festigkeit zu Dichte durchaus mit Metallen vrgleichbar. Dies ist besonders für, von Masskräften (Fliehkräfte, Beschleunigungen) sich selbst belastende Bauteile (Rotoren, Kolben, Ventile) wichtig.*

***Versagensmechanismen**: Je höher die angelegte Zugspannung, umso kleinere **Bruchstücke** entstehen (Bild 4.4-9). Dabei wird Energie verzehrt. Das macht man sich z.B. bei **schusssicheren Westen** (Bild 5.2.2-5) und **Berstschutz** zu Nutze (Bild 3-15 und 5.2.2-7).*

***Anwendungsbeispiele**:Hier können nur einige Beispiele behandelt werden. Keramiken sind jedoch in den unterschiedlichsten Bereichen bereits im Serieneinsatz. Ein Beispiel ist die Prozesstechnik (Lit. 3-32 und Lit. 3-37) und chemische Anlagen wo die Korrosionsfestigkeit im Vordergrund steht.*

***Motorenkomponenten** (Rahmen oben): Hier bieten sich besonders Bauteile an, deren Beanspruchung deutlich von eigenen **Massenkräften**, d.h. der Dichte, beeinflusst werden. Dazu gehören Ventile und Kolben. **Ventile** aus SSN wurden erfolgreich in **umfangreichen Langzeittests** in Kraftfahrzeugen erprobt. Auch hier standen offenbar die Kosten der Serienanwendung entgegen. Bei Kolbenbolzen kann die hohe Steifigkeit, d.h. eine geringe Durchbiegung, sich je nach Konstruktion positiv oder negativ auswirken. Aufgabe ist bei solchen Massenprodukten die **Qualitätssicherung** unter **statistischen Gesichtspunkten** (Bild 3.3-3). Herausfordernd ist die **Integration in/mit metallischen Strukturen**. Hauptproblem sind bisher die Herstellungskosten.*

***Elemente/Komponenten** des allgemeinen Maschinenbaus (Rahmen Mitte): Man wählt Keramiken mit jeweils vorteilhaften, anwendungsspezifischen Eigenschaften. Bei **hochtourigen Wälzlagern** sind die guten Notlauf- und Verschleißeigenschaften sowie die niedrige **Fliehkraft der Wälzkörper** interessant. Hybridlager haben konventionelle Laufringe und keramische Wälzkörper. Die gesamte **Formgebung der Kontaktflächen** und die Kinematik muss den Unterschieden in der Steifigkeit von Stahl und Keramik angepasst werden.*

***Zahnräder** bieten sich für Getriebe und Zahnradpumpen an. Geeignet ausgewählte **Keramik neigt nicht oder wenig zum Fressen** (Kaltverschweißen, Kapitel 5.9.2), und dürfte so Mangelschmierung tolerieren. Problema-*

© Aachen Resonanz - Turbocons
als Supplement zur mit LRZ

*tisch dürften **stoßartige,** bruchgefährdende Belastungen sein. In Pumpen, z.B. für die Dosierung von Medikamenten oder Kosmetik, kann fehlender, **toxisch** bedenklicher **Metallabrieb** den Einsatz von Keramik nahelegen. Für **Pumpen** und Ventile aggressiver Medien lässt sich die hohe Korrosionsfestigkeit der Keramik nutzen.*

***Katalysatorträger und Partikel-/Rußfilter** im Abgasstrom von Fahrzeugmotoren sind überwiegend stranggepresst/extrudiert. Es handelt sich um dünnwandige Strukturen mit Längskanälen (Wabenkörper/Monolith). Sie bestehen aus porösen Keramiken.*

***Katalysatorträger**: Hier besteht der Wabenkörper aus gesinterter, poröser Cordierit-Keramik. Es handelt sich um ein komplex aufgebautes Silikat. Dies trägt eine poröse, katalysierende, keramische Beschichtung (Al_2O_3, Washcoat) mit eingelagerten Edelmetallen. Der Werkstoff hat eine **extrem geringe Wärmedehnung**. Das gilt es gegenüber tragenden Metallstrukturen durch **ausreichende Elastizität, Abstimmung der Wärmedehnungen sowie nachgiebige Zwischenschichten** zu beherrschen. Bei Temperaturen über 1200°C besteht die Gefahr des Ausschwitzens einer Schmelze.*

***Partikel-/Rußfilter:** Kommen bei Dieselmotoren zum Einsatz. Der Monolith besteht in Abgasanlagen von Kraftfahrzeugen meist aus porösem (Porengröße ca. 10 µ) **Siliziumkarbid**. Man unterscheidet zwei Abscheidungsprinzipien. Beim **Wandstromfilter** strömt das Gas durch die Wandporen, beim **Durchflussfilter** durch die Längskanäle.Der Filtereffekt entspricht nicht einem Sieb. Er beruht anfangs auf einer **Oberflächenfiltration**. Dann folgt eine **Tiefenfiltration** mittels Adhäsion. Dabei nutzt man die Diffusion der Partikel in oder an der Filterwand. Ist der Strömungswiderstand zu hoch, erfolgt eine **Regeneration** durch Oxidation des Rußes ('Freibrennen'). Dabei auftretende **Temperaturspitzen** müssen vom Konstrukteur berücksichtigt werden.*

***Gleit- /Schwenklager** können neben der Notlaufeigenschaften eine bis zu hohen Temperaturen niedrige Reibung nutzen. Dies führt zur Serienanwendung in Regelventilen ('Wastegate') von Turboladern.*

*Um die Lagerbüchsen (Al-Oxid) ausreichend **thermoschockbeständig** zu machen, müssen diese unter **Druckspannungen** stehen. Dazu werden sie in Bohrungen des metallischen Bauteils **eingeschrumpft**.*

*Keramische **Wellen** von Gleitlagern können z.B. eine materialspezifische Schmierung mit Wasser statt Öl erlauben. Neben den Notlaufeigenschaften lässt die geringe Wärmedehnung enge Schmierspalte zu. Damit kann man über die Schmierung eines Turboladers mit Kühlflüssigkeit nachdenken. Auch für **Luftlager** bieten sich die genannten Eigenschaften an.*

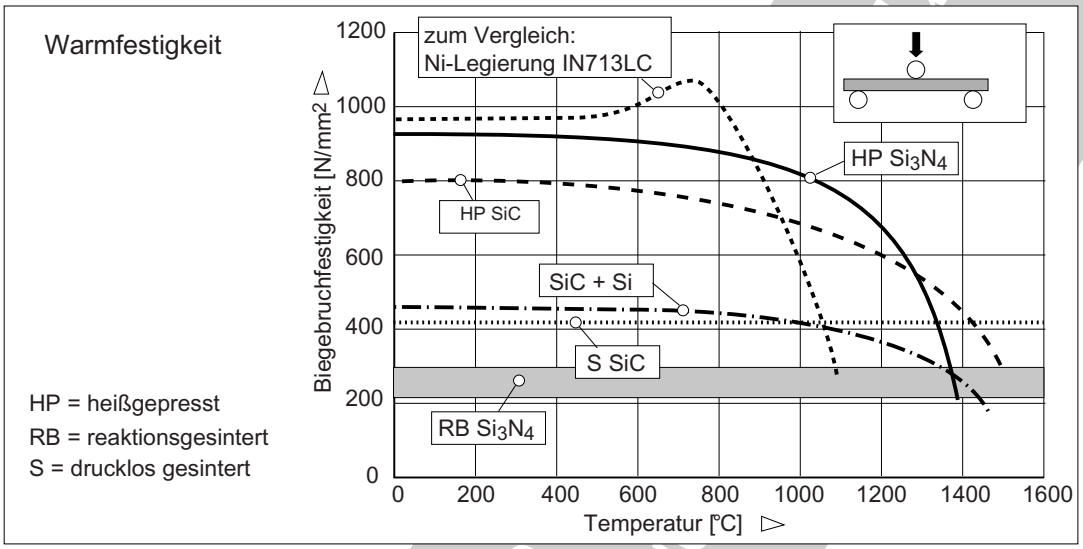
*Die großtechnische Anwendung haben **Dichtungen** längst erreicht. Es handelt sich um Gleitringdichtungen und Dichtscheiben in Wasserhähnen mit keramischen Dichtflächen .*

***Turbolader** wurden bereits zumindest zeitweise in Großserie hergestellt und eingesetzt. Man nutzte das geringe **Trägheitsmoment,** um das sog. Leistungsloch zu minimieren. Problematisch sind die Herstellungskosten.*

***Anwendungen in Luft- und Raumfahrt**:Hier wurden Erprobung und Einsatz bekannt. Es handelt sich offenbar um Bauteile mit deutlich **eingeschränkter Lebensdauer**. In allen Fällen sind es SiCSiC-Werkstoffe (Bild 3-22) mit **Langfasern**. Wegen der Herstellungstechnik beschränkt man sich in erster Linie auf dünnwandige Strukturen. Solche werden in **Hybridbauweise auf tragende Metallstrukturen genietet** (!). Das zeigt die große nutzbare Schadenstoleranz des Faserwerkstoffs. Bekannt wurden Schubdüsenklappen an einem militärischen Triebwerk. Nicht durchbeschichtete Kohlefaserstrukturen lassen bei hohen Temperaturen mit Sauerstoffzutritt (Verbrennungsgase) **nur kurze Lebensdauern erwarten**. Grund ist eine Rissbildung im Betrieb, was auch ein 'Verbrennen' innen liegender C-Fasern möglich macht.*

© Werkstoffkunde - TU Dortmund
Nur zur Verwendung im Unterricht

'Konstruktionskeramiken'.



Kenngrößen zur Abschätzung des Einsatzpotenzials

Werkstoffname	Kürzel	Grenz-temp. °C	K_{1C} $MN/m^{3/2}$
„Nitride“			
· reaktionsgebundenes Si_3N_4	RBSN	1300	2 - 3
· heißgepresstes Si_3N_4	HPSN	1200	6 - 8
· drucklos gesintertes Si_3N_4	PSSN (SSN)	1200	≈ 5
„Karbide“			
· heißgepresstes SiC	HPSC	1400	
· drucklos gesintertes SiC	PSSC (SSiC)	1400	3,5
· Si - infiltriertes SiC	SiC - Si (Si SiC)	1200	3,5
„Oxide“			
· Aluminiumoxid Al_2O_3	'Korund'	1800	
· Zirkonoxid ZrO_2	PSZ	1700	~ 8
· Glas SiO_2	(Quarz)	1300	
· Mischkeramiken aus Si, Al, O, N	engl.'Sialon'	1200	
· Aluminiumtitanat			
zum Vergleich:			
Vergütungsstahl			~ 100
Kugellagerstahl			~ 30

Bild 3-22

Bild 3-22 *(Lit 3-30 bis 3-33 und Lit. 3-35)* ***Auswahl wichtiger Strukturkeramiken:***

Siliziumcarbid *(SiC) entsteht in der gesinterten Form (SSiC) aus SiC-Pulver mit* ***Sinterhilfen****. Es zeichnet sich durch seine bemerkenswerte Warmfestigkeit bis zu hohen Temperaturen aus. Problematisch sind dabei jedoch* ***Glasphasen*** *auf den Korngrenzen, die von der Sinterhilfe gebildet werden. Sie sind ein Grund für eine* ***Zeitabhängigkeit der Warmfestigkeit*** *(Zeitstandeffekt, Bild 5.3.2-3). Bei* ***Feuchtig-***

© Axel Kossmann
als Schulungsunterlage

keitszutritt *(Raumtemperaturbereich) unter hoher Zugbeanspruchung (Biegung) dürfte die Gefahr eines* ***unterkritischen Risswachstums*** *bestehen (Bild 5.6.3.1.1-8). Der Werkstoff hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit und ist elektrisch leitfähig. Oberhalb von ca. 1400 °C kommt es jedoch zur merklichen Oxidation (CO_2-Bildung). Das Bauteil* ***löst sich gasförmig*** *auf. Ein weiteres Problem entsteht bereits bei relativ niedrigeren Temperaturen (um 1000°C) durch Reaktion* ***mit Ni-Legierungen****. Das erschwert die* ***Integration in metallische Strukturen****. Hinzu kommt ein hoher E-Modul. Diese* ***Steifigkeit*** *vergrößert zusammen mit einer gegenüber anderen hochfesten Keramiken* ***niedrigen Bruchzähigkeit*** *diese Problematik.*

Silizium infiltriertes SiC*: Man unterscheidet mehrere Werkstofffamilien. Diese Werkstoffe kommen bereits zum Einsatz oder stehen davor.*

Monolithischer Werkstoff *SiSiC, bei dem ein porös gesinterter SiC-C-Körper in einer Si-Schmelze infiltriert wird. Es ist im Endprodukt mit ca. 10% freiem Silizium zu rechnen.*

Besonders interessante Eigenschaften weisen ***faserverstärkte Varianten*** *auf. Sie sind deutlich schadenstoleranter und* ***thermoermüdungsresistenter*** *als monolithische Keramiken.*

bei der ***SiC-Faser-Vorformlinge*** *über die Si-Schmelze Dadurch entsteht eine erstaunliche* ***Schadenstoleranz****. Selbst bei kleineren Beschädigungen ist mit einem spontanen Bruch nicht zu rechnen.*

SiC infiltriertes SiC *(SiCSiC): Die Infiltration eines* ***SiC-Faser-Vorformlings*** *mit SiC erfolgt in einem aufwändigen Prozess über die* ***Gasphase****. Solche Teile dürften sich nur für Hochpreisbauteile eignen. Das liegt an einer relativ langen Prozessdauer in anspruchsvollen Anlagen und bauteilspezifischen Parameteranpassungen. Die hohe Schadenstoleranz führt jedoch zu konkreten Anwendungen wie in der Raumfahrt (Raketendüsen) und militärischen Luftfahrt (Schubdüsenklappen).*

Si-infiltrierte Kohlefaserstrukturen *entstehen durch Tauchen von Kohlefaser-Vorformlingen in eine Si-Schmelze. Dabei erfolgt die Infiltration und eine zumindest teilweise Reaktion der Fasern mit der Schmelze zu SiC. Diese Werkstoffe weisen Mikrorisse und Porosität auf, was zwar die Festigkeit reduziert, dafür aber eine* ***Schadenstoleranz*** *ermöglicht. Das führt zu einer Anwendung in den* ***Scheiben von Sportwagenbremsen****. Dabei nutzt man den hohen* ***Reibbeiwert bereits bei niedrigen Temperaturen.*** *Dies ist ein Vorteil gegenüber den in Rennwägen und Flugzeugen genutzten Kohlefaserbremsscheiben, die erst bei sehr hohen Temperaturen den gewünschten Bremseffekt erreichen.*

Siliziumnitrid *(Si_3N_4) kommt in drei unterschiedlichen Werkstoffvarianten zum Einsatz.*

Gesintertes Siliziumnitrid *(SSN) entsteht aus feinem Si_3N_4-Pulver und Sinterhilfe. So lassen sich auch* ***komplexe Bauteile*** *wie Turboladerräder realisieren. Es handelt sich um ein dichtes Produkt mit* ***höchster Festigkeit****, durchaus Stählen vergleichbar. Dieser Werkstoff wird in seriennahen Anwendungen an verschiedenen Komponenten, z.B. von* ***Kolbenmotoren*** *erprobt. Dazu gehören Ventile, Kolben und Dichtringe/Leisten. Bisher ist noch der relativ hohe Herstellungspreis hinderlich.*

Reaktionsgebundenes Siliziumnitrid *(RBSN) entsteht aus einem porösen Vorformling der in Stickstoff nitriert wird. Er ist deshalb ein poröser Werkstoff (15-30 Vol.%).*

Die durchaus komplexen Bauteile können Endkontur aufweisen und sind vergleichsweise preiswert. Seine Warmfestigkeit ist zwar niedrig, fällt aber auch bei hohen Temperaturen nicht ab.

Weitere Keramiken: *Hierzu gehören neben kubischem Bornitrid die „Oxide“ Aluminiumoxid, Zirkonoxid.*

© Axel Rossmann, Tu Dresden
Lehrmaterial nur mit Zustimmung

Haushaltsgeräte als Vorreiter der Kunststoffanwendung bei Maschinenelementen sind Leichtbau.

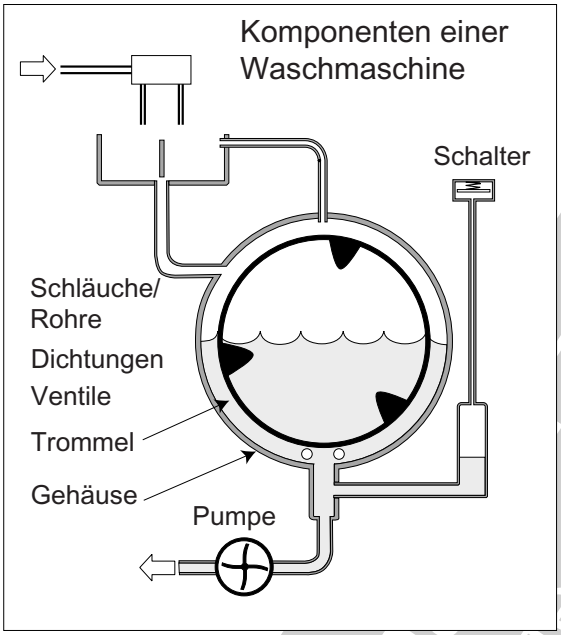


Bild 3-23

Bild 3-23 *(Lit 3-29 und 3-34): In einer Vielzahl von* ***Hauhaltsgeräten*** *für Küche, Wäsche, Raumpflege und Heimwerken sind seit Langem faserverstärkte oder kurzfasergefüllte Kunststoffkomponenten nicht mehr wegzudenken. Dabei handelt es sich neben in die Mechanik integrierten hochkomplexen Gehäusen um* ***Maschinen und deren Elemente*** *wie:*
- Ventile,
- Pumpen,
- Rohre und Schläuche,
- Getriebe/Zahnräder,
- Gleitlager,
- Lüfterräder.

Vorteilhaft nutzbare Eigenschaften*:*
- Preis: Formgebung, integrierte Farbe,
- Niedriges Gewicht,
- Gestaltungsfreiheit,
- Korrosionsfestigkeit,
- Schwingungsdämpfung, Schalldämpfung,
- Gleiteigenschaften.
- Elektrische und thermische Isolation.

Problematische Eigenschaften *(Bild 5.6.3.1.1-11 und Bild 5.6.3.1.1-12)****:***
- ***Niedrige Festigkeit****, abhängig vom einwirkenden* ***Medium*** *und der* ***Belastungszeit****. Deutlicher Festigkeitsabfall bei etwas erhöhter Betriebstemperatur. Neigt zur plastischen Verformung durch Kriechen.*
- ***Geringe Steifigkeit*** *(niedriger E-Modul).*
- Plastische Deformation bereits bei moderater Flächenpressung (z.B. Zahnräder).
- ***Volumenveränderung****:* ***Quellen, Schrumpfen****.*
Kann Gleitlager ***blockieren****.*
- ***Spannungsrissbildung*** *beim Einwirken materialspezifischer Medien (Bild 5.6.3.1.1-12).*
- Neigung zur ***Versprödung*** *bei Langzeitbetrieb unter Umwelteinflüssen, Licht/UV-Strahlung, thermischer Abbau.*

© Axel Rossmann, Turbinenstr. 7, 1000 Berlin
als Schulungsunterlage nur für Lehrzwecke

‘Alternative’ Gestaltoptimierung und Bionik zur Optimierung von Leichtbaustrukturen und Analyse der Schadensursachen und Schwachstellen mit dem Schwerpunkt an fasertechnischer Bauteile.

Unter **Gestaltoptimierung** wird hier die Anwendung computerunterdstützter integrierter **form- und belastungsoptimierende Verfahren** des Leichtbaus auf Basis **finiter Elemente** verstanden. Für die in Bild 3-24 angegebenen Verfahren SKO und CAO genügt ein FEM Programm das für die berechnung von Wärmespannungen in 2- und 3- dimensionale Bauteilen geeignet ist. Eine Besonderheit ist die Optimierung der **Konturen von Kerben** für eine möglichst niedrige Kerbspannung. SKO und CAO wurden von Formen und Strukturen der **Natur inspiriert** (Lit. 3-4.4 bis Lit. 3-49) und führen zu vergleichbaren Ergebnissen (Lit. 3-42). Umgekehrt lässt sich auf **Ursachen von Schäden**, besonders **fasertechnischer Bauteile**, mit Hilfe von Erkenntnissen aus der **Bionik** schließen (Lit. 3-50). Dazu gehören auch ‘**Denkwerkzeuge**’ die dem Praktiker im Rahmen von **Schadensuntersuchungen Schlüsse auf ursächliche Einflüsse** der Belastung und Bauteilstruktur ermöglichen (Lit. 3-51).

Bild 3-24** (Lit 3-42 und Lit 3-50): In der angegebenen Literatur findet man eine sinngemäße Darstellung verschiedener **Auslegungsmethoden.

*- **Bauteildimensionierung** in ‘**Grenzabmessungen**’ entsprechend äußeren Lasten und Randbedingungen wie Ort und Art der Krafteinleitungen.*

*- Bestimmung der **Belastungsparameter** Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen) im Bauteil. Hierzu bedient man sich heute der **Finite-Element-Methode** (FEM).*

*- ‘**Soft Kill Option**’ (SKO, Skizze oben links)) ist ein an die **Bionik** angelehntes numerisches Verfahren (FEM) und liefert **Leichtbauvarianten**. Dabei werden verzichtbar niedrig belastete **Bauteilbereiche minimiert**. Das Verfahren entspricht der Beobachtung an Knochen von Tieren. Hier sorgen ‘Fresszellen’ für eine orientierte Schwächung unbelaster Bereiche. So entsteht die typische leichte belastungsspezifisch orientierte Struktur im Knocheninneren.*

*- ‘**Computer Aided Optimization**’ (CAO, Skizze oben rechts) nutzt ebenfalls FEM und baut hohe **Spannungen, insbesondere an Kerben** mit Hilfe einer **Vergrößerung des tragenden Querschnitts** ab. Dabei steht nicht die Gewichtsminimierungen im Vordergrund. Dies entspricht dem Pflanzenwuchs, insbesondere der Bäume.*

*- Die **Kombination von SKO und CAO** (‘**Leichtbaudesign**’, Rahmen oben rechts und Beispiele „**A**“ und „**B**“ im Rahmen unten) führt zu einem Bauteil mit **gleichem Spannungsniveau in allen Querschnitten**. Das bedeutet **optimale Werkstoff-/Festigkeitsauslastung**. Dies ermöglicht **Leichtbau** (‘Ökodesign’) mit hoher **Versagenssicherheit bei dynamischer Belastung**.*

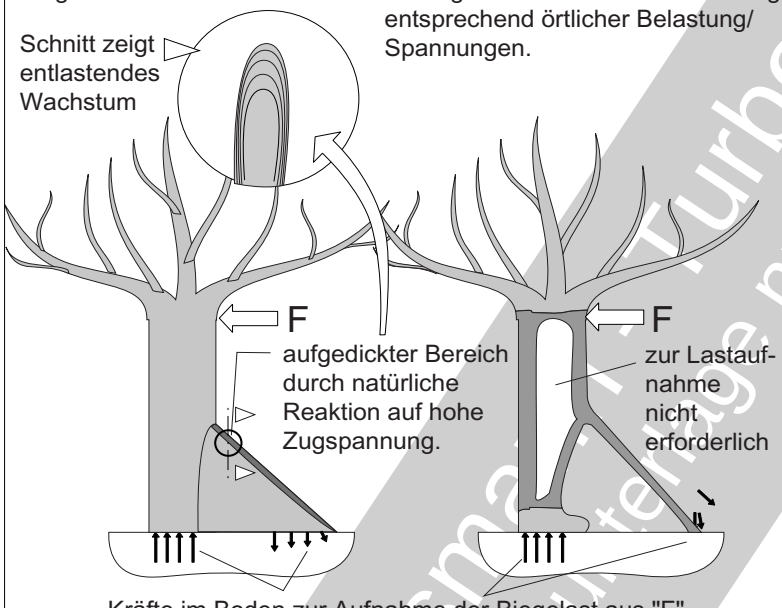
*Es sei aber auch darauf hingewiesen, dass eine solche Struktur, wenn deren Festigkeit hoch ausgelastet ist bei **Schwächung** (Beschädigung, Rissbildung) **kaum ‘Fail Save’ Potenzial** erwarten lässt. **Hochbelastete** Querschnitte dürften nur bedingt in der Lage sein einen Belastungsanstieg sicher zu ertragen. Auch ist bei Werkstoffen mit orientierungsabhängiger Festigkeit Vorsicht geboten. Dazu gehören Schmiedeteile, fasertechnische Teile und teile mit ausgeprägter **Oberflächenbearbeitung** (z.B. Bearbeitungsriefen). Diese Eigenschaften sind in der Auslegung zu berücksichtigen.*

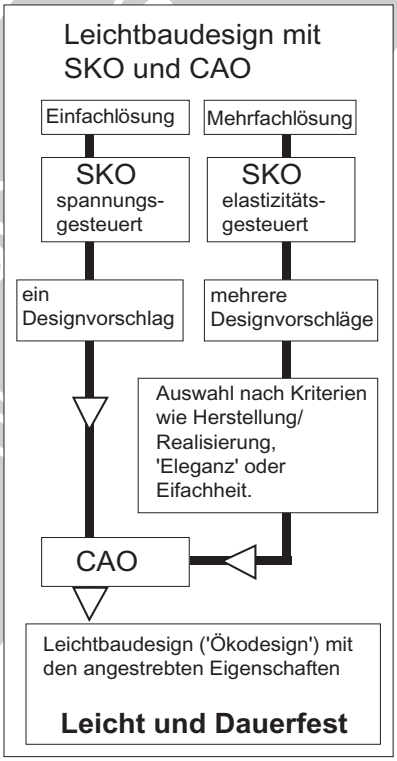
© EXTRossmann - Unterlage zur Vorlesung

Computerunsterstützte bionisch orientierte Optimierung von Leichtbaustrukturen. nach C.Mattheck Lit. 3-42 und Lit. 3-50

Computer Aided Optimization (**CAO**-Methode): **Spannungsminimierung** durch Zuwachs, d.h. Optimierung des tragenden Querschnitts.

Soft Kill Option - Methode, (**SKO**-Methode): Gestaltoptomierung mit **Gewichtsminimierung**, d.h.Festigkeitsauslastung mit Querschnittsreduzierung entsprechend örtlicher Belastung/ Spannungen.





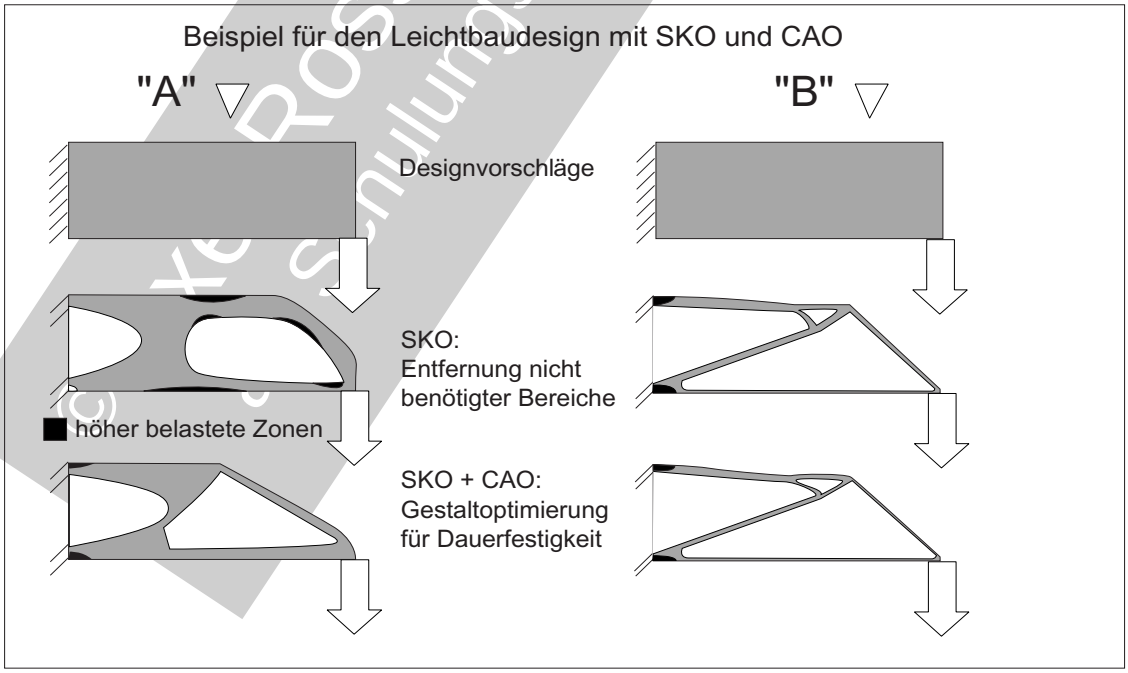


Bild 3-24

Bildbeschreibung Seite vorher

Literatur 3

3-1 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1, ISBN 3-00-005842-7, 2000, Seite 2-4 und 2-5, Kapitel 5.2.2.3.

3-2 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, ISBN 3-00-017733-7, 2000, Seiten 11.2.1.1-11, 13-26 13-27, 14-12, 14.3-17.

3-3 Michael Wittner, „Leichtbau im Maschinenschutz - Umsetzungsstrategien und Konzepte“, Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 2008, Seite 1-151.

3-4 Joachim Doerr, „Konzeption, werkstoffgerechte Gestaltung und Festigkeitsnachweis für ein Magnesium-Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse“, Dissertation an der Universität Kaiserslautern, 2005, Seite 1-161.

3-5 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, ISBN 3-540-25125-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005, Seite 166-186.

3-6 „Aluminium Eigenschaftsvergleiche“, aluMatter>Werkstoffkunde>Mechanische Eigenschaften>Eigenschaftsvergleiche, http://aluminium.matter.org.uk, 2010, Seite 1-11.

3-7 W.Scheiding, „Verschrauben von Magnesium braucht mehr als Allgemeinwissen - Was Konstrukteure wissen und beachten sollten“, Zeitschrift: „ke konstruktion + engineering“, Juni 2001, Seite 1-8.

3-8 O.Weiss, „Physikalische Grundlagen der extrakorporalen Stoßwellentherapie“, Zeitschrift: Mineralstoffwechsel, 2004, 11 (4), Seite 7-18.

3-9 A.Brosius, „Forschungsschwerpunkt Elektromagnetische Umformung“, Universität Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, 2009, Seite 1und 2.

3-10 „Magnetumformung“, http://de.wikipedia.org/, 2010, Seite 1-7.

3-11 A.Joswig, „Berechnung der elektromagnetischen Kräfte bei der elektromagnetischen Blechumformung unter Berücksichtigung der Strukturänderung“, Dissertation an der Universität Dortmund, 2007, Seite 1und 18

3-12 M.Ahmetglu, „The basic elements of tubular hydroforming“, http://www.thefabricator.com/, 2001, Seite 1-4.

3-13 R.M.Zange, „Anwendungsbezogenes Prozessmodell der Wandlung elektrischer Energie in Energie des Leistungsschallimpulses“, Dissertation an der Otto-von Guericke-Universität Magdeburg, 2000, Seite 1-6.

© Axel Rossmann - Turbocons.lt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3-14 H.H.Hubbard, P.M.Edge, C.T.Modlin, (wahrscheinlich) Proceeding-Paper einer Konferenz zum Thema „Enginering Experience and Relative Importance of Various Parameters of Acoustical Fatigue“, „Design Considerations for Minimizing Acoustic Fatigue“, ca. 1960, Seite 320-338.

3-15 H.R.Maier, „Design Management Strukturkeramik - Leitfaden für die Werkstoff- und Produktentwicklung“, in cfi 67 (1990) Nr. 4, Seiten 170-173.

3-16 M.Perkun, „Windkraftanlagen“, Kapitel III aus „Erneuerbare Energien - Gesamtüberblick über den technologischen Entwicklungsstand und das technische Gefährdungspotenzial“, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) e.V., Abt. Sachversicherung, Schadenverhütung, www.gdv.de, März 2005, Seite 51-83..

3-17 „Strukturbelastungen (Windkraftanlagen)“, www.ieh.kit.edu/nrd/wka/Windanlagen Seite 85-109.

3-18 J.Kesseli, „Ceramic Micro Turbine Program“, Ingersoll-Rand Energy Systems, 12-March 2002,

3-19 H.-T.Lin, M.K.Ferber, „Development of Silicon Nitride Ceramic Components for Advanced Turbine and Microturbine Systems“, IX Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, 19-23, 2005, Porotroz, Slovenia.

3-20 „Lupo BTC 1600 Heckklappe“, Volkswagen Racing. Lupo BTC PDM AB Rev B 020717.doc, Seite 27

3-21 E.Paffmann, „Internationale Technologie-Kooperation: Die Entwicklung der Spaceframe-Karosserie aus Aluminium des Audi Modells A8“, Discussion-Paper 00-01, ISSN 1433-531X, August 2000, Seite 1-41.

3-22 „C.Bohn, G.B.Shan, H.Schaper, T.Korff, K.Nicol, „Entwicklung einer Beinprothese für den leichtathletischen Lauf“, BISp-Jahrbuch 2001, Seite 207-210.

3-23 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, ISBN 978-3-00-025780-3, 2008, Seiten 19.1-10.

3-23 T.Irvine, „The Tacoma Narrows Bridge Failure Revision A“, www.vibrationdata.com/Tacoma.htm, December 29, 1999, Seite 1-7.

3-24 J.H. Jacobs, M.A.Ferman, „Acousic Fatigue Characteristics of Advanced Materials and Structures“, Proceedings AGARD-CP-549 (ISBN 92-836-0001-0, der Konferenz „Impact of Acoustic Loads on Aircraft Structures“, 1994, Seite14-1 bis 14-9.

3-25 G.Müller, M.Grünewald, „Acoustic Fatigue of Carbon Fibre Structures“, Proceedings AGARD-CP-549 (ISBN 92-836-0001-0, der Konferenz „Impact of Acoustic Loads on Aircraft Structures“, 1994, Seite15-1 bis 15-7.

© Axel Rossmann TU Kaiserslautern als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3-26 P.T.Elangovan, H.Ottens, G.Bayerdorfer, „Acoustic Fatigue Behaviour of Glare Composites“, Proceedings AGARD-CP-549 (ISBN 92-836-0001-0), der Konferenz „Impact of Acoustic Loads on Aircraft Structures“, 1994, Seite17-1 bis 17-8.

3-27 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 4, ISBN 978-3-00-017734-5, 2005, Kapitel 16.2.1.3 bis 16.2.1.5, Seiten 16.2.1.4-38, -39, Kapitel 17.3.

3-28 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, ISBN 978-3-00-008429-0, 2001, Kapitel 6.1 und Kapitel 8.2.

3-29 „Metall weicht Kunststoff - Moderne Polymer-Werkstoffe für Getriebe“, Zeitschrift „Industriebedarf“, 10/2004, Seite 25.

3-30 U.May, H.Kaufmann, „Bewertung der Schwingfestigkeit hoch belasteter Bauteile“, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Seite 1-4.

3-31 U.Netzelmann, H.Reiter, Y.Shi, J.Wang, M.Maisl, , „Keramische Automobilventile - Möglichkeiten und Grenzen dre zerstörungsfreien Prüfung“, www.ndt.net, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Beitrag zur DGZfP Jahrestagung in Dresden, 05 1997, LBF, Seite 1-4.

3-32 H.Albert, „Regeln und Dosieren mit Keramik“, Firma Cera System Verschleißschutz GmbH, Seite 167-189.

3-33 A.Rossmann, „Schadenuntersuchung und Schadenverhütung an Bauteilen der Ingenieurkeramikk“, J.Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau, Expert Verlag, Kontakt & Studium, Band 306, 2. Auflage 1995, ISBN 3 - 8169 - 1202 - 8 Seite 76-96.

3-34 A.Rossmann, H.Zech, „Gearbox casings of fiber-reinforced plastic“, Paper of the 2nd International Conference on Composite Materials (JCCH/II), 16-20. April 1978 Toronto/Canada, Seite 1-13.

3-35 H.R.Maier, K-E.Granitzki, H.Hoppert, E.Oser, „Technische Keramik - Stand der Entwicklung, Potentiale und Handlungsmöglichkeiten“, Dezember 1991, Seite 67-110.

3-36 A.Ziombra, „SiC to Metal Brazing for Medium and High Temperature Applications“, IKKM / /IPAK - Project-Portraits 2001“, Seite 9-14.

3-37 H.Wampers, „Keramikschnecken zum Fördern und Spritzen“, IKKM / /IPAK - Project-Portraits 2001“, Seite 15-21.

3-38 S.Steinke, „Flügelverstärkung nach Strukturproblemen, noch kein neuer Zeitplan für 787“, Zeitschrift „Flug Revue“, September 2009, Seite 32.

3-39 „Kármánsche Wirbelstrasse“, de.wikipedia.org, Stand 29.07.2010, Seite 1-3.

© Axel Rossmann - Turbocons
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3-40 H.W.Klein, W.Kaldenbach, „A new Vibration Damping Facility for Steel Chimneys“, Proceedings der Konferenz „Mechanics in Design“, Trent University of Nottingham, UK, 1998, Seite 265-237.

3-41 R.J.Cummins, J.P.Wong, „Application or Superplastically Formed and Diffusion Bonded Structures in High Intensity Noise Environments“, Proceedings AGARD-CP-549 (ISBN 92-836-0001-0, der Koferenz „Impact of Acoustic Loads on Aircraft Structures“, 1994, Seite19-1 bis 19-10.

3-42 C.Mattheck, „Design in der Natur - Der Baum als Lehrmeister“, 1992, Rombach GmbH + Co Verlagtshaus KG, 1. Auflage, ISBN 3-7930-9076-0, 242 Seiten.

3-43 A.Baumgartner, L.Harzheim, C.Mattheck, „SKO (soft kill option): the biological way to find an optimum structure topology“, Zeitschrift „Int. J. Fatigue“ 14 No 6 (1992), Seite 387 - 393.

3-44 W.Nachtigall, „Werkstoffe und Leichtbauweisen in der Natur“, „Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde in der Kunststofftechnik“, VDI-W 1982/1983, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, ISSN 0723-2241, Seite 7-17

3-45 W.Nachtigall, „Reibungskräfte in der belebten Welt“, Zeitschrift „Tribologie + Schmierungstechnik“ , 41. Jahrgang, 1/1994, Seite 3-10.

3-46 G.M.Bond, R.H.Richmann, W.P.McNaughton, „Mimicry of Natural Designs and Processes“ , Zeitschrift „Journal of Materials Engineering and Performance“, Volume 4(3) June 1995, Seite 334-345.

3-47 F.Mirtsch, „Natur erzeugt Struktur - Wölbstruktur festigt dünne Werkstoffes“ , Zeitschrift „SCOPE“ Juni 1996, Seite 144-146.

3-48 P.Grassmann, „Membranen in Biologie und Technik“ , Zeitschrift „VDI-Z“ Band 118 (1976) Nr. 3, Februar (1) Seite 103-152.

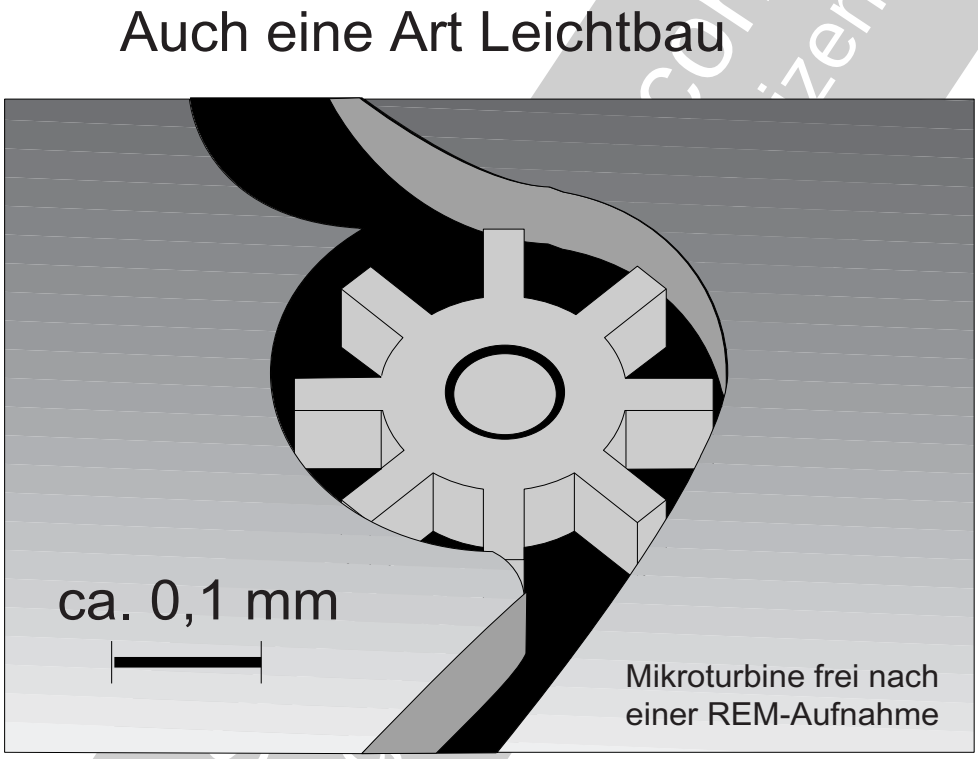
3-49 N.Woywode, „Leichtbau nach dem Vorbild der Natur“ , DVS-Berichte Band 232, www.netinform.de/DG/Recherche/HM/pdf/0_woywode.pdf, Seite 269-275.

3-50 C.Mattheck, „Warum Alles kaoutt geht - Bauteiloptimierung ohne Computer nach der Natur - Fail Safe Design: Bauteilweiterbetrieb mit gestoppten Rissen“, Karlsruher Institut für Technologie, Auflage: 1 (2003), ISBN 3-923704-41-0, 208 Seiten.

3-50 C.Mattheck, „Dankwerkzeuge nach der Natur“, Karlsruher Institut für Technologie, Auflage: 1 (2010), ISBN 978-9.2.3704-73-6, 236 Seiten.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3.1 Mini- und Mikromaschinen


Auch eine Art Leichtbau

Eine Form des Leichtbaus ist die **Miniaturisierung**. Sie lässt sich der **Feinwerktechnik** (Bild 3.1-2) und **Mechatronik** zuordnen. Man spricht von Mini- und Mikromaschinen,.offenbar ohne eine allgemeingültige Definition. Kleinturbinen für Heizung und dezentrale Energieerzeugung mit einer elektrischen Leistung im mehreren Kilowattbereich sind für Ein- und Mehrfamilienhäuser in Serienanwendung. Sie werden als Mikroturbinen bezeichnet. Diese Einstufung trifft für den Vergleich mit Kraftwerksturbinen typisch großer Leistungen zu. Es gibt aber auch Ansätze für **Mikroturbinen** (Bild 3.1-1) die diese Bezeichnung eher verdienen. Sie sind z.B. als Ersatz von Batterien gedacht, um Elektronikgeräte mit Strom zu versorgen. Für den Betrieb könnte ein Tank mit Flüssiggas wie bei einem Gasfeuerzeug ausreichen. Nicht nur die geringe Größe wirkt gewichtreduzierend.

Die Strukturen von Mikromaschinen, insbesondere von Fluggeräten (Bild 3.1-1) und **Kleinrobotern** bestehen wegen der geringen Kräfte, aber hohen Spannungen, häufig aus Leichtbauwerkstoffen wie FVK, Sandwich/-Schichtaufbauten und hochfesten Folien.

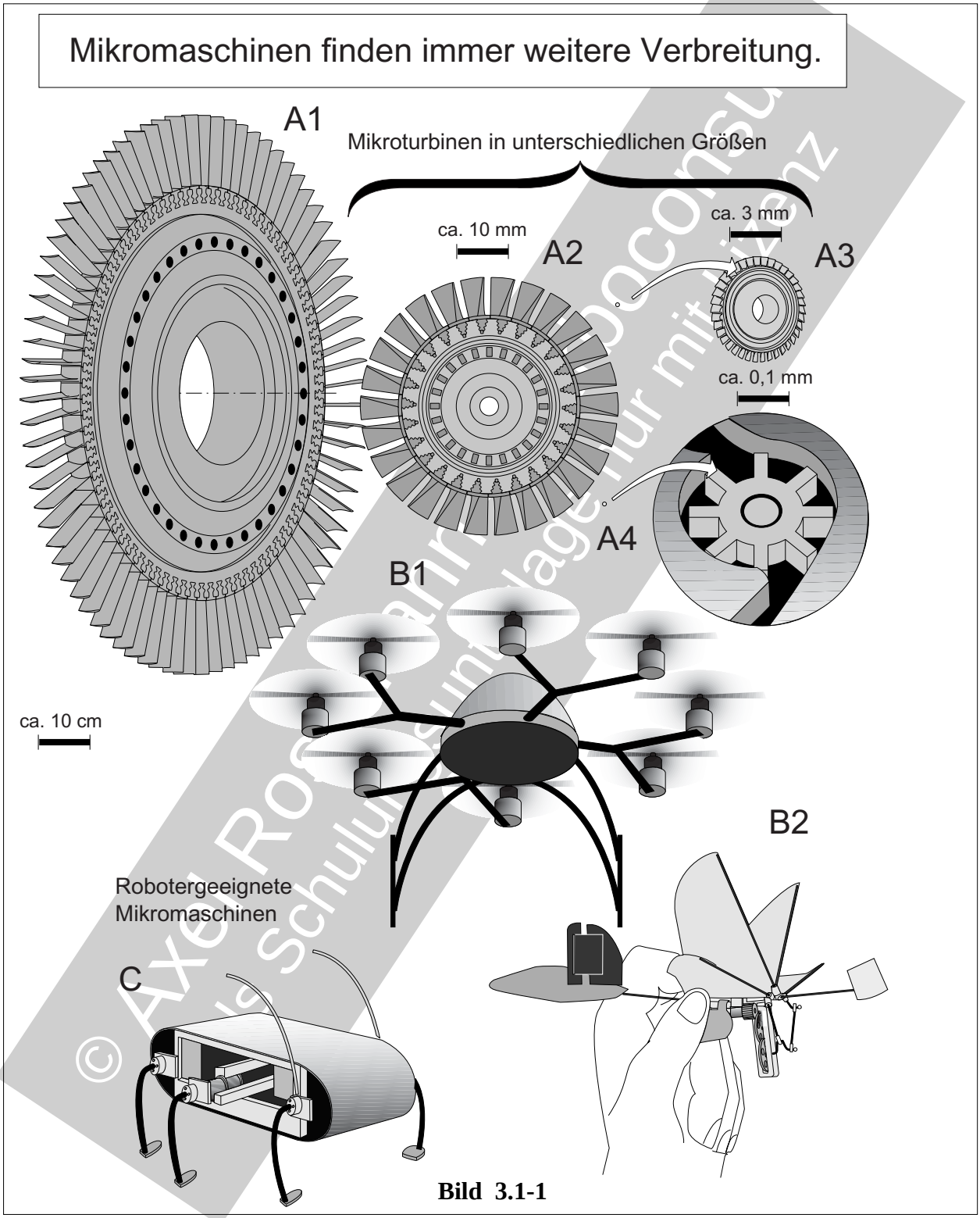


Bild 3.1-1

Bild 3.1-1*: Der Begriff Mikromaschinen ist relativ.* ***Turbomaschinen*** *mit einer Leistungsabgabe im Bereich mehrerer Kilowatt werden in der Literatur als Mikromaschinen bezeichnet. Hier ist wohl eher die Bezeichnung* ***Minimaschine*** *gerechtfertigt („****A1****“, „****A2****“, „****A3****“). Ab einer gewissen Größe lassen sich die Komponenten, insbesondere Turbinenräder, nur noch als integrale Bauteile realisieren. So hat sich, vergleichbar den verwandten* ***Turboladern*** *(Bild 3-3) der Feinguss (Wachsausschmelzverfahren) durchgesetzt. Wirkliche* ***Tur-***

Potenzielle Probleme der Mini- und Mikromaschinen muss die Feinwerktechnik lösen.

Von den Erfahrungen der Feinmechanik, auch vom Uhrenbau kann man lernen.

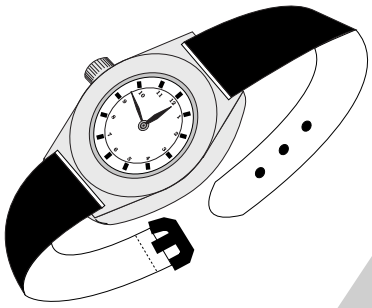


Bild 3.1-2

Herstellung:
- Verfahren
- Genauigkeit
- Sauberkeit,
- Grate und Kanten
- Verbindungstechnik
- Rauigkeit
- Großserie
- Qualitätssicherung

Betriebsverhalten:
- Langzeittauglichkeit
- Robustheit
  - Wassersicher
  - Stoßsicher
- Schmierung
- Verschleißverhalten
- Verunreinigungseinfluss
- Korrosion
- Viskosität

Konstruktionselemente:
- Energiespeicher
- Energiezufuhr
- Funktionselemente
  - Lager
  - Zahnräder
  - Wellen
  - Gehäuse
  - Dichtungen
  - Normteile
  - Verfügbarkeit
- Reparatur

bo-Mikrogeräte *in der Größenordnung von Millimetern („**A4**“) erfordern* ***Verfahren aus anderen Technikfeldern****. Dazu gehört die Chipherstellung, das Rapid Prototyping (Lit. 3.1-2) oder die Galvanotechnik.*

„B1“ zeigt einen ferngesteuerten Hubschrauber (*Lit. 3.1-1). Vergleichbare Geräte werden in vielen Varianten angeboten. Die Motivation zu deren Entwicklung liegt derzeit nicht zuletzt im militärischen Bereich (Aufklärung und Situationsdokumentation).*

*In „**B2**“ handelt es sich um ein* ***Mikrofluggerät****. Dessen Prinzip orientiert sich an Vorbildern der Natur. Hochfeste Folien und fasertechnische Tragrahmen bieten sich an.*

*„**C**“ zeigt ein geländegängiges* ***käferartiges Gerät****. Die Kraftübertragung zum Boden wird von leichten und elastischen ‘Beinen’ übernommen.*

Allgemein erfordert die Miniaturisierung eine ***Integration mehrerer Eigenschaften*** *in einer Technologie bzw. einer Komponente. Hier bieten sich* ***faserverstärkte Werkstoffe*** *an. Der Lagenaufbau ermöglicht die gewünschte Elastizität in Größe und Verteilung.*

Bild 3.1-2*: Leichtbau als Miniaturisierung sollte die langjährige* ***Erfahrung der Feinwerktechnik****, besonders der* ***Uhrenindustrie****, nutzen. Dazu gehören*

- Herstellung, besonders Verfahren.

- Bauteilqualität wie Oberflächeneigenschaften, Rauigkeit und Maßgenauigkeit.

- Funktionssicherheit, hier spielen Langzeitschmierung und Schwingermüdung eine Rolle.

- Verschleiß an Lagern und Gleitflächen (Zahnräder, Kulissen).

- Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse wie Korrosion, Temperatur, Beschleunigungen/ Stöße, Verschmutzung. Besonders wichtig sind Vorgehensweisen und Technologien bei Abdichtungen und Vibrationsschutz.

Ein weiterer Aspekt ist die Reparierbarkeit und Wartung.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

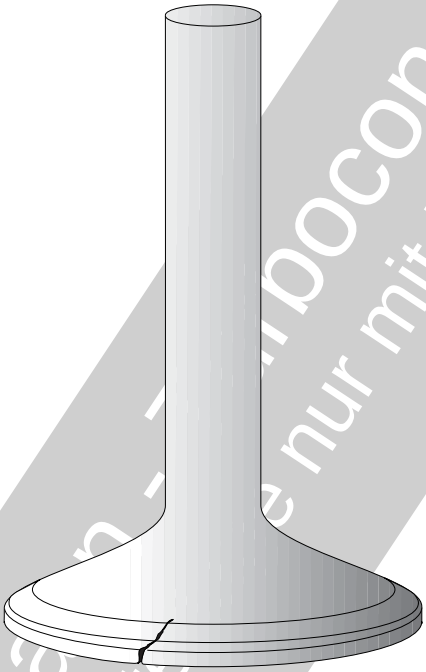
Literatur zu Kapitel 3.1

3.1-1 G.Stauch, „Ein Anflug von Neugier“, Zeitschrift „Technology Review“, Dezember 2009, Seite 32-37.

3.1-2 N.Boeing, „Mikromaschinen aus der Druckerpresse“, Zeitschrift „Technology Review“, Mai 2007.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3.2 Einfluss der Betriebsbelastungen



© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

In diesem Kapitel soll das **problemrelevante Zusammenspiel von Werkstoffeigenschaften** und **Belastungen**, **insbesondere im Leichtbau** - Maschinen/ Komponenten behandelt werden.

Das Spektrum der Belastungen umfasst:

- **Mechanische** Belastungen (statisch, LCF, HCF, Schock)
- **Thermisch** (von sehr niedrigen Temperaturen im Verdichterbereich bis zu extrem hohen Temperaturen der Heißteile)
- **Betriebszeiten** (zivile Überholintervalle mehrere 10 000 h)
- **Atmosphärische Einflüsse** (Korrosion, Erosion, Blitzschlag, Hagel, siehe Band 1).

Trotz dieser Beanspruchungen müssen die Bauteile bei möglichst niedrigem **Gewicht**, hohen **Wirkungsgraden** (mechanisch, aerodynamisch, thermodynamisch) und an die **Grenzen gehender Festigkeitsauslastung** größtmögliche Sicherheit aufweisen. Dies, obwohl niedriges Gewicht gewöhnlich auch kleinere Sicherheitsfaktoren bedeutet.

Die Nutzung der Bauteileigenschaften im Grenzbereich ist nur unter Einhaltung anspruchsvollster **Qualitätsmaßstäbe**, sicherer Auslegung (bei Kenntnis der Belastungen und der lebensdauerbestimmenden Schadensmechanismen), zusammen mit stabilen optimierten Fertigungsprozessen und umfangreichen Erfahrungen möglich.

- Es ist also natürlich, dass sich gerade die Technik verstärkt unter dem Aspekt der **Problem-/ Schadensverhütung** besonders intensiv mit dem schadensrelevanten Werkstoffverhalten unter Betriebsbeanspruchungen beschäftigen muss.

3.2.1 Anforderungen an die Werkstofftechnik.

Die Grundforderung an ein Bauteil ist, unter den zu erwartenden Betriebsbelastungen mit ausreichender Sicherheit die **Auslegungs-Lebensdauer** zu erreichen. Hierzu müssen alle, die Lebensdauer beeinflussenden Faktoren berücksichtigt werden. Dies gilt für den gesamten **Lebensdauerzyklus**, von der Planung bis zur Ausmusterung.

Betrachtet man die Bauteil- bzw. die Werkstoffbeanspruchung, so lässt sich leicht erkennen, dass ein äußerst **komplexes Zusammenwirken unterschiedlicher Einflüsse** beherrscht werden muss (Bild 3.2-2).

Forderungen an das Bauteil verändern ihre Prioritäten und werden immer anspruchsvoller (Bild 3.2-1). Treiber dieses **technischen Anspannungsgrads** hängen im zivilen Bereich in erster Linie mit der Umweltbelastung zusammen (Senkung der Emissionen, Verminderung des Kraftstoffverbrauchs). Im militärischen Einsatz steht die **Kampfwertsteigerung** im Vordergrund. Das heisst mehr **Leistungskonzentration** und bessere Erfüllung von Missionsforderungen. Alles das muss bei Kostenminimierung erreicht werden. Bisher konnte bei Kraftwerken allgemein ein **Anstieg der Temperaturen** und **Drücke** registriert werden. Ob dieser Trend sich fortsetzt ist ungewiss und muss differenziert betrachtet werden. Eine höhere Heißgastemperatur ist nicht unbedingt gleichbedeutend mit einer Temperatursteigerung im Bauteil. Die Differenz zwischen zulässiger Bauteil- und Gastemperatur muss mit aufwändiger, den Wirkungsgrad vermindernder Kühlung ausgeglichen werden. Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, Werkstoffe mit immer höheren **Warm- und Kriechfestigkeiten** in den Serieneinsatz zu bringen. Offenbar sind die Festigkeiten der Werkstoffe für Hochtemperaturanwendungen nahezu ausgereizt. Dies zeigt sich an abflachenden Kurven des Trends der Kriechfestigkeit von Heißteilwerkstoffen. Deshalb sucht man mit Hilfe der **Wärmedämmschichten** (Bild 5.6.1.4.2-5) und effektiveren Kühlungen die Temperaturgrenzen weiter nach oben zu verschieben. Es bedarf einer Abwägung, ob sich die Vorteile einer Technologie gegenüber neuen Risiken lohnen.

Die andauernde Forderung nach Gewichtsminimierung, während die Leistung weiter gesteigert wird, führt zu höheren Bauteilbelastungen. Damit vermindert sich die Größe **wachstumsfähiger Fehler**. Das heißt, in früheren Anwendungen zulässige (durch Spezifikationen und Auslegung abgedeckte) **Schwachstellen werden zu Fehlern** (unzulässig, Beispiel 1 in Bild 3.2-3). Damit müssen die Qualitätsanforderungen weiter steigen. Dies gilt z.B. für die sichere **Auffindbarkeit** immer kleinerer Fehler mit zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP, Bild 4.5.2-3). Die Steigerung der **nutzbaren Werkstofffestigkeiten** ist also von den zur Verfügung stehenden **seriengeeigneten ZfP-Verfahren** abhängig. Auch Beschädigungen, wie z.B. Kratzer von der Handhabung (Fertigung, Montage), werden in ihren Auswirkungen immer kritischer. Dies erfordert erhöhte Vorsicht in Fertigung und Montage sowie geeignete Oberflächenbehandlungen (z.B. Kugelstrahlen).

Um akzeptable Lebensdauern bzw. Überholintervalle zu erhalten, wird es in Zukunft notwendig werden, auch die **Risswachstumsphase** in die Auslegung mit einzubeziehen. Damit erhält die **Bruchmechanik** einen immer bedeutenderen Stellenwert (Bild 4.3-1).

Voraussetzung, um trotz höherer Auslastung der Werkstofffestigkeiten das geforderte Sicherheitsniveau zu gewährleisten, ist die genaue Kenntnis und das Verständnis aller relevanten, bauteilspezifischen Betriebsbeanspruchungen und **Schadensmechanismen**. Dies erfordert umfangreiche Erprobungen unter ausreichend betriebsnahen Bedingungen. Die zur Auslegung verwendeten **Werkstoffdaten** sind statistisch abzusichern. Damit steigt der Aufwand (Zeit, Kosten) für die Entwicklung eines Werkstoffs bzw. einer Technologie (z.B. Beschichtung oder Oberflächenbehandlung) überproportional mit den Beanspruchungen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

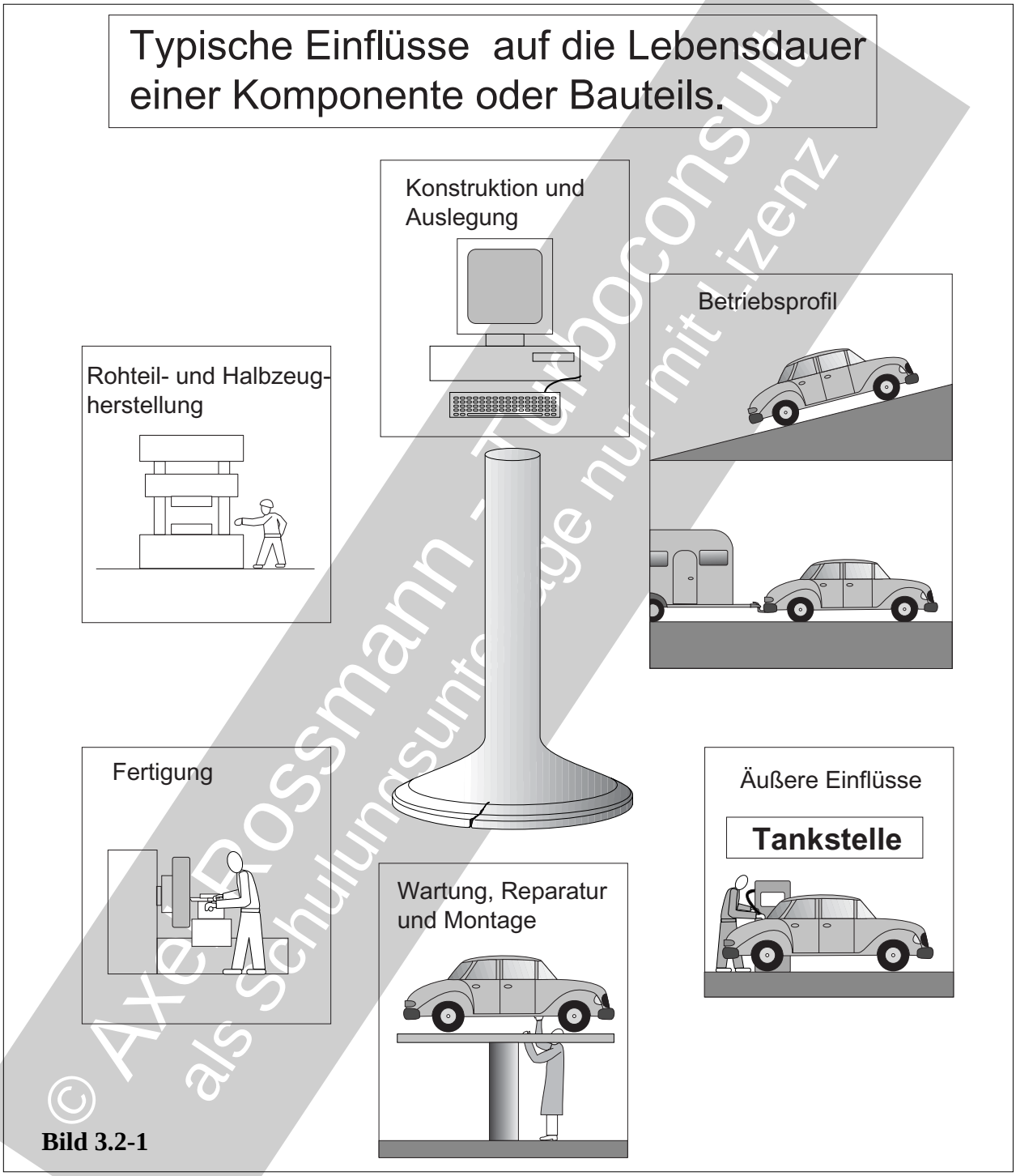


Bild 3.2-1

Bild 3.2-1: *Die* ***Lebensdauer eines Bauteils*** *und damit der gesamten Maschine ist neben den Betriebsbelastungen noch von mehreren anderen Einflüssen abhängig. Anhand eines typischen, hoch belasteten Bauteils, einem Auslassventil, lässt sich dieser Problemkreis umreissen. Es unterliegt in erster Linie zyklischen Beanspruchungen aus hochfrequenter mechanischer Belastung und niedrig frequenten Wärmedehnungen (in erster Linie Start-/ Abstell-Zyklen). Die Wärmespannungen liegen oberhalb der Dauerfestigkeit (LCF). In hochbeanspruchten Zonen im plastischen Bereich (Thermoermüdung, Bild 5.4.2.1-2). Die Lebensdauer sollte jedoch wegen der geringen Lastwechselzahl ausreichen. Damit können auch relativ kleine Fehler als Anrissauslöser wirken (Bild 3.2.1-1 und 5.4.1.1-3). Potenziel-*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

le Einflüsse (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) auf hochbelastete Maschinenelemente zeigt das Beispiel eines Auslassventils.

Betriebsprofil: *Es beeinflusst für die Lebensdauer wichtige Größen wie Höhe, Verlauf und Dauer der Zyklen. Wichtig sind Zahl und zeitlicher Verlauf der Leistungsänderungen und die absolute Leistung, die wiederum von:*

- *Betreiber: Privat, beruflich*
- *Betriebsart: Kurz- oder Langstrecke*
- *Anwendung: Lkw, Pkw*

Äußere Einflüsse: *Die Festigkeit des Bauteils kann durch Einflüsse wie Korrosion und Verschleiß über die Betriebszeit abfallen. Äußere Einflüsse stehen in Zusammenhang mit:*

- *Kraftstoffart und-qualität*
- *Verunreinigungen der Ansaugluft*
- *Ansaugtemperaturen*

Überholung, Reparaturen, Wartung, und Montage: *Hier besteht die Möglichkeit, dass Fehler und Schädigungen nicht (rechtzeitig) erkannt werden (z.B. Verschleiß). Auch können Wartungsmängel neue Schädigungen begünstigen (z.B. mangelhafter Ölwechsel, Spiel). Solche Risiken sind auch abhängig von:*

- *Inspektions- und Überholintervallen*
- *Inspektionsmöglichkeiten.*
- *Belastungsniveau bzw. Auslegung.*

Fertigung: *Insbesondere die Oberfläche von Bauteilen ist dynamisch (Schwingungen) hoch beansprucht. Somit ist natürlich der Herstellungsprozess mit seiner Auswirkung auf die Oberflächeneigenschaften von großer Bedeutung für die Bauteillebensdauer. Eine Rolle spielen (Bild 5.4.3.2-8):*

- *Verfahren und die angewandten Verfahrensparameter (wichtig für Eigenspannungen).*
- *Unbemerkte Beschädigungen (z.B. Schleifrisse, Verschmierte Kerben vom Werkzeug bzw. Schneidmittel)*
- *Güte der zerstörungsfreien Prüfung (Bild 4.5.2-3)*

Rohteil- und Halbzeugherstellung: *Bei diesen Verfahren spielen besonders Volumenfehler (z.B. Poren und Trennungen) sowie Abweichungen im Bauteilquerschnitt (z.B. Gefüge) eine Rolle. Diese werden beeinflusst durch:*

- *Größe (Volumen) des Bauteils. Dieser Einfluss verstärkt sich mit der Sprödigkeit von Werkstoffen. Das erweist sich als sehr problematisch für den Einsatz von Keramiken (Bild 5.2.1-9) und Intermetallische Phasen.*
- *Herstellungsverfahren (z.B. Schmelz- und Schmiedeprozess)*
- *Werkstoffeigenschaften (z.B. Neigung zu Seigerungen, Warmrissbildung).*
- *Erfahrung des Herstellers*

Konstruktion und Auslegung: *Natürlich wird die Lebensdauer eines Bauteils letztendlich von der Auslegung bestimmt. Diese hängt jedoch entscheidend von der bauteilspezifischen Betriebserfahrung ab. Beispielsweise müssen die verwendeten Festigkeitsdaten für Bauteil und Belastung repräsentativ und sicher sein. Wichtig sind:*

- *Lebensdauermodell (erster Anriss, Rissforschritt, Bild 4.3-1),*
- *Datenermittlung (z.B. Probenentnahme, Bild 5.4.3.2-6, Oberflächenzustand, Statistik),*
- *Berechnungsverfahren (betriebsnahe Abbildung der Belastungen),*
- *Zulassungsvorschriften.*

© Axel Rossmann - Turbomotor
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

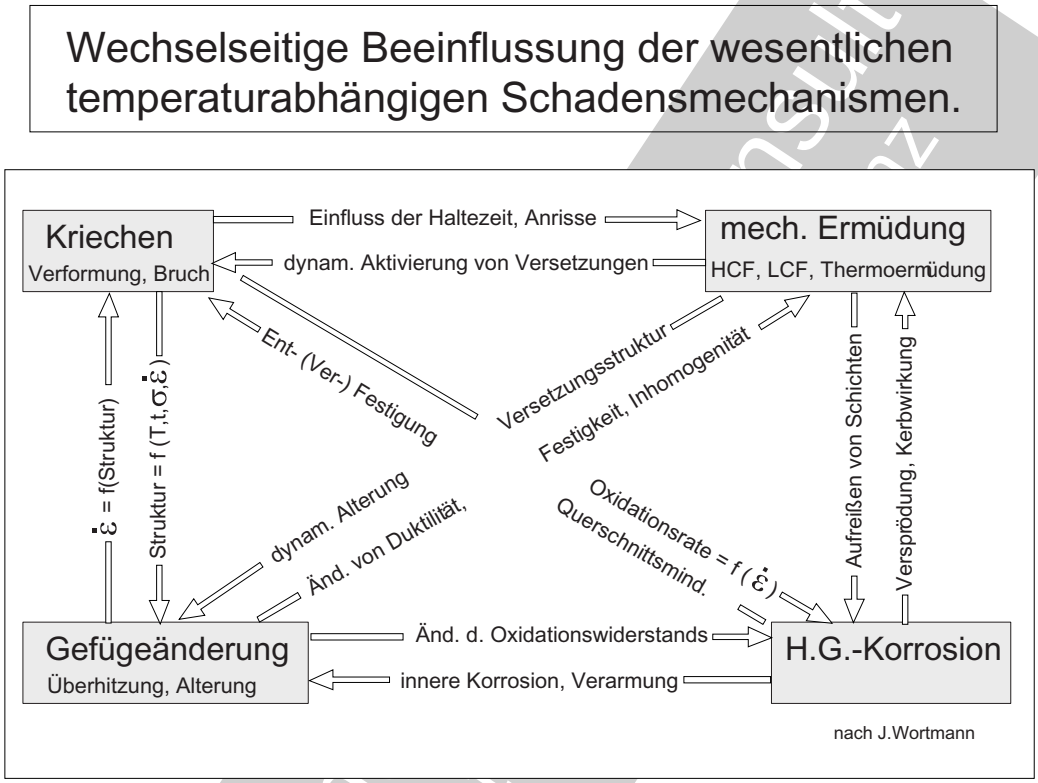


Bild 3.2-2

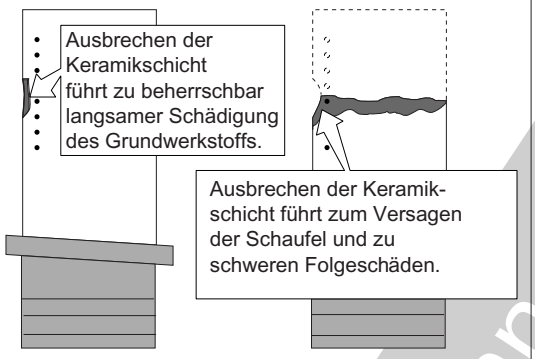
Bild 3.2-2 *(Lit 3.2-2): Weil* ***unterschiedliche Beanspruchungen und Schadensmechanismen*** *(siehe auch Kapitel 5.1) häufig kombiniert auftreten, werden die Abläufe schädigender Vorgänge äußerst komplex. So können sich die gleichen Vorgänge werkstoffspezifisch unter bestimmten Bedingungen verstärken und unter anderen Bedingungen abschwächen. Beispiel für dieses Verhalten ist das Kriechen und die* ***Schadensakkumulation*** *(Bild 5.4.1.2-2, Bild 5.4-12 und Bild 5.4-13) bei dynamischer Beanspruchung (Kapitel 5.4.3, Bild 5.4.3.2-12). Kriechverformung kann sich bei* ***Haltezeiten****, abhängig von Temperatur- und Belastungsverlauf, beschleunigen oder verzögern. Je nachdem, ob ein ausheilender oder ein schädigender Effekt überwiegt. Führt z.B. Oxidation bei sehr langsamem Rissfortschritt zur Ausrundung einer Rissspitze, kann dies ein Weiterreißen erschweren. Eine höhere Rissfortschrittsgeschwindigkeit kann dagegen noch beschleunigt werden.*

Gewöhnlich wird man davon ausgehen müssen, schon um bei der Auslegung „auf der sicheren Seite zu sein“, dass sich schädigende Effekte gegenseitig verstärken. Die Minimierung des Gewichts erfordert auch bei kleinen Abständen zwischen Belastung und Festigkeit ausreichende Sicherheit. Solche Sicherheitsabstände sind umso eher möglich, ***je besser die Betriebsbelastungen und deren Einfluss auf das Bauteilverhalten bekannt ist****.*

Weil letztendlich erst das Verhalten der gesamten Maschine unter typischen komplexen Betriebsbeanspruchungen das gewünschte Bauteilverhalten befriedigend sicher nachweist, werden immer aufwändigere ***Testläufe*** *erforderlich. Damit gewinnt der Grundsatz „the engine will tell us“ gerade auch im Zeitalter der Computer an Bedeutung.*

Der Einfluss des Werkstoffverhaltens auf die Sicherheit hängt auch davon ab, ob eine Technologie zusätzlich zur Auslegung angewandt wird oder ob sie Auslegungsbestandteil ist.

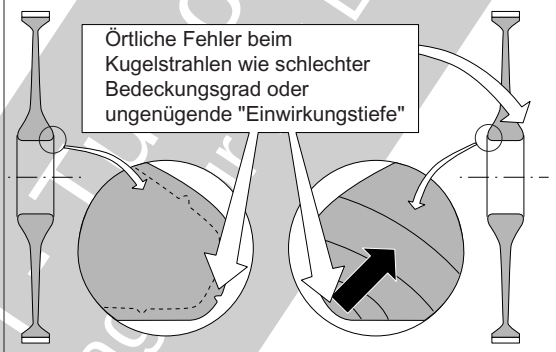
Beispiel 1: Turbinenrotorschaufel mit keramischer Wärmedämmschicht auf dem Schaufelblatt



Wärmedämmschicht als zusätzliche Sicherheit

Eigenschaften der Wärmedämmschicht als Auslegungskriterium

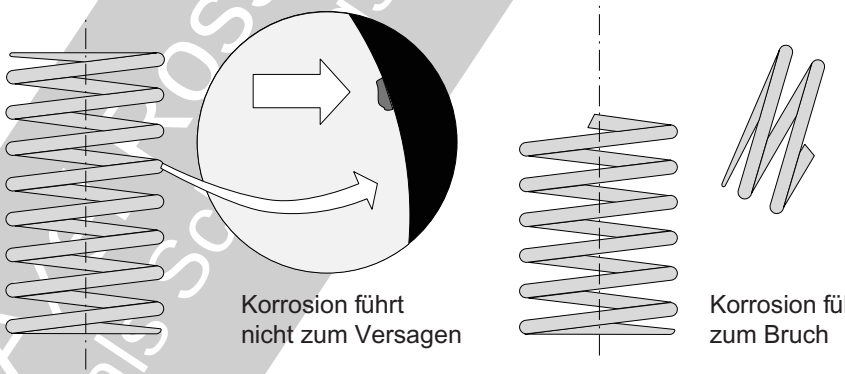
Beispiel 2: Kugelstrahlen von Oberflächen die durch Schwingermüdung beansprucht sind.



Kugelstrahlen als zusätzlicher Schutz gegen kleine Oberflächenbeschädigungen innerhalb der Einwirktiefe.

Kugelstrahlen zur Garantie der sicheren LCF-Lebensdauer. Bei Kugelstrahlfehlern kann es zum Bruch der Scheibe kommen

Kugelgestrahlte Federn



Korrosion führt nicht zum Versagen

Korrosion führt zum Bruch

Reaktion einer "absichernden" Technologie auf zusätzlichen schädigenden Einfluss.

Versagen bei einer Technologie die Bestandteil der Auslegung ist bei zusätzlichem schädigenden Einfluss

Bild 3.2-3

© A. Rossmann - Technische Universität Clausthal - Lizenz als Skript

Bild 3.2-3: *Die Ansprüche an die* ***Sicherheit einer Technologie*** *hängen entscheidend davon ab, ob deren Eigenschaften* ***in der Auslegung enthalten*** *sind oder ob die Technologie lediglich zur Absicherung der vorgesehenen Lebensdauer dient („Gürtel zum Hosenträger“). Ein Beispiel ist die* ***Wärmedämmschicht*** *auf einer Turbinenrotorschaufel (Rahmen oben links). Im Fall der „absichernden“ Technologie führt das Ausplatzen der Schicht an der Eintrittskante des Schaufelblattes zu verstärkter Oxidation und Thermoermüdung. Der* ***Scha-***

densfortschritt *ist jedoch so langsam, dass trotzdem eine akzeptable Lebensdauer zu erwarten ist. In jedem Fall sollte es möglich sein, den Schaden bei einer Routinekontrolle (Boroskopinspektion) vor dem Versagen des Bauteils zu erkennen. Die benachbarte Skizze zeigt den Fall, bei dem die wärmedämmende Wirkung der Schicht für die Betriebssicherheit unbedingt erforderlich ist. Sie ist* ***Bestandteil der Auslegung****. Beim Abplatzen der Schicht ist mit einem* ***schnellen*** *überhitzungsbedingten* ***Schadensfortschritt*** *zu rechnen. Die Wahrscheinlichkeit eines Schaufelbruchs ist wegen des schnellen Schadensfortschritts höher als die Chance den Schadensbeginn rechtzeitig während einer vorgesehenen Inspektion zu entdecken. In diesem Fall ist also ein Versagen der Schicht unbedingt zu vermeiden. Entsprechend höher muss die Ausfallsicherheit sein. Dies beeinflusst z.B. die Forderungen an die* ***Qualitätssicherung*** *und die Güte der Schichteigenschaften.*

Ähnliche Überlegungen gelten z.B. für den Einsatz des ***Kugelstrahlens*** *bezüglich der zyklischen Lebensdauer von Rotorscheiben (Rahmen oben rechts). Als Schutz vor Oberflächenbeschädigungen (z.B. Kratzer) dient Kugelstrahlen der* ***Absicherung****. In der Auslegung verwendet soll Kugelstrahlen jedoch das Erreichen der sicheren Lebensdauer garantieren, obwohl eine höhere LCF-Festigkeit angenommen und genutzt wird*

Das unten skizzierte Beispiel zeigt die ***Spiralfeder einer Radaufhängung****. Diese Federn werden zur Steigerung der Schwingfestigkeit (meist vorgespannt, engl. prestressed)* ***kugelgestrahlt****. Damit wird eine zusätzliche Sicherheit gegen Versagen erreicht. Wird die erhöhte Schwingfestigkeit jedoch zum Bestandteil der Festigkeitsauslegung, können bereits kleine, betriebsbedingte Oberflächenbeschädigungen wie Korrosionsgrübchen zum Bruch führen.*

© AxelRossmann - Turboconsult
Diese Unterlage nur mit Lizenz

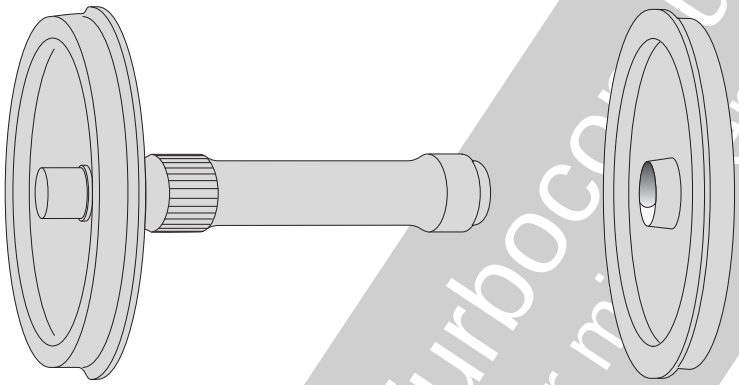
Literatur 3.2

3.2-1 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, ISBN 3-540-25125-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005.

3.2-2 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 3“, Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-017733-7, 2000, Seite 12.1-1 bis Seite 12.1-12.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3.2.2 Das Verhalten hochbelasteter Bauteile.



Dieses Kapitel ersetzt nicht die in Standardwerken behandelten Werkstoffeigenschaften der Maschinenelemente (z.B. Lit. 3.2.2-1). Darin sind alle Daten für die Auslegung bei konventionellen Belastungen mit relativ hohen **Sicherheitsfaktoren** zu finden. In den letzten Jahren verstärkt sich der Zwang des globalen Markts zur Ressourcenschonung, höchstmöglicher Leistung bei möglichst geringem Gewicht sowie Material- und Energieeinsparung. Damit nähern sich die Belastungen mehr und mehr den Werkstoffgrenzen. Dies gilt nicht nur für die Festigkeit, weitere Eigenschaften besonders aus der **Bruchmechanik** gewinnen an Bedeutung. Dazu gehören

- **Zulassungen** der Werkstoffe und Hersteller bzw. deren Verfahren.
- Bearbeitungspezifische Fehl-/**Schwachstellen** (Bild 3.2.2-1)
- **Fehlerempfindlichkeit** bzw. risswachstumsgefährliche **Fehlergröße** (Kapitel 4.3).
- Risszähigkeit (Kapitel 4.3),
- **Kritische Rissgröße**,
- Rissfortschrittsgeschwindigkeit,
- Ausfallwahrscheinlichkeit,
- Statische (Kapitel 5.3) und dynamische **Belastungen im plastischen Bereich** (Kapitel 5.4).
- Thermoermüdung (Kapitel 5.4).
- **Wasserstoffinduzierte Risse** (Wasserstoffversprödung, Kapitel 5.7),
- Spannungsrisskorrosion (Kapitel 5.6.3),
- Einfluss von **Beschichtungen** (Kapitel 4.2)
- Nutzung bzw. **sinnvolle Grenzen von Werkstoffen** mit erhöhter Festigkeit (Kapitel 4.1, Lit. 3.2.1-5).

Diese Einflüsse lassen sich, wenn überhaupt, nur schwer exakt berechnen. Das umso mehr, weil häufig mehrere mit unbekannter Intensität zusammenwirken. Also ist anfangs nur eine Abschätzung möglich. Auskunft über die **Betriebsfestigkeit** muss ein **ausreichend realistischer Versuch** geben. Am besten im kompletten Aggregat. Für diese Vorgehensweise gibt es im Englischen eine treffende Bezeichnung:

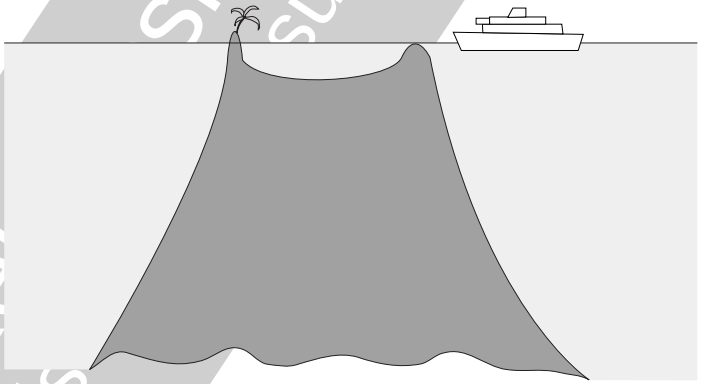
„The Engine will tell us“.

© Axel Rossmann - Turbocomputer
als Schulungsunterlage nur mit Genz

Mit solchen Voraussetzungen und Randbedingungen sieht sich seit Jahren der Flugtriebwerksbau konfrontiert. Hier wurden umfangreiche Erfahrungen gesammelt, von denen der allgemeine Maschinenbau profitieren kann (Lit. 3-1, Lit. 3-2, Lit.3-27 und Lit. 3-28).

- der Begriff des „Einzelfalls“
- was sind schadensursächliche Fehler?
- „Verschlimmbesserung“

Oft haben Schäden an Maschinen
Ähnlichkeit mit einem Korallenriff:
Die Gefahr wächst langsam und ihre
richtige Einschätzung ist problematisch.



Der „Einzelfall“, „Murphy’s Gesetz“ und die „Verschlimmbesserung“:

Tritt ein Schadenstyp bei einer Maschine oder einer Komponente erstmalig ein, taucht häufig der Begriff des **„Einzelfalls“** auf. Von einem Einzelfall kann man beispielsweise nach einer Luftfahrtvorschrift im Sinne des Wortes nur sprechen, wenn die Wahrscheinlichkeit des Eintritts den nach JAA 25.1309 „improbable failure conditions“ zuzuordnen ist. Ein solch seltenes Ereignis kann aber nicht angenommen werden, wenn Ursachen aus Technologie oder Betrieb vorliegen, die nicht bei anderen Maschinen bzw. Bauteilen eines vergleichbaren Typs ebenso sicher ausgeschlossen werden können.

Entspricht die Einstufung als „Einzelfall“ nicht eher der Einschätzung eines Kapitäns, der nach langer Reise erstmals ein Riff sieht und daraus schließt, dass kein weiteres gefährliches vorhanden ist? Es ist deshalb sehr (selbst-) kritisch zu prüfen, ob der „Einzelfall“ nicht eher ein Zeichen der Hilflosigkeit gegenüber dem Problem darstellt. Dies kann daraus resultieren, dass einfache Abhilfen nicht erkennbar sind oder einen, dem Problem scheinbar unangemessenen hohen Aufwand erfordern.

Viele Schadensmechanismen (z.B. Risskorrosionstypen) erfordern das Zusammentreffen mehrerer Bedingungen. Das könnte zu dem Schluss auf beruhigende Unwahrscheinlichkeit verleiten. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass gerade in solchen Fällen meist **„Murphy’s Gesetz“** wirksam wird, d.h. die gefährlichsten Kombinationen werden wider Erwarten auch auftreten. Insbesondere fallen „scheinbare Redundanzen“ diesem Erfahrungsprinzip zum Opfer. So ist nicht immer bewusst, dass statisch bestimmte Konstruktionen (z.B. ein Stuhl mit 3 Beinen, Bild 3-18), trotz einer für den Techniker bestechenden „Funktionseleganz“, beim Ausfall eines Elements im Gegensatz zu nicht statisch bestimmten Konstruktionen (z.B. ein Stuhl mit 5 Beinen) aber katastrophal versagen. Offenbar geht die **statische Bestimmtheit zu Lasten des Fail-Safe-Verhaltens**.

Nicht selten tritt ein Schaden erst nach längerer Inkubationszeit (Bild 5.1-1) auf und ist dann immer der Erste. Die Erfahrung lehrt, dass es nicht lange dauern wird, bis dieser „Einzelfall“ mehrfach eintritt.

Für die Einstufung von Risiken und die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten ist der schadensursächliche Fehler (Bild 3.2.2-1) wichtig. Dabei kann eine Zuordnung durchaus problematisch sein, wenn z.B. Prüfmittel oder Werkstoff solche Fehler nicht ausschließen (Bild 4.5.2-3).

Werden Verbesserungen oder Abhilfen eingeführt, die nicht auf einer ausreichend sicheren Schadensanalyse beruhen, ist mit einer Situation zu rechnen, für die der anschauliche Begriff **„Verschlimmbesserung“** (Bild 3.2.2-3) geprägt wurde. Dieselben Bauteile, aber auch andere, deren Zusammenhang mit dem Problem man nicht ahnte, versagen nun. Damit können abweichende Schadensbilder entstehen. Beispiele aus dem Triebwerksbau bei denen Abhilfen für Schwachstellen oder Schäden zu neuen Schäden und Problemen führten, lassen eine besondere Anfälligkeit auch von Leichtbauten für solche Verschlimmbesserungen erkennen. Eine Erklärung für dieses Phänomen versucht Bild 3.2.2-2.

Argumente, dass andere Varianten des gleichen Maschinentyps bestimmte Probleme nicht aufwiesen und deshalb eine Schadensursache auszuschließen ist, sind insbesondere dann mit großer Vorsicht zu bewerten, wenn es sich bei der betroffenen Variante um ein leistungsgesteigertes **„Familienmitglied“** handelt.

Schadensursächliche Einflüsse:

Unter dem Begriff des schadensursächlichen Einflusses soll hier ein solcher verstanden werden, ohne den der Schaden nicht, oder nicht in dieser Weise aufgetreten wäre. Dabei muss es sich bei dem Einfluss nicht notwendigerweise um einen Fehler oder ein Fehlverhalten handeln. Das ist verständlich, wenn wir z.B. an ungünstige Wetterbedingungen bei einem Flug denken. Solche werden möglicherweise erst dann relevant, wenn sie der Pilot falsch einschätzt und deshalb falsch handelt. Es ist also durchaus mit mehreren schadensursächlichen oder zum Schaden beitragenden Bedingungen zu rechnen. Die Erfahrung zeigt, dass sogar in der Mehrzahl der Fälle mehrere schadensrelevante Einflüsse vorhanden sind. Für Abhilfen ist entscheidend, alle wichtigen Einflüsse zu erkennen und ihren Beitrag zur Schadensentstehung richtig einzuschätzen. Gerade die realitäts-

© Axel Rossmann - Tulipoconsult
als Schulungsinterlage nur mit Lizenz

nahe **Einordnung der Einflüsse ist die hohe Kunst der Schadensanalyse** und setzt ein großes Maß an Objektivität, Unabhängigkeit, Selbstkritik und Sachverstand in einem weiten Bereich der Technik voraus. Öfter als man glaubt, führen bewusste oder unterbewusste Zwänge (z.B. wenn der herangezogene Fachmann das schadensrelevante Verfahren maßgebend mitentwickelt hat, oder der Konstrukteur gar nicht auf die Idee kommt, bei sich selbst zu suchen) zu einer Fehlbeurteilung der Einflüsse. Da werden 5 % Effekte zu 90% Effekten hochstilisiert, wichtige Einflüsse dagegen unterschätzt oder als „tabu“ erachtet. Um solche Situationen von vorneherein zu vermeiden, ist darauf zu achten, dass keine verantwortlichen Schadensuntersucher ausgewählt werden, die mit dem Problem in emotionalem, subjektiven Zusammenhang stehen. Eine Regel die aus der Kriminalistik bekannt ist. Wird sie nicht befolgt, hat es sich in vielen Fällen gezeigt, dass z.B. gerade die prozessverantwortlichen Fertigungsfachleute sehr leicht beitragende Ursachen zu Hauptursachen fehldeuten. Dies fördert dann sich **über lange Zeit wiederholende Parallelschäden,** obwohl eine ganze Reihe von Abhilfen und Verbesserungen eingeführt wurden. Jedoch ist ein informatives Gespräch mit Fachleuten, gerade auch mit den betroffenen Spezialisten, unbedingt zu suchen. Wenn der Schadensanalytiker sich dabei seiner Pflicht zur kritischen Wertung der Angaben bewusst ist, wird er die Argumente in seine Analyse wertend einbeziehen,.

Die Einschätzung, ob eine gefundene Abweichung ein Fehler, d.h. schadensursächlich ist (Bild 3.2.2-1) erfordert viel Erfahrung. Schwachstellen sind technologietypisch und damit unvermeidlich. Ein typisches Beispiel sind zulässige Mikrolunker in gegossenen Turbinenrädern und Turbinenschaufeln. Ein Ermüdungsriss kann durchaus bei Überlast starten. Es wäre jedoch falsch, den Lunker als Fehler und Schadensursache einzuschätzen. Das gilt wenn er durch Spezifikationen abgedeckt, und die Festigkeitsauslegung auf Versuchswerten von Proben mit solchen Fehlstellen beruht. In diesem Fall handelt es sich um eine Schwachstelle, auch als ‘Ungänze’ bezeichnet. D.h. die Schadensursache dürfte in einer ungewöhnlichen Betriebsbeanspruchung zu suchen sein.

Bild 3.2.2-1.1: *Die Frage nach dem „schadensursächlichen Fehler“ ist von fundamentaler Bedeutung für die Fehlervermeidung und die entsprechenden Abhilfen. Es geht hier nicht um die Frage, ob der* ***Fehler hauptursächlich oder nur beitragend*** *ist. Entscheidend ist, ob es sich überhaupt um einen (unzulässigen) Fehler handelt, oder eine werkstoff- oder technologiecharakteristische* ***Schwachstelle****. Eine solche unvermeidliche Schwachstelle ist bei der Auslegung der Bauteile von vornherein ausreichend zu berücksichtigen, z.B. beim Betriebsverhalten bzw. der Lebensdauer.*
Besonderheiten die sich durch die in der Serie vorgeschriebenen zerstörungsfreien Prüfverfahren und/oder eine Verfahrensüberwachung nicht ausreichend sicher vermeiden lassen, müssen zu den Schwachstellen gezählt werden. Ein Anhaltspunkt, für eine durch Eindringprüfung noch sicher auffindbare Fehlergröße, kann der ***„technische Anriss“*** *sein (Skizze unten). Dieser ist als ein halbkreisförmiger Oberflächenriss mit 0,8 mm Länge und 0,4 mm Tiefe definiert. Dem liegt die* ***ausreichende Wahrscheinlichkeit der Erkennbarkeit als Riss bei einer Eindringprüfung*** *zu Grunde. Er ist* ***nicht einer Belastung zugeordnet****. Im Gegensatz dazu ist die Größe eines wachstumsfähigen Risses belastungsabhängig.*
Ein Kriterium für rissfortschrittsgefährdete Bauteile kann der Schwellenwert (threshold, siehe auch Bild 4.3-12) der Spannungskonzentration im Fehlerbereich sein. Fehler mit einer wirksamen Risslänge $a_{th,}$ *deren Spannungskonzentration bei allen relevanten Betriebsbeanspruchungen unter diesem Thresholdwert* K_{th} *liegen, sind damit nicht wachstumsfähig. Sie beeinflussen als Schwachstelle die Lebensdauer des Bauteils nicht. Voraussetzung ist, dass sie sich nicht im Betrieb durch andere schädigende Effekte wie Korrosion, über den Schwellenwert hinaus vergrößern.*

© Axel Rossmann - Kurzpolitur
alle Rechte vorbehalten

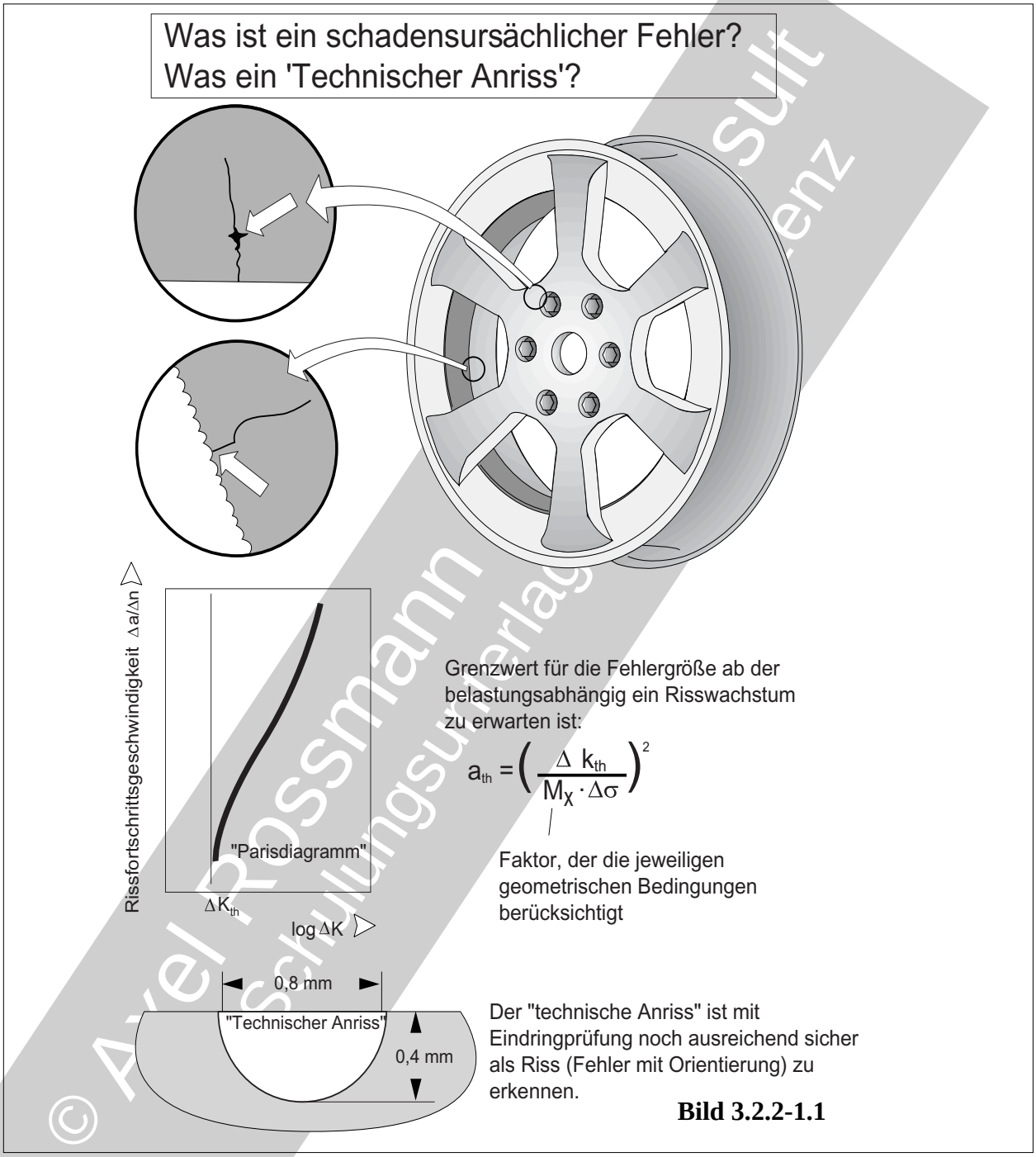


Bild 3.2.2-1.1

© Axel Rossmann
Schulungsunterlagen Konsult

Auch darf der Schwellenwert nicht absinken beispielsweise infolge einer Versprödung.
*Wenn ein Schwingriss von einer Fehlstelle ausgeht, so ist dies noch längst kein Beweis dafür, dass es sich um einen s**chadensursächlichen Fehler** handelt. Entscheidend ist, dass dieser innerhalb der nach obigen Überlegungen zugelassenen **Spezifikationen** bzw. der Auslegung liegt.*

Fehleinschätzungen bei der Bewertung von ursächlichen Fehlern liegen nahe, wenn die Bewertung nicht aus einer erweiterten Sicht vorgenommen wird. Eine solche Situation ist zu erwarten, wenn nur ein metallografischer Schliff oder eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Schadensteils bei hohen Vergrößerungen vorliegt. Untersuchungen oder Spezifikationen typischer Vergleichsteile, die sich im Betrieb bewährt haben, sind für eine

Vorgehensweise zur Beurteilung der Schadensursächlichkeit von Fehlern:

Versuchen Sie die folgenden **Fragen zu beantworten**:

- Welche Fehler hatten die **Bauteile mit denen die Zulassungen durchgeführt** wurden? Diese Fehler können als bauteiltypisch und zugelassen betrachtet werden.

- Welche Fehler haben die im **Serienbetrieb bewährten Bauteile**? Liegt hier genügend positive Erfahrung mit vergleichbar schwachstellenbehafteten Teilen vor, dies würde für eine Akzeptanz der Fehler sprechen.

- Welche Fehler sind an **Neuteilen in Vorschriften wie Zeichnungen und Werkstoffspezifikationen akzeptiert**? Was lassen die Überholhandbücher für gelaufene Teile zu?

- Geht der Schaden überhaupt vom **fraglichen Fehler ursächlich** aus?

- Welche Fehler sind mit den serienmäßig verfügbaren und **vorgeschriebenen Prüfverfahren auffindbar**? Fehler unterhalb der Auffindbarkeitsgrenze sind dann unvermeidbar und vom Bauteil zu tolerieren.

Bewertung unverzichtbar. Ein Beispiel ist die zu spezifizierende werkstofftypische Mikroporosität (Schrumpflunker) in Gussteilen aus Superlegierungen. Diese Technologie kommt heute in nahezu allen modernen Turbinenschaufeln zum Einsatz.
Besonders kleine, integral gegossene Turbinenräder in Turboladern müssen im zyklisch hochbeanspruchten Nabenbereich mit Mikroporosität leben. Die Auslegung hat diese spezifizierten Schwachstellen zu berücksichtigen.
Falls Werkstoffe oder Technologien mit arteigenen Fehlern oberhalb des Thresholds eingesetzt werden, weil sich sonst ein konkurrenzfähiges Produkt nicht darstellen lässt, sind ***bruchmechanische Betrachtungen*** *für die Lebensdauerabsicherung notwendig.* ***Für die sichere Lebensdauer ist die Rissfortschrittsphase mitzubetrachten****. Selbstverständlich ist ein ausreichender Sicherheitsabstand bis zum Erreichen der kritischen Risslänge einzuhalten. Zum Rissfortschrittsverhalten müssen ausreichend abgesicherte Daten für Werkstoff und Bauteil vorliegen.*
Werden ***nach einer Auslieferung Fehler*** *entdeckt, sind Risikobetrachtungen unter dem Aspekt der „Threshold-Fehlergröße“ hilfreich.*

Bild 3.2.2-1.2: *Bei hochbelasteten Bauteilen begegnet man immer häufiger unvermeidlichen Fehlstellen. Dafür gibt es unterschiedliche Gründe:*
- Nicht mit den serienverfügbaren Prüfverfahren ausreichend sicher auffindbar.
- Im Fertigungsprozess nicht ausreichend sicher auszuschließen.
- Erst nachträglich in der Serie erkannt.
In diesen Fällen stellt sich die Frage zur ***abgesicherten Einstufung als Schwachstelle und damit der Zulässigkeit*** *(Bild 3.2.2-1.1).*
Die wichtigste und ***sicherste Möglichkeit*** *bietet* ***Betriebserfahrung****. Es hat sich gezeigt, dass bisher nur in den wenigsten Fällen allein mit Hilfe bruchmechanischer Abschätzung in der Konstuktions-/ Aulegungsphase theoretisch*

© Axel Rossmann
als Schulungsu

Woran kann man erkennen ob es sich um eine Schwachstelle oder einen Fehler handelt?

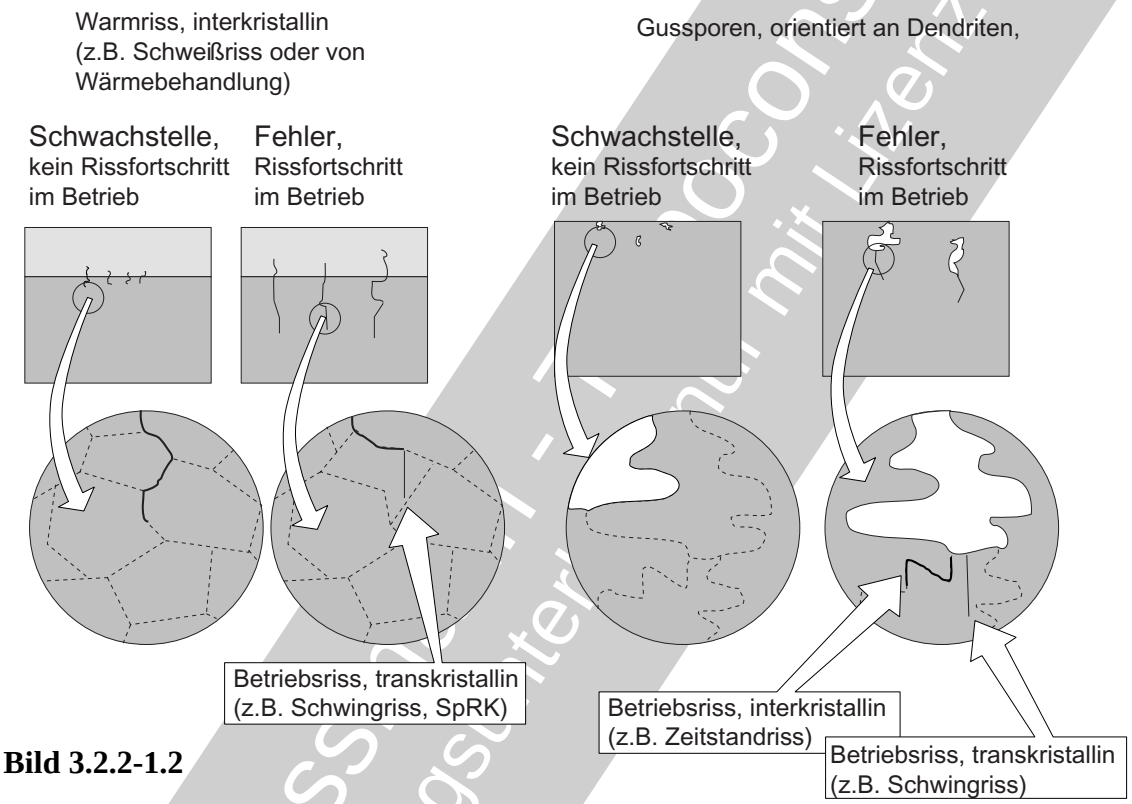
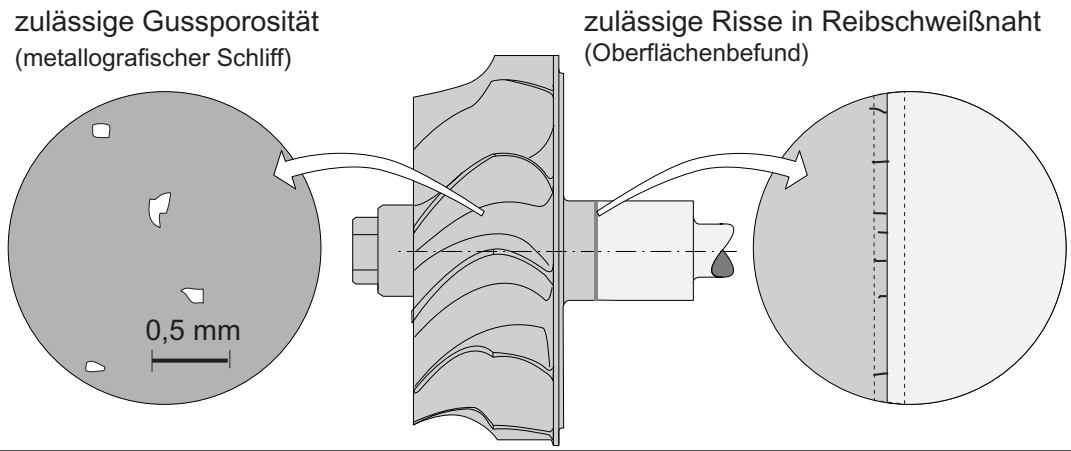


Bild 3.2.2-1.2

Turbolder als Beispiel für erfahrungsbasierte Schwachstellen in einem hochbeanspruchten Bautei



und mit Labor-/Proben bauteilspezifische Schwachstellen definiert werden. Dies ist bei Unsicherheiten der tatsächlich auftretenden Betriebsbeanspruchungen auch verständlich.

*Weitaus häufiger ist, dass man als **Nebenbefund** bei einer Untersuchung länger gelaufener Bauteile oder einer 'Zufallserkenntnis' auf Fehlstellen trifft. Was zunächst oft als äu-*

Ein Fehler unterscheidet sich von einer Schwachstelle durch einen Rissfortschritt.

Dieser lässt sich mit einer geeigneten Untersuchung erkennen:

1. **Metallografische Untersuchung** am aussagekräftigen Bauteilbereich au.

2. Falls möglich durch eine **mikroskopische Untersuchung** eines Laborbruchs durch die Fehlstelle.

*ßerst unerwünscht, ja als 'Katattrophe' angesehen wird ist in Wirklichkeit die **Chance für einn höchst wertvollen produktspezifischen Vorteil**. Das Risiko solcher Fehlstellen ist abzuschätzen, insbesondere wenn größere Anzahl Sereienbauteile potenziell betroffen ist. Beurteilungsgrundlage sind **Anzeichen für ein Risswachstum**. Dazu dienen eine metallografische Untersuchung (Querschliff, Bild 2.2.2.4-2) und falls möglich eine mikroskopische Auswertung der Bruchfläche der aufgebrochenen Fehlstelle (REM, Bild 2.2.2.4-3). Befundbewertung:*

*- **Ein Rissfortschritt bedeutet, der Riss ist als Fehler und damit gefährlich und unzulässig einzustufen**: Eine besondere Gefährlichkeit erkennt der Fachmann an einem typisch veränderten Verlauf. In einem solchen Fall geht meist ein interkristalliner Verlauf in einen transkristallinen über.*

*- **Kein Rissfortschritt** erkennbar, die Fehlstelle ist zumindest für die vorgelegenen Betriebsbeanspruchungen als **Schwachstelle/Ungänze** einzustufen und ist unter Voraussetzungn zulässig: Diese Grenze der Fehlstellen-/Rissgröße muss sicher unterschritten werden. Dieser maximal **zulässige Grenzwert** ist in der Dokumentation des Bauteils (Konstruktionszeichnung, Auslegungsspezifikation, Qualitätssicherung) **nachprüfbar festzuhalten**. Es stellt wertvolles Know How dar. Gegebenenfalls sind Zulassungsbehörden und Betreiber zu **informieren**.*

***Bild 3.2.2-2:** Triebwerke reagieren erfahrungsgemäß sensibler als andere Maschinen auf irgendwelche Veränderungen der bewährten und zugelassenen Konfiguration. Sie eignen sich als Beispiel für das **Verhalten von Leichtbauten des Maschinenbaus**.*

*„**Verbesserungen**" gegen Schäden und Schwachstellen führen oft unerwartet am selben Bauteil zu neuen Schäden oder an anderen Bauteilen zu bisher nicht aufgetretenen Problemen (Bild 3.2.1-3). Um dieses Verhalten verständlich zu machen, wird anhand eines Modells eine Erklärung versucht. Dazu sollen Gleichgewichtszustände dienen (Skizzen). Die Kugel steht für das Bauteilverhalten. Ihre Auslenkung von der Mitte kennzeichnet die Größe des Betriebseinflusses. Der Abstand von der Plattformkante symbolisiert die Sicherheit gegen Bauteilversagen. Die Größe der Rollgeschwindigkeit der Kugel steht für die Schädigungsgeschwindigkeit.*

*Bei einem **stabilen Verhalten** hat das Bauteil der Fähigkeit der Beanspruchungsänderung in einem für einen stabilen Zustand ausreichendem Maß entgegenzuwirken (Bild 3-18 und Bild 4.3-11). Dies ist z.B. dann der Fall, wenn ein selbstheilender Effekt wie bei Thermoermüdungsrissen zu einer Entlastung und Verzögerung des Rissfortschritts führt (Bild 5.4.2.1-2). Am häufigsten dürfte stabiles Verhalten gegeben sein, wenn ein Bauteil lediglich zulässig elastisch verformt wird. Dieser Gleichgewichtszustand zwischen Betriebs- und Feder-*

© Vieweg Fachbuch - TU Darmstadt
Alle Rechte vorbehalten

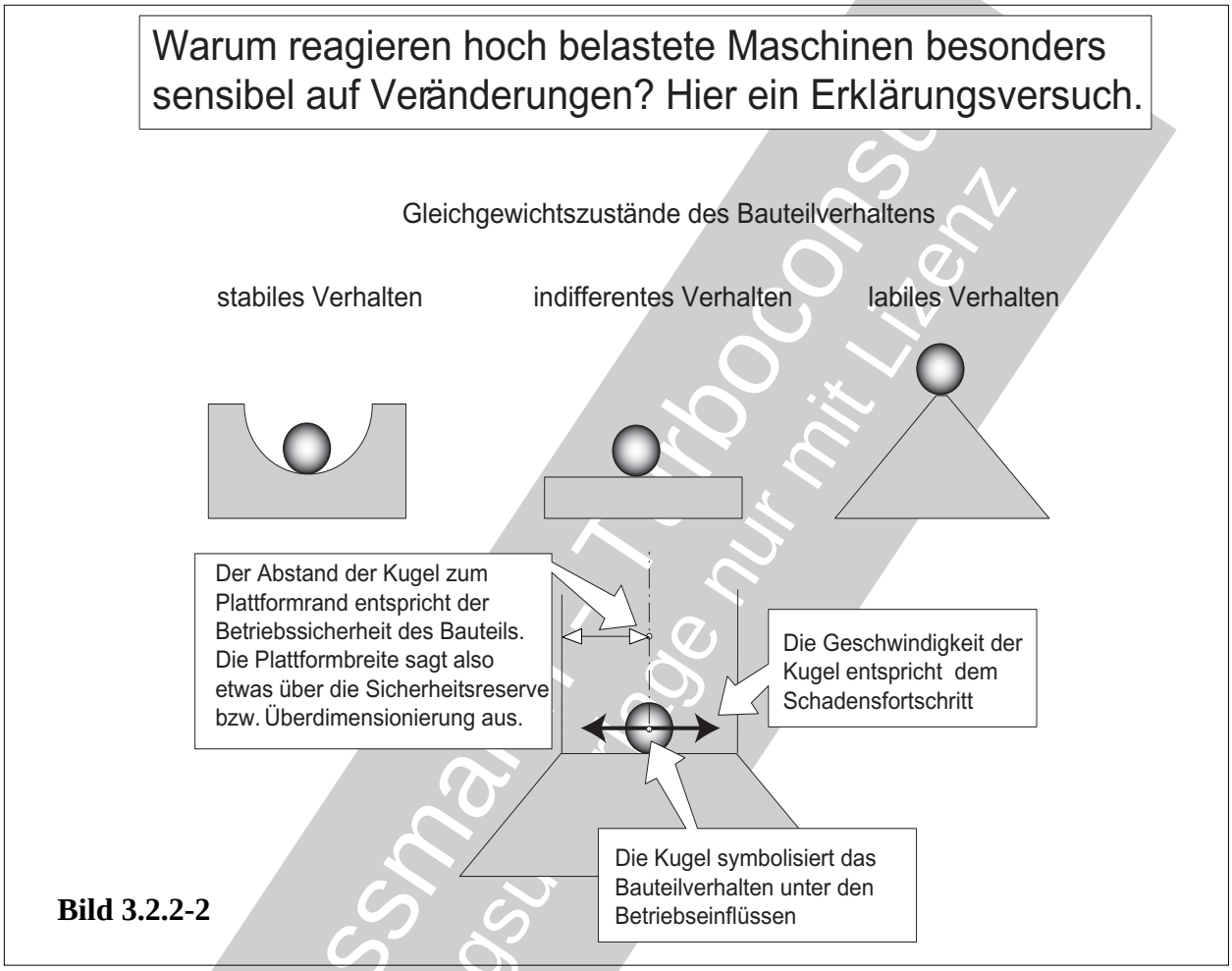


Bild 3.2.2-2

kraft erfolgt ohne unzulässige Veränderungen wie eine plastische Verformung, Anriss und Bruch.

Bei einem ***indifferenten Bauteilverhalten*** *führt die Veränderung der Beanspruchung zu einer* ***beherrschbaren Schädigungsgeschwindigkeit****. Es könnte sich um eine Langzeitschädigung wie einen Verschleißvorgang handeln.*

Ein ***labiles Bauteilverhalten*** *führt nach einer kleinen Veränderung der Beanspruchung zu einem* ***selbstverstärkenden Schadensablauf****. Als Beispiel kann hier ein Anstreifvorgang dienen, bei dem sich der Rotor aufheizt, ausdehnt und damit noch stärker anstreift.*

Hierzu gehören auch Unwuchten die nicht zu einem Gleichgewichtszustand führen und die Auslenkung des Rotors immer mehr vergrößern (Bild 5.4-4).

Die untere Skizze zeigt die typische Situation eines hochbelasteten Bauteils. Es handelt sich um die ***Kombination indifferenten und labilen Verhaltens****. Die Breite der Plattform soll für die Überdimensionierung (hohe Sicherheitsbeiwerte) des Bauteils stehen. Solange sich die Kugel auf der Plattform befindet, unterliegt sie den auslegungsgemäßen Beanspruchungen und dem abgesicherten, „natürlichen Alterungsprozess“. Weil Überdimensionierungen bei Maschinen mit hoher Leistungskonzentration auf ein Minimum reduziert sind, ist die Auflagefläche eher schmal. Bewegt eine Beanspruchungsveränderung die Kugel über die Plattform hinaus, wird das Bauteilverhalten über die ertragbaren Belastungen beansprucht. Es kommt zu einem (selbst) beschleunigten Schaden.*

Die typische und notwendige hohe Auslastung der Bauteile durch unterschiedliche Betriebsbelastungen und -einflüsse ist also der Grund warum scheinbar kleine Veränderungen über die auslegungsgemäße Belastung hinaus

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Maßnahmen gegen Verschlimmbesserung:

- Ziehen Sie bei der Beurteilung einer Veränderung **erfahrene Spezialisten** aus möglichst unterschiedlichen Disziplinen hinzu.

- Wenn Schäden an anderen Bauteilen als dem „verbesserten“ auftreten, denken Sie daran, dass Sie **etwas verändert** haben. Prüfen Sie sehr kritisch, ob es zwischen der Veränderung und dem neuen Schaden einen Zusammenhang geben könnte. Sind Sie sich des Zusammenhangs nicht sicher, nehmen Sie an es gäbe den **Zusammenhang**.

- Versuchen Sie durch **Prüfläufe** und/oder **Fleetleader** möglichst früh viel Erfahrung zu sammeln.

- **Vermeiden Sie Änderungen die über Ihren „Erfahrungshorizont“** hinaus gehen. Evolution geht vor Revolution.

Bauteile zum Versagen bringen. *Weil die tatsächliche Größe der Überdimensionierung häufig nicht bekannt ist (z.B. bei Auslegungen nach Erfahrung oder einer Zulassung auf Grund von Prüfläufen), ist auch nicht genau bekannt, wie nah sich das Bauteil an seiner Belastungsgrenze befindet. Erst der Betrieb zeigt, ob sich Veränderungen bzw. Abhilfen für die gesamte Maschine bewähren. Es gilt wieder einmal:* ***„the engine will tell us“****. Ein typisches Beispiel für dieses Verhalten ist die Beschaufelung eines Turboverdichters. Hier können scheinbar kleine Veränderungen zu verstärkter Schwinganregung und Ermüdungsbrüchen in den Schaufelblättern führen.*
Konstruktionsmerkmale beeinflussen die Übertragung von ***Auswirkungen der Veränderung*** *eines Bauteils auf andere. Bauteile wie Verdichtergehäuse können als Beispiel dienen. Aus Gründen der Gewichtsminimierung sind sie bei Triebwerken relativ dünnwandig. Das macht sie schwingempfindlich. Sind sie über nahezu die gesamte Maschinenlänge durch feste Verbindungen gekoppelt, werden Schwingungen leicht übertragen. Das gilt besonders für Vibrationen von Lagern. Die Gasströmung erregt Schwingungen in und gegen die Strömungsrichtung. So können sich die unterschiedlichsten Bauteile über große Abstände gegenseitig schädigend beeinflussen.*

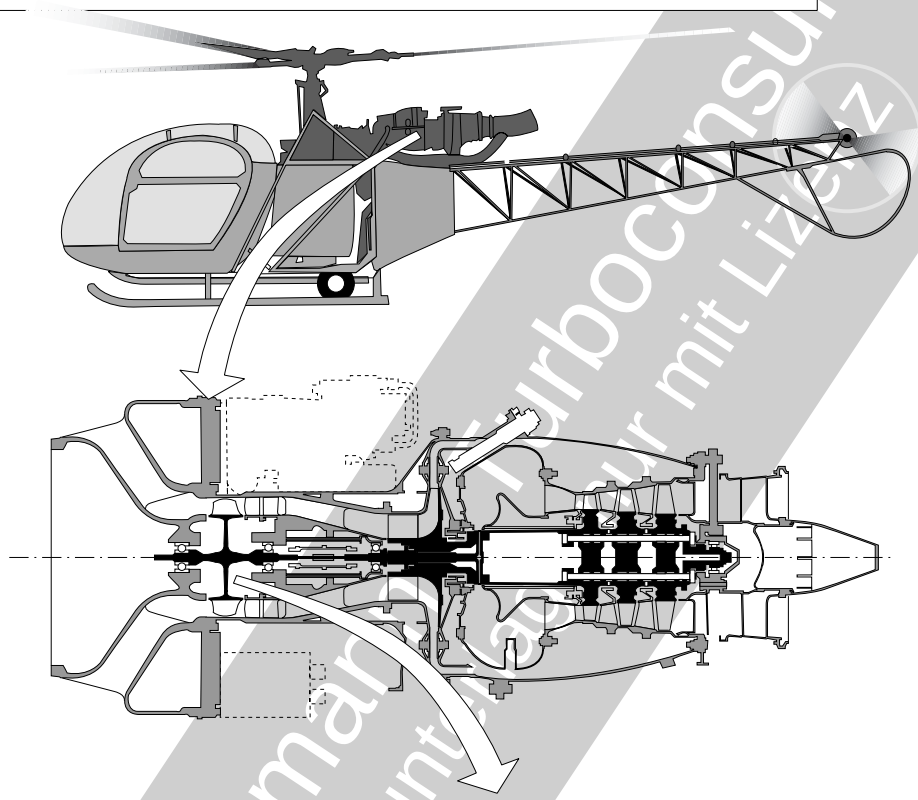
Bild 3.2.2-3: *Dieses Bild beschreibt nach Lit 3.2.1-3 und Lit. 3.2.1-4 einen typischen Fall von „****Verschlimmbesserung****“, der von G. Lange untersucht und veröffentlicht wurde.*
Nach ca. 1000 Flugstunden trat der Schaden während des Leerlaufs eines Triebwerks am Boden ein. Die Verdichterräder waren in viele Bruchstücke zersprungen. Ein vergleichbarer Schaden entstand bald darauf an einem zweiten Triebwerk.

Über die Schadensursache berichtet G. .Lange, ***Zitat****:*

„Axialverdichter aus Turbinenschaufelstahl X 15 Cr13 wurden nach dem Härten nicht wie üblich auf 725 °C, sondern nur auf 540°C an-

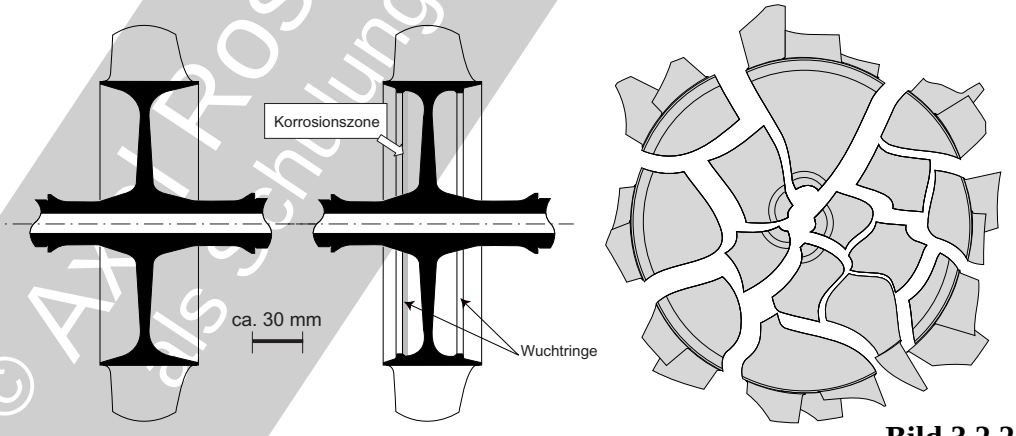
Bauteilverhalten bei hoher Belastung

Eine "kleine" Konstruktionsverbesserung mit katastrophalen Folgen.



alte Version
ohne Schäden

neue Version mit Korrosionsschäden



Blisk aus geschmiedetem 13% igem Cr-Stahl gefräst

Bild 3.2.2-3

© AXT Rossmann Turbocon
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

gelassen, um eine möglichst hohe Festigkeit zu erzielen. Der Stahl wird durch diese Behandlung besonders korrosionsanfällig, weil sich ein Netz von Chromkarbiden auf den ehemaligen Austenitkorngrenzen ausscheidet. Die Räder erreichen dennoch die vorgeschriebene Lebensdauer, weil die als Korrosionsmedium wirkende, aus der anströmenden Luft niedergeschlagene Feuchtigkeit aufgrund der hohen Fliehkraft abgeschleudert wurde. Durch eine ***anscheinend unbedeutende konstruktive Änderung*** *- das Andrehen eines Wuchtrings - wurde die Feuchtigkeit jedoch gestaut, sodass die Räder infolge von Spannungs- bzw. von Schwingungsrisskorrosion brachen.“.*

Literatur 3.2.2

3.2.2-1 G.Niemann, H.Winter, B.-R.Höhn, „Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen“, ISBN 3-540-25125-1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005.

3.2.2-2 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 3“, Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-017733-7, 2000, Seite 12.1-1 bis Seite 12.1-12.

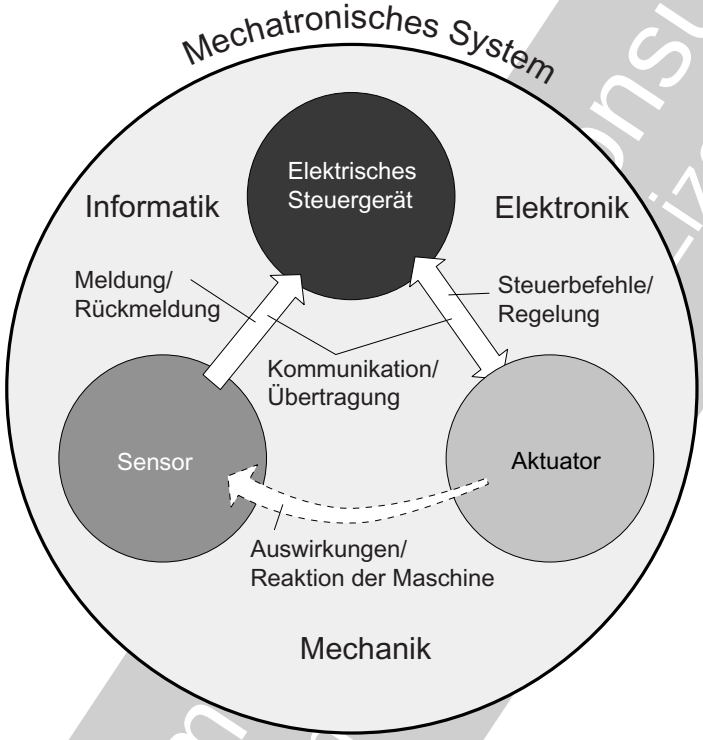
3.2.2-3 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1, ISBN 3-00-005842-7, 2000, Kapitel 3.

3.2.2-4 G. Lange, „Zerstörung von Hubschrauberturbinen durch Einsatz eines Stahls in korrosionsanfälligem Zustand bei gleichzeitig nicht werkstoffgerechter Konstruktion“, „Zeitschrift für Werkstofftechnik/ J.of Materials Technology“, 5.Jahrgang. 1974 / Nr.1, Seite 9-13.

3.2.2-5 L.Kopp, H.W.Lenz, M.Schwarz,, „Bersten eines Hochdruckbehälters während einer Wasserdruckprobe. Gedanken zur Auslegung von Hochdruckapparaten insbesondere hinsichtlich der Sprödbruchsicherheit“, Zeitschrift „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik“, Volume 17, Issue 4, (www3.interscience.wiley.com) Seiten 126-134.

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3.3 Bauteilverhalten, Messung Überwachung und Diagnose



Auf dem gesamten „Lebensweg“ einer Maschine ist die **Messung von Betriebseinflüssen** unverzichtbar. Diese fließen in

- Konstruktion/Auslegung,
- Entwicklung und Erprobung,
- Nachweisen der Serieneignung,
- Betriebsüberwachung/Diagnose

Der Siegeszug der **Mechatronik steigerte den Stellenwert solcher Messungen**. Im Flugtriebwerksbau (Bild 3.3-2.2) werden bereits seit Jahren Technologien für Überwachung im Betrieb, Problemanalysen, Trendanalysen, (‘Health Monitoring’), Abschätzung von Restlebensdauern und Logistik angewendet

Für Problemanalysen ist ein Überblick der Möglichkeiten problemspezifischer Messungen von Interesse (Bild 3.3-1.1 und Bild 3.3-1.2). Von besonderem Nutzen für die Klärung von Schadensfällen und Unfällen (Lit. 3.3-2) ist die heute übliche **Datenspeicherung**. Oft sind über die Zeit gespeicherte Daten vor dem äußerlich erkennbaren Symptom gespeichert und abrufbar. Dadurch ergibt sich die Chance einer fundierten Ursachenklärung. Leider ist deren Auswertung und Bewertung oft nur mit spezieller, nicht allgemein zugänglicher **Software** möglich. Das beschränkt die Auswertung auf den Hersteller/OEM des Produkts. Typisches Beispiel sind Kraftfahrzeuge (Bild 3.3-2.1.1 bis Bild 3.3-2.1.3).

Mechatronische Komponenten wie Steuerungen (Bild 3.3-2.1.1) benötigen ebenfalls eine Fülle spezifischer Messwerte entsprechender Sonden. Hier liegt ein hohes Problempotenzial. Umwelteinflüsse und Betrieb können über typisch lange Laufzeiten Ursache für Fehlfunktionen bis zu Ausfall sein.

© AzTrossm... ...onsult ...izenz ...ässigungsun...

Sonden zur kontinuierlichen Ermittlung von Bauteilbelastungen in Echtzeit

Messgröße	Messprinzip	Typische Anwendung	Typische Probleme
Mechanische Dehnung/ Spannung	Dehnungsmessstreifen (DMS)	Statische und dynamische Beanspruchung von Komponenten	Ablösung, Kontaktversagen, Temperatur, Feuchtigkeit
Kräfte	Dehnungsmessstreifen (DMS), - Magnetoelastische Aufnehmer - Piezoelektrische Aufnehmer - Potenziometer	Bremskraftmessung, Funktion und Belastung mechanischer Systeme	Betriebsschädigung, Kontaktversagen
Verformungen	Laser (Triangulations-verfahren, Streifen-projektion), Holografie	Verformung (statisch, dynamisch) komplexer Strukturen, Schwingungen, Schallabstrahlung	
Flächenpressung	- Flüssigkeits-Sensormatrix - Druckempfindliche Lichtleiter - Piezosensoren	Lagersitze, Schraubenauflagen/-vorspannung, Flanschanlagen, Brems- und Kupplugskräfte	Betriebsschädigung (Verschleiß) Positionierung, Zugänglichkeit, Kontaktversagen
Druck	- Kapazitiv - Magnetoelastisch - Piezoelektrisch - Piezoresistiv - Mechanisch	Drücke in Gasen und Flüssigkeiten: Hydraulik und Pneumatik: Funktion und Steuerung. Strömungen (z.B. in Turbomaschinen), Überwachung und Früherkennung von Problemen (z.B. Filterverstopfung)	Langzeitversagen des Sensors. Versagen von Kontakten.
Drehmoment	- Wirbelstrom - Magnetoelastisch - Piezoelektrisch - DMS	- Leistungsmessung - Montage (Schrauben)	
Temperaturen	Thermoelektrisch: - Thermoelemente - Metallwiderstände - Anemometrie - Hitzdraht - Heißfilm - Halbleiter - Heißleiter und Kaltleiter	Gase, Flüssigkeiten - Steuerung, Überwachung - Strömungsgeschwindigkeit, - Durchfluss Festkörper: Steuerung, Überwachung	- Langzeitschädigung Korrosion, Oxidation, elektrische Isolation, - Risse und Brüche durch Schwingungen und Wärmespannungen, - Trägheit bei schnellen Vorgängen
	- elastische Verformung mit Lasermessung	Strömung in Gasen und Flüssigkeiten	
	Pyrometer	Oberflächenmessungen an Heißteilen	Zugänglichkeit, Einflüsse auf Strahlung und Reflexion der Messfläche, Verschmutzungen am Pyrometer
Bewegung	Induktiv - Wirbelstrom - Tachogeneratoren - Halleffekt Kapazitiv Optisch	- Wegaufnehmer - Drehzahlmessung - Position-/ Stellung bestimmen (z.B. Nockenwelle)	Kontaktversagen, Schäden durch dynamische Überlastung (Spulen) oder Temperatur (Kunstharzisolation)
Beschleunigungen	Piezo, mechanische Geber	- Sicherheitsausrüstung (z.B. Airbag, Gurtstraffer) - Warnanlagen (Schwingungen, Unwuchten) - Schwingungen von Bauteilen (Körperschall) - Luftschall	Langzeitfunktionssicherheit Aussagefähiger Anbringungsort praxisgeeignete Triggerschwellen
Abstände	Kapazitiv, Induktiv, Laser	Spaltänderung (Labyrinthspalte in Turbomaschinen), Überwachung von Maschinen.	Langzeitstabilität-Kontakte/Impulsübertragung, Unsymmetrische Verteilungen, Hochfrequente Änderungen.

© Axel Possmann Turboconsult
Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Bild 3.3-1.1

Messgröße	Messprinzip	Typische Anwendung	Typische Probleme
Durchfluss Menge Geschwindigkeit	Elektrisch und mechanisch, Wärmezu-/ und -abfuhr/ elektrischer Widersttand	Kraftstoffzumessung. Überwachungs- und Warnanlagen (Öl, Hydraulik, Turbomaschinen usw.). Luftströmung, Ansaugströmung von Verbrennungs-Kraftmaschinen. Betätigung von Reinigungsvorgängen an Filtern ('Freibrennen').	Verunreinigung, Verstopfung, Viskositätsänderung.
Schall/Akustik Partikelanfall Menge, Art	Elektrisch, Piezo	Schallmessungen Schallunterdrückung (aktive Systeme), Schalldämmung/-dämpfung (passive Systeme).	Anwendungsspezifisch, Messaufbau, Messort
in Gasen	Laser, Druckabfall in Filtern Filterablagerungen/ -verfärbungen	Abgasreinheit, Verbrennungsmotoren und Kraftwerke.	Anwendungsspezifisch, Messaufbau, Messort
in Flüssigkeiten	Änderungen elektrischer und magnetischer Felder Optisch (Trübungen) Magnetdetektoren (Manet-Chipdetektoren) Druckabfall an Filtern und Sieben	Kraftstoffsystem Ölsystem	Kontaktprobleme, geeignete Messstelle
Chemische Zusammensetzung	Lambdasonde. Elektrische Widerstandsmessung	Abgasreinheit von Verbrennungsmotoren, Heiztechnik	Langzeitversagen des Sensors, Kontaktversagen, Reaktionen ('Vergiftung') mit Verschmutzungen (z.B. Schwefel, Blei)
Feuchtigkeit	Absorptionssensoren Längenänderung (Quellen, Schwinden), Resonanzänderung. Veränderung von Viskosität, Leitwert und Permittivität. Elektrische Leitfähigkeit	Ölüberwachung, Luftfeuchtigkeit	
Regen	Optoelektronisch	Regensensor,	

Bild 3.3-1.2

Bild 3.3-1.1 und Bild 3.3-1.2 *(Lit. 3.3-1, 3.3-3 bis Lit. 3.3-5, 3.3-20 und 3.3-21): Diese Zusammenstellung soll dem Konstrukteur bei Konzept und Auslegung sowie Problemanalysen Hilfestellung für eine* ***gezielte Auswahl geeigneter Sensoren und Messverfahren*** *ermöglichen. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht nicht. Behandelt werden solche, die zumindest das Potenzial einer* ***kontinuierlichen 'Realtime'/'Online' Messung*** *haben. Dabei geht es um*

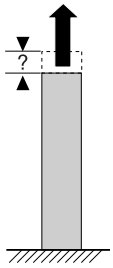
- Konzepte für ***problemspezifische Messungen in Überwachungs- und Steuerungsanlagen****. Hier bietet sich besonders ein Blick auf die in Kfz implementierten Technologien an (Bild 3.3-2.1.1 bis Bild 3.3-2.1.3).*

- Abschätzung der ***Grenzen von Mess- und Nachweismöglichkeiten****.*

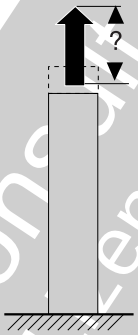
- Anregung zur Nutzung möglicher ***klärender Messungen und Aufzeichnungen*** *bei Schäden und Problemen in* ***der Anwendung****.*

© Axelmossmann - Turbocomsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

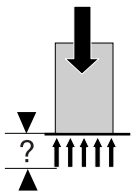
*-Zusätzliche **Messungen an Versuchsaufbauten** und im Betrieb im Rahmen von Nachweisen, Optimierung von Berechnungsprogrammen und Schäden.*
*- Angaben zu **Funktionsprinzip** und potenziellen **Schwächen ausgewählter Messsysteme/ -verfahren** soll bei Untersuchungen zur Klärung des Versagens von Sonden helfen (Bild 3.3-3.2).*



Mechanische Dehnungen bzw. Spannungen:
***Resistive Aufnehmer** basieren auf **einer Wegmessung**. Mit Hilfe des Elastizitätsmoduls lassen sich die Dehnungen in Spannungen umrechnen.*
***Dehnungsmessstreifen** (DMS): In PKW dienen sie beispielweise zur Erkennung der Sitzbelegung und des Gewichts. Damit wird gegebenenfalls der Airbag aktiviert und die Auslösung optimiert. Gemessen werden statische und dynamische Dehnungen über die Widerstandsänderung der Leiterlänge des aufgeklebten Sensors.*
***Metall-DMS** werden von einem filigranen, folienartigen, meanderförmigen Messgitter gebildet.*
***Halbleiter-DMS** zeichnen sich durch ihre besonders hohe Messempfindlichkeit aus. Das Sensorelement besteht aus einem dünnen Siliziumstreifen.*
Dehnungsmesstreifen haben sich seit langem bewährt. Ihre spezifischen Probleme sind Temperatur- und Feuchtigkeitsempfindlichkeit, Schwingermüdung, Ablösung und Versagen von Kontakten und Leitungen sowie Empfindlichkeit für Beschädigungen. Auch können sie durch Masseänderung und Dämpfung die Messung an filigranen Bauteilen verfälschen (Bild 5.4.3.3-3). Alle diese Probleme lassen sich jedoch bei ausreichender Erfahrung vermeiden.



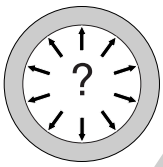
Kräfte:
***Dehnungmessstreifen** (DMS, siehe oben): Eine Eichung der belasteten Struktur (z.B. Kraftmessdose) mit appliziertem DMS ermöglicht das Messen von **Kräften**.*
***Magnetoelastische Kraftaufnehmer** nutzen die Veränderung der magnetischen Eigenschaften eines Stapels geeigneter, meist aus gegeneinander elektrisch isolierten Blechen (siehe Drehmoment).*
***Piezoelektrische Kraftaufnehmer** nutzen den Piezoeffekt (siehe Druckaufnehmer) eines Stapels dünner Piezokristallplättchen.*
***Potenziometer** messen die Veränderung des Sensorwiderstands durch eine Weg-(Verschiebung) oder Winkeländerung (Verdrehung). Über verschiebliche Kontakte wird die Messlänge eines Leiters und so sein elektrischer Widerstand verändert.*



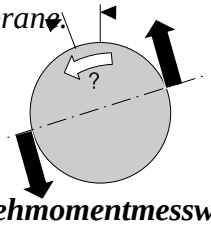
***Flächenpressung**:*
Obwohl die Aufgabe auf den ersten Blick einfach erscheint, gibt es nur wenige befriedigende kontinuierliche Verfahren (Lit. 3.3-13). Diese sollen nach Möglichkeit auch die Verteilung der Pressung anzeigen oder auf diese rückschließen lassen.
*Der zeitliche Verlauf einer veränderlichen Flächenpressung wird in Echtzeit von einem Messsystem mit einer **Sensormatrix** erfasst. Auch eine Messung bei Entlastung ist damit möglich. Der Sensor nutzt eine **druckempfindliche Flüssigkeit zwischen Trägerfolien***

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

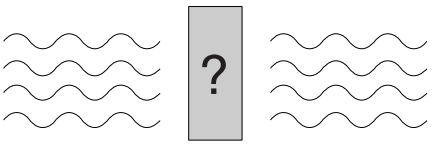
(TekScan®-System, Lit. 3.3-12). Die Gesamtdicke beträgt lediglich ca. 0.12 mm.
Für die Messung der ***Flächenpressung unter Schraubenköpfen*** *bietet sich ein System an, das auf der* ***Querdruckempfindlichkeit der Lichtleitfähigkeit*** *optischer Fasern beruht (SPASS® Dremodisc, Lit. 3.3-11). Dieser Sensor ist auch für kontinuierliche oder sporadische Überwachung von Schraubenverbindungen bei höchsten Sicherheitsanforderungen (z.B. Chemieanlagen, Reaktoren) geeignet.*
Piezo-Quarzsensoren *nutzen die verformungsabhängige elektrische Ladung (Lit. 3.3-13). Das flächige Auflösungsvermögen scheint deutlich von der Zahl der Sensoren begrenzt. Eine Anwendung ist die auf Prüfständen ermittelte Flächenpressungsverteilung unter dem* ***Bremsbelag*** *einer Scheibenbremse.*



Druck*:*
Kapazitive Differenzdruckaufnehmer *nutzen Durchbiegungen von Kondensatorplatten unter einer Druckdifferenz. Damit verändert sich die als Messgröße verwendete Kapazität.*
Magnetoelastische Druckaufnehmer *nutzen die Veränderung der magnetischen Eigenschaften eines geeigneten, meist aus Blechstapeln gebildeten Sensors (siehe Drehmoment).*
Piezoelektrische Druckaufnehmer *nutzen die Entstehung elektrischer Ladungen an der Oberfläche geeigneter, druckbelasteter Werkstoffe. Das Sensorelement wird über eine elastische Membrane belastet.*
Piezoresistive Drucksensoren *sind geometrisch Dehnungsmessstreifen ähnlich (Membranform). Sie beruhen auf der Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit bei elastischer Dehnung von Halbleitern. Sensorelement ist eine Siliziummembrane.*



Drehmoment*:*
Eine ***Wirbelstrom-Drehmomentmesswelle*** *besteht aus Scheiben mit elektrisch leitenden und isolierenden Bereichen. Diese verschieben sich bei Verdrillung der Welle gegeneinander. Mit einer feststehenden Messpule werden Wirbelströme erzeugt, die wiederum eine auswertbare Wirkung auf das Magnetfeld dieser Spule haben.*
Magnetoelastischer Effekt : *Genutzt wird die Änderung des magnetischen Verhaltens besonderer ferromagnetischer Legierungen unter mechanischer Belastung. Ein Beispiel ist eine torsionsbelastete, meist geeignet beschichtete Messwelle.*
Piezoelektrische Drehmomentaufnehmer *nutzen die Entstehung elektrischer Oberflächenladungen bei Schubbelastung geeigneter Werkstoffe (Quarze). Der Quarzsensor wird über Reibung mit geeigneten Anschlüssen belastet.*
DMS-Drehmomentmesswellen *sind mit DMS bestückt. Sie registrieren die elastischen Verformungen bei Torsionsbelastung.*
Ein ***Optischer Drehmomentsensor*** *(z.B. in Servolenkungen, ESP) wertet optisch die unterschiedliche Verdrehung zweier Scheiben auf der Lenkachse aus.*



Temperaturen*:*
Thermoelektrische Aufnehmer: *Dazu gehören* ***Thermoelemente****. Sie beruhen auf dem thermoelektrischen Effekt zweier materialschlüssig verbundener, unterschiedlicher Metalle (Thermopaare). Eine Temperaturdifferenz zwischen offenem Ende und der Verbindungsstelle führt zu entsprechender, temperaturabhängiger, werkstoffspezifischer elektrischer Spannung.*
Besonderheiten und Grenzen sind der umfangreichen Fachliteratur zu entnehmen. Dabei ist auch auf ***nicht immer bewusste Eigenschaften*** *zu achten:*
- ***Ansprechgeschwindigkeit***
- Größe der Messperle.
- Reaktionen der Werkstoffe der Elementdrähte mit dem zu messenden Gasstrom. Enthält die-

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

ser beispielsweise merklich ***unverbrannte Kohlenwasserstoffe****, können diese an der* ***Palatindraht*** *eines Elements auf Grund des* ***Katalysatoreffekts*** *heftig oxidieren. So wird Wärme frei die das Messergebnis durchaus nennenswert verfälscht.*

- Natürlich müssen auch anwendungsspezifische Langzeitveränderungen in einem zulässigen Rahmen bleiben.

Metallwiderstände *beruhen auf der Veränderung des Ohm'schen Widerstands von Metallen (Draht) bei Temperaturänderung.*

Generell sind ***Ablagerungen*** *auf dem Messelement problematisch. Bei Sensoren im Ansaugbereich von Motoren handelt es sich gewöhnlich um Partikel, Wasser und Motorenöl. Dabei kann Erosion der Partikel den Sensor schädigen und/oder die Ablagerungen den 'Wärmehaushalt' verändern.*

Thermische Anemometrie *(Lit. 3.3-16):*

Hitzdraht-Sensor*: Das Grundprinzip ist die von der Strömungsgeschwindigkeit abhängige Änderung der Temperatur und damit des Ohm'schen Widerstands eines elektrisch erhitzten nur wenige µ dünnen Drahts, der quer zur zu messenden Strömung verläuft.*

Heißfilm Sensor*: Dient modernen mechatronischen Systemen. Er misst den Ohm'schen Widerstand eines Metallfilms auf einem Keramikträger bei Temperaturänderung. Mit einem schnellen Regelkreis für den Heizstrom wird der Sensorfilm auf konstanter Temperatur gehalten. Gemessen wird die dazu notwendige elektrische Energie. So sind der Genauigkeit und Sondenlebensdauer förderliche Temperaturkorrekturen möglich. Mit einem* ***Metallfilm*** *als Sensor können* ***auf Oberflächen umströmter Körper*** *(z.B. Verdichterschaufeln) Temperaturmessungen durchgeführt werden.*

Halbleiterwiderstände *haben im Gegensatz zu Metallwiderständen kein lineares Verhalten zwischen Ohm'schem Widerstand und Temperatur. Als Werkstoff hat sich Silizium besonders bewährt.*

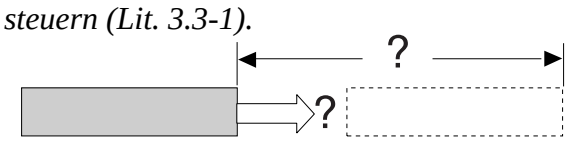
Keramikwiderstände*:*

*Bei '****Heißleitern****' nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur ab (negativer Temperaturkoeffizient). Sie haben eine Beständigkeit auch bei hohen Temperaturen und eine kurze Ansprechzeit.*

Kaltleiter *bestehen aus homogenen metallischen Halbleiterwerkstoffen. Sie erhöhen den Widerstand mit der Temperatur und werden als Überlastschutz verwendet.*

Lasergestützte Anemometrie *(Laser-Cantilever-Anemometer, Lit. 3.3-17): Genutzt wird ein winziger (ca. 0,15 x 0,03 x 0,005 mm), einseitig eingespannter, spiegelnder* ***Biegebalken****. Die Orientierung ist quer zu einer* ***lichtdurchlässigen Strömung****. Unter den Wärmespannungen verbiegt er sich elastisch. Die Winkeländerung an der Spitze verändert die* ***Reflexionsrichtung eines Laserstrahls*** *der auf einen Positionsdetektor trifft. Dieser gibt entsprechende elektrische Signale ab. Die Messfrequenz reicht bis 10^5 Hz.*

Pyrometer *(Strahlungsthermometer, Lit. 3.3-18): Es handelt sich um ein* ***berührungsloses*** *Verfahren. Ausgewertet wird die (Wärme-) Strahlung des erhitzten Körpers (Emission). Für Temperaturen über 350°C kommen gewöhnlich Fotodioden zum Einsatz. Dabei wird die* ***Intensität (Helligkeit) der Strahlung*** *in einem bestimmten Wellenlängenbereich (Farbe) gemessen. Ist der von Material, Wellenlänge und Temperatur abhängige* ***Emissionsgrad*** *bekannt, lässt sich direkt auf die Material-/Oberflächentemperatur schließen. Das ist problematisch wenn sich der* ***Emissionsgrad durch Betriebseinflüsse wie Oxidation und/oder Erosion verändert****. Trotzdem haben sich Pyrometer bei statischen Anwendungen (z.B. Öfen) und zur Messung der Temperatur rotierender Bauteile wie Turbinenschaufeln bewährt. So lässt sich beispielsweise der Kraftstoffzufluss und damit die Gastemperatur steuern (Lit. 3.3-1).*



© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bewegungen *(Geschwindigkeit/Drehzahlen, Positionen, Wege): Ein Beispiel ist der sog.* ***Gierratensensor*** *(Drehgeschwindigkeitssensor) der Schleudern eines PKW für das ESP erfasst. Weitere Anwendungen dienen zur Ermittlung der momentanen* ***Stellung rotierender Bauteile*** *(z.B. Nockenwellen und Kurbelwellen) für die Motorsteuerung eines PKW.*
Drehzahlen werden z.B. im Kfz vielfältig benötigt. Dazu gehören die Motorsteuerung (z.B. Kurbelwelle) sowie ABS bzw. ESP (Rad-Drehzahlen, Bild 3.3-2.1.1).

Drehzahlmessung*:*

Induktive Sensoren

Ein ***Sensor mit Impulsrad*** *wird sehr häufig eingesetzt. An dem Sensor laufen in engem Abstand die 'Zähne' einer mit Axialnuten versehenen Welle aus magnetischem Werkstoff vorbei (Impulsrad). Diese induzieren je nach Bauart in einer Spule des feststehenden Sensors oder bei Verwendung eines Permanentmagneten in einer Auswertungselektronik elektrische Impulse.*

Wirbelstromdrehzahlmesser *nutzen elektrodynamische Aufnehmer. Messgröße ist die abbremsende Gegenkraft. Die Welle trägt einen Dauermagneten. Dieser liegt gegenüber einer drehbaren, unmagnetischen, metallischen (Mess-) Scheibe (z.B. Aluminium). Die drehende Welle erzeugt in der Messscheibe Wirbelströme mit einer Umfangskraft die gegen eine Feder wirkt. Der Zeigerausschlag entspricht dem Gleichgewicht zwischen Federkraft und Wirbelstromeffekt.*

Tacho-Generatoren *sind eine Variante. Es rotiert ein metallischer Zylinder aus unmagnetischem Werkstoff. Zwei in einem Winkel von 90° zueinander stehende sind radial zur Wellenachse orientiert. Die „Erregerspule" erzeugt Magnetfelder mit Wechselspannung. Diese induzierten Wirbelströme an der Zylinderoberfläche werden von der 'Empfängerspule' registriert. Es entsteht eine, der Drehzahl proportionale Sinus-Messspannung. Die Sensoren sind robust und auch unter ungünstigen Umgebungsbedingungen (Schmutz, Öl, Wasser, Eis) einsetzbar.*

Wegaufnehmer *bestehen aus Weichmagneten in einer Spule. Gemessen wird die Veränderung der Induktivität. Sie beruht auf einer Luftspaltänderung oder Verschiebung des Magneten.*

Hall-Sensoren *(z.B. Messung der Nockenwellenstellung) nutzen den Halleffekt. Eine Spannung die in einem stromdurchflossenen, plattenförmigen Leiter in einem Magnetfeld entsteht. Als Sensor dient ein Stapel dünner Halbleiterplättchen. Bei einem Drehzahlmesser steht diese Sonde radial zu einem rotierenden ferromagnetischen Zahnrad.*

Kapazitive Sensoren*/Aufnehmer nutzen die Veränderung eines Kondensators aus zwei gegenüberliegenden Leiterplatten. Sie werden von Sensorelektrode und Sensorgehäuse gebildet. Dazwischen befindet sich das Dielektrikum. Bei geeigneten Isolierwerkstoffen wie Keramiken sind Arbeitstemperaturen bis zu 1300°C möglich.*

Potenziometer *sind robust und werden häufig eingesetzt. Ein Beispiel ist die Drosselklappenpositionierung für den Ansaugstrom eines Verbrennungsmotors. Es handelt sich um einen meist mit einer Drehbewegung stufenlos verstellbaren Ohm' schen Widerstand. Der bewegliche Schleifarm liegt auf der feststehenden Widerstandsbahn und verändert bei Betätigung deren Länge. Die Auswertungselektronik kann* ***neben der Stellung auch die Winkelgeschwindigkeit*** *des Schleifarms und damit des zugehörigen Bauteils (Drosselklappe) bestimmen. Problematisch sind die begrenzte Lebensdauer (Verschleiß) und Beschleunigungen durch schnelle Positionsänderungen oder Vibrationen.*

Optische Aufnehmer *(Stroboskop) bestehen aus einer Beleuchtung in der Frequenz einstellbarer aufeinanderfolger Lichtblitze. Sie beleuchten eine rotierende Welle mit optischen Markierungen am Umfang. Oft bilden geometrische Besonderheiten des zu messenden Bauteils (Wellennuten, Zahnradzähne, Lüfterflügel) bereits ein geeignetes Muster. Entspricht die*

© Axel Rossmann - Turbo consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Blitzfrequenz der Markierungsfrequenz steht das Bild. Damit entspricht die Blitzfrequenz dem Messsignal.

***Abstandsmessung mit Laser**: Gemessen wird die Veränderung des Auftreffpunkts eines reflektierten Laserstrahls mit einem Lichtsensor. Das Signal wird digital verarbeitet. Der Sensor zeichnet sich durch kurze Reaktionszeit und hohe Genauigkeit aus.*

***Ultraschall Abstandssensoren:** Genutzt wird die Laufzeit bis zur Rückkehr eines gerichteten Ultraschallimpulses. Ein Vorteil ist, dass Umgebungslicht nicht stört. Typische Anwendung ist die Abstandsmessung von PKWs mit Sensoren in der Stoßstange (Bild 3.3-2.1.3). Nachteile sind die sich mit der Temperatur ändernde Schallgeschwindigkeit, Erfassung von Objekten außerhalb des gewünschten Messbereichs, flacher Auftreffwinkel löst Reflexionsstörungen mit anderen Objekten aus und gegenseitige Beeinflussung benachbarter Sensoren.*

***Beschleunigungen**:*

*Überwachung und Aufzeichnung von **Kurvenbeschleunigungen**. Beispiel ist ein Querbeschleunigungssensor der das Schleudern eines PKW für das ESP registriert. Es lassen sich auch einzelne Stöße und hochfrequente Ereignisse messen. Weitere Anwendungen:*

- Bauteile: Körperschall,Unwuchten, periodische Vorgänge wie in Verbrennungsmotoren.

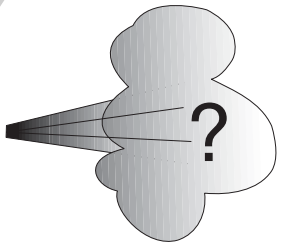
- Luftschwingungen (Schall).

*- Betätigung eines Airbag. Dazu benötigt man die **kritische Fahrzeugverzögerung** (Crashsensoren). Damit setzt die Funktion die richtige Einbaulage voraus. Damit ist die Richtung der zu messenden Beschleunigung und die Steifigkeit der relevanten Struktur zu berücksichtigen.*

***Mechanische Sensoren** sind **Feder-Masse-Systeme**. Als Gewicht dient z.B. ein Hohlzylinder mit innenliegenden Kalibriergewichten. Er wird von einer konzentrischen Spiralfeder gehalten. Im Auslösungsfall rollt der Zylinder über einen Kontakt.*

*Bei einem weiteren System wird eine **winzige Siliziummasse** im Sensor ausgelenkt. Das verändert die **elektrische Kapazität** gegenüber starren Stegen und löst einen Impuls aus, z.B. für einen Airbag.*

***Piezoelektrische Aufnehmer** nutzen die Eigenschaft eines Materials, das an der Oberfläche unter mechanischer Belastung bzw. elastischer Verformung elektrische Ladungen konzentriert. Dieser Effekt lässt sich umkehren (inversiv). Die Sensoren benötigen keine von außen zugeführte elektrische Energie. Sie werden von einem Feder-Masse-Dämpfer-System gebildet. Die (seismische) Masse lenkt als Messgröße bei den Trägheitskräften das Federelement aus und belastet das Piezoelement.*



***Chemische Analyse**: Hier ist in erster Linie die **Lambdasonde** zu nennen. Mit ihr wird in einem Verbrennungsgas, insbesondere dem Abgas von **Ottomotoren** und in der **Hausheiztechnik** der **Restsauerstoff** bestimmt. So lässt sich das Verhältnis von Ansaugluft und Kraftstoff und damit die Abgaszusammensetzung regeln. Eine Sonderanwendung ist der Nachweis unerwünschter Verbrennungsvorgänge in Systemen und Leitungen. Dazu gehören **Ölfeuer in Schmierstoffsystemen** (Lit. 3.3-22). Der Messung dienen die folgenden Eigenschaften besonderer Keramiken bei einer werkstoffspezifischen Betriebstemperatur:*

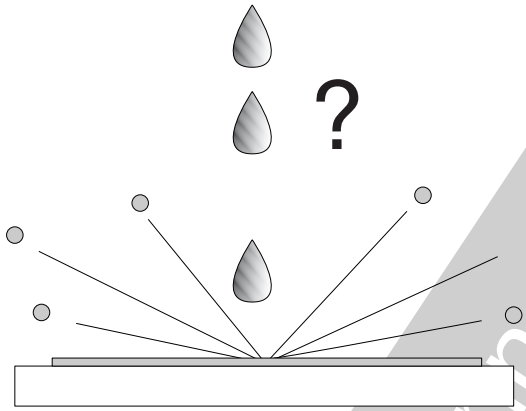
*- die Spannung im Festkörperelektrolyten (**Nernstsonde**, vewendet ZrO_2) oder die*

*- Widerstandsänderung der Keramik (**Widerstandssonde**, verwendet TiO_2).*

*Die Sonden zur Motorsteuerung sind von **Temperaturwechseln** und -spitzen hoch bean-*

© A. Rossmann - Tumpromot
Vorlesungsunterlagen Mechatronik

*sprucht. Besonders schädlich sind Mängel in Verbrennung, Zündzeitpunkt und Ventilsteuerung. Die Sondenfunktion wird von Ölrückständen, Kraftstoffadditiven (Bleiverbindungen) und -verunreinigungen (Schwefel) beeinträchtigt („**Vergiftung**“). Darüber hinaus können Betriebseinflüsse wie Oxidation und Vibrationen zum Ausfall der Anschlusskontakte führen.*



***Physikalische Daten**:*
***Feuchtigkeit**:*
***Regen**: Ein Beispiel ist die Nutzung eines **Regensensors** in Pkws (Scheibenwischersteuerung, Schiebedachbetätigung, Bild 3.3-2.1.3) und Gebäude (Dachluken und Markisen). Er zeigt an ob es regnet und gegebenenfalls wie stark. Gemessen wird die Benetzung eines kleinen Messfeldes (wenige cm²). Das Messprinzip ist **optoelektronisch**. Sondenkomponenten sind eine Lichtquelle (Leuchtdiode = LED) und eine Fotodiode als Detektor. Strahlein- und -austritt in die Scheibe übernimmt ein aufgeklebtes Prisma. Genutzt wird die Reflexion als Folge der Brechung eines schräg zur Glascheibe einfallenden Lichtstrahls. Ist die Scheibe außen trocken, wird die gesamte Lichtmenge zur Fotodiode reflektiert (Totalreflexion). Erfasst werden können Wassertropfen auf der Scheibe, weil sie die Reflexion beeinträchtigen. Die Schwächung ist umso größer, je mehr die Messfläche wasserbedeckt ist, d.h. je heftiger der Niederschlag. Damit lässt sich das Wischerintervall steuern.*
***Luftfeuchtigkeit** ist das Verhältnis in % des vorhandenen Wasserdampfgehalts zum maximal möglichen in Luft mit gleicher Temperatur und Druck. Die Luftfeuchte ist für Verdunstungsvorgänge, Tauwasser-/Schwitzwasserbildung und das Verhalten vieler Materialien wichtig. Der Taupunkt bezeichnet die Temperatur ab der die Luftfeuchtigkeit bei Abkühlung kondensiert. Gemessen wird die Änderung der physikalischen Eigenschaft.*
***Absorptionssensoren** messen Längenänderungen (Quellen, Schwinden). Andere elektrische Sensoren nutzen Änderungen elektrischer Eigenschaften. Es handelt sich um Leitfähigkeit (Impedanz-Sensoren) und Kapazität des Dielektrikums (Kapazitive-Sensoren). Selbst die minimale **Wasseraufnahme von Quarz** lässt sich nutzen. Es wird eine Änderung der **Resonanzfrequenz** elektronisch ausgewertet.*
*Für die Beurteilung des Zustands des Schmieröls in Motoren kommen moderne **Ölzustandssensoren** zum Einsatz. Sie bestimmen **Viskosität, Leitwert und Permittivität** (Durchlässigkeit für elektrische Felder).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Beispiel für Funktionszusammenhänge der elektronischen Motorsteuerung eines PKW.

Sensoren	Steuergerät: Engangsparameter	Steuergerät: Steuerfunktionen	gesteuerte Systeme
für Synchronisation			
Kurbelwinkelgeber	- Kurbelwellenstellung - Motordrehzahl	Kraftstoffzufuhr	- E-Kaftstoffpumpenrelais - Kraftstoffpumpe - Einspritzventile
Nockenwellensensor	- Nockenwellenstellung	Zündung	- Zündmodul - Zündleitungen - Zündkerzen
Lastgeber			
Drosselklappenschalter	Drosselklappenstellung	Leerdrehzahlregelung	- Leerlaufregler
Luftmassenmesser	Luftmassenverbrauch	Spülung des Aktivkohlebehälters	- Regenerierventil
Temperaturfühler			
für Kühlmittel	Kühlmitteltemperatur	Kühlerbelüftung	- Kühlgebläserelais - Gebläsemotor
für Luft	Ansauglufttemperatur		
Rückkopplung		Regelung Kst.-Zufuhr	
geregelte Lambdasonde "1"	Signal vor Abgasreiniger	Heizelement "1" Regelung	Heizelement "1"
geregelte Lambdasonde "2"	Signal nach Abgasreiniger	Heizelement "2" Regelung	Heizelement "2"
Klopfsensor	Klopfgrad	Zündwinkelkorrektur	
Fahrzustand			
Geschwindigkeit	Fahrzeuggeschw.	Info. Fahrzeuggeschw.	- Bordcomputer
G-Sensor	Belastungsungleichmäßigkeit	Info. Kaftstoffverbrauch	- Leerlaufregler
Diverses			
Klimaanlage "Ein"	Klimaanlage "Ein/Aus"	Klimaanlage "Ein"	Relais der Klimaanlagenkupplung
Zündschalter	Zündschalterstellung	Versorgung der Geräte für Motorsteuerung	Hauptrelais
Bordnetz	Bordnetzspannung		
		Drehzahlmessersteuerung	Drehzahlmesser
		Fehlerinformation	zugehörige Kontrollampe
Wegfahrsperre		Wegfahrsperre "Ein"	
Diagnosegerät (angeschlossen)		Verbindung mit Diagnoseperipherie	Verwendung von Angaben aus Lit. 3.3-14

Bild 3.3-2.1.1

Bild 3.3-2.1.1 *(Lit. 3.3-14): Diese Übersicht soll eine Vorstellung zum System einer modernen* ***elektronischen Motorsteuerung*** *geben. Es enthält neben den* ***Sensoren*** *(siehe auch Bild 3.3-1.1 und Bild 3.3-1.2) die* ***Steuergeräte****, welche die Messimpulse für die gesteuerten Geräte verarbeiten. Die Zahl der Sensoren und die Komplexität des Zusammenwirkens lässt sich durchaus mit Flugtriebwerken vergleichen (Bild 3.3-2.2). Neben der Motorsteuerung gibt*

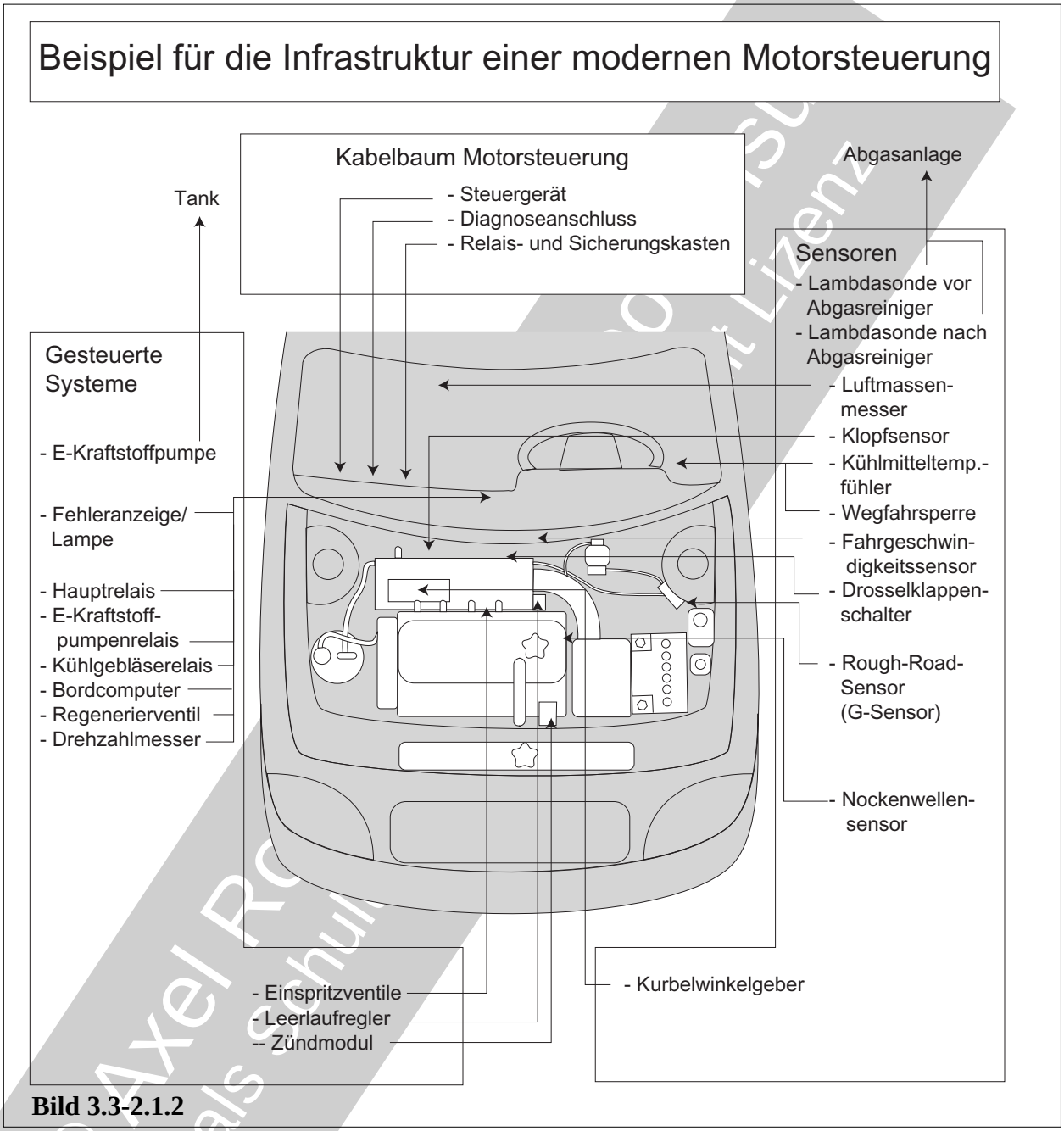


Bild 3.3-2.1.2

es noch eine Vielzahl weiterer Systeme, die in erster Linie zur Unterstützung des Fahrers dienen (Bild 3.3-2.1.3).

***Bild 3.3-2.1.2** (Lit. 3.3-14): Dies ist ein Beispiel für die Position der Sensoren (Bild 3.3-2.1.1) einer **Motorsteuerung**. Es lässt die anspruchsvolle Aufgabe des Konstrukteurs erahnen. Ist doch auf*

*- einen geeigneten **Anbringungsort** für eine optimale Messung,*

*- geringe **schädigende Einflüsse:** Verschmutzung, Feuchtigkeit, Temperatur, Vibrationen,*

*- **ausfallsichere** Leitungen/Verbindungen,*

*- **Zugänglichkeit** bei Wartung und Fehlersuche („Human Factors“) zu achten.*

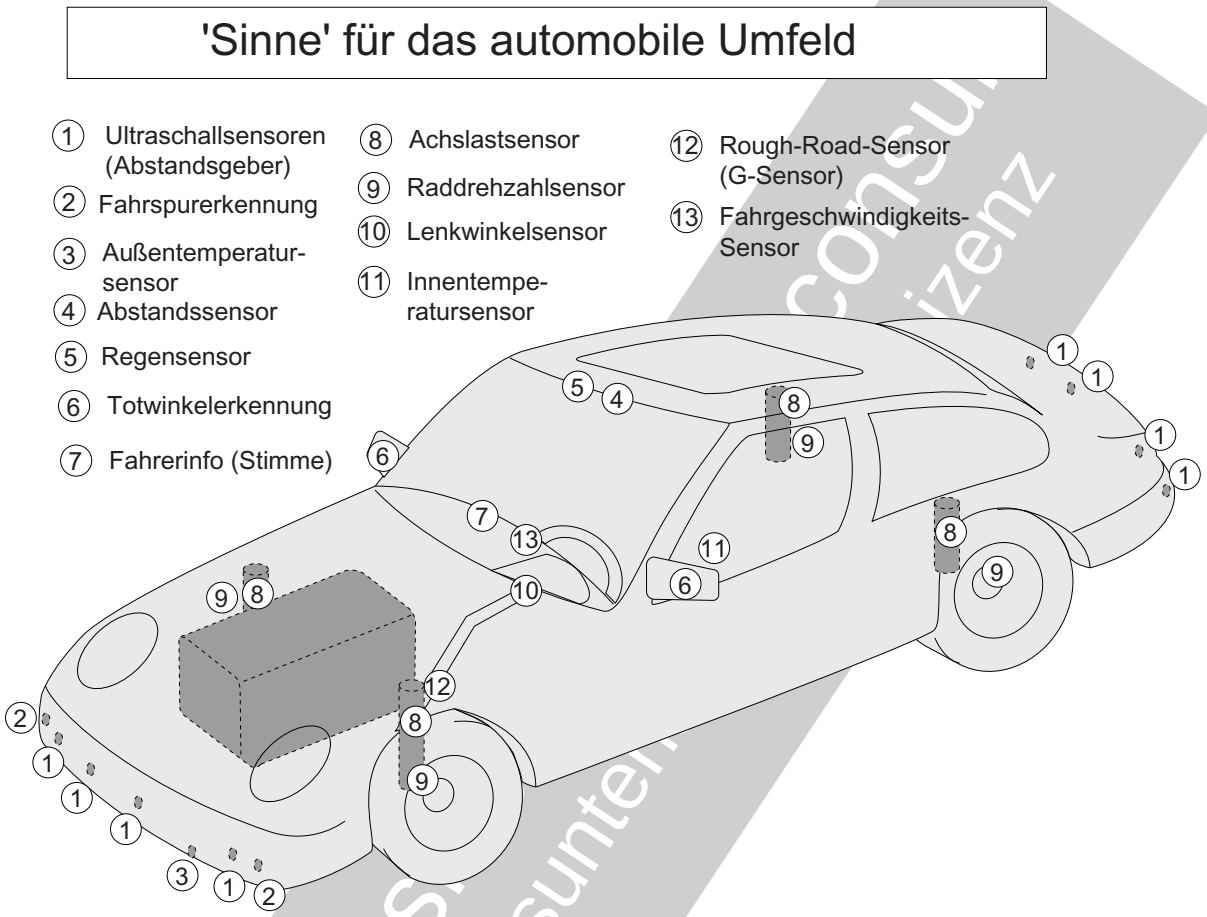


Bild 3.3-2.1.3

Bild 3.3-2.1.3 *(Lit. 3.3-21): Viele Sensoren dienen der Unterstützung des Fahrers. Sie registrieren dazu* ***Umgebungsbedingungen****. Dabei ist Vollständigkeit nicht gegeben. Beispiele sind Ausstattungen wie Heizung und Verstellung der Sitze, Scheinwerferverstellung in Kurven, automatisches Abblenden oder GPS. Auch die Hybridbauweise oder vollelektrische Antriebe werden eine Vielzahl weiterer Sensoren benötigen. Beispielsweise für die Energierückgewinnung oder die Überwachung und das Management der Energiespeicher.*

Bild 3.3-2.2 *(Lit. 3.3-1): Am Beispiel eines Flugtriebwerks soll ein Eindruck über* ***Daten der Betriebsüberwachung*** *(Monitoring) vermittelt werden. Es zeigt auf, was möglich ist und sich bereits im Serieneinsatz befindet. Viele*

Beispiel für Parameter einer Triebwerksüberwachung.

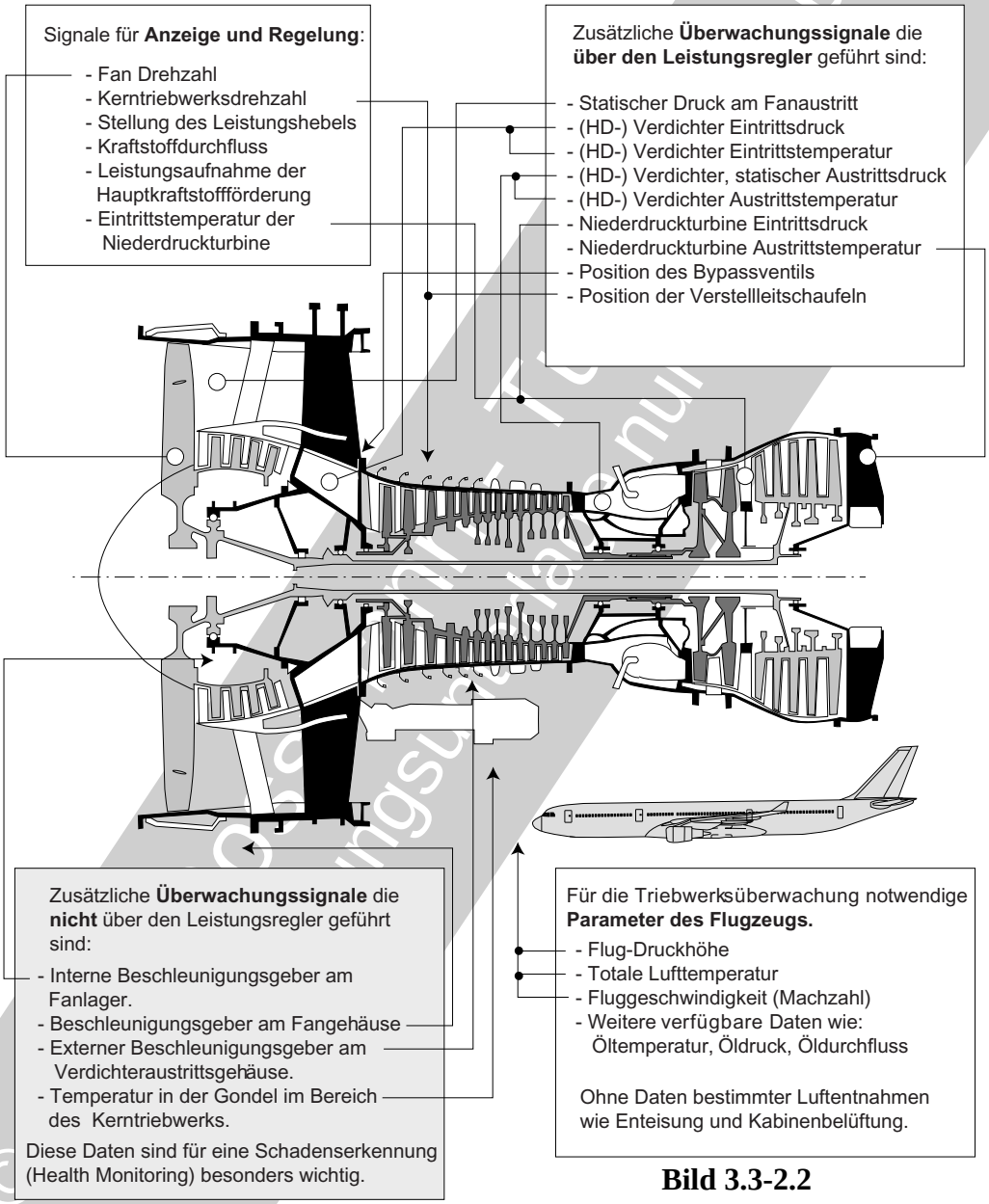


Bild 3.3-2.2

Daten werden während des Flugs über Satellit an Auswertungszentren (OEM) übermittelt. So lassen sich Probleme rechtzeitig erkennen (Health Monitoring, Bild 3.3-4). Dies ist für Sicherheit und Logistik von großer Bedeutung. Die heute übliche elektronische Überwachung eines modernen PKW für ***Diagnosen*** *im Werkstattbereich geht in die gleiche Richtung.*

In der ***Entwicklung und Erprobungsphase*** *sicherheitsrelevanter Großserienprodukte wie Kraftfahrzeugen wird ein noch intensiverer Aufwand getrieben Betriebsdaten zu ermitteln und so die* ***Auslegung abzusichern****. Natürlich werden im Serieneinsatz die Daten zu* ***Problemanalyse und Lebensdauerverbrauch kritischer Bauteile*** *genutzt (Kapitel 4.5).*

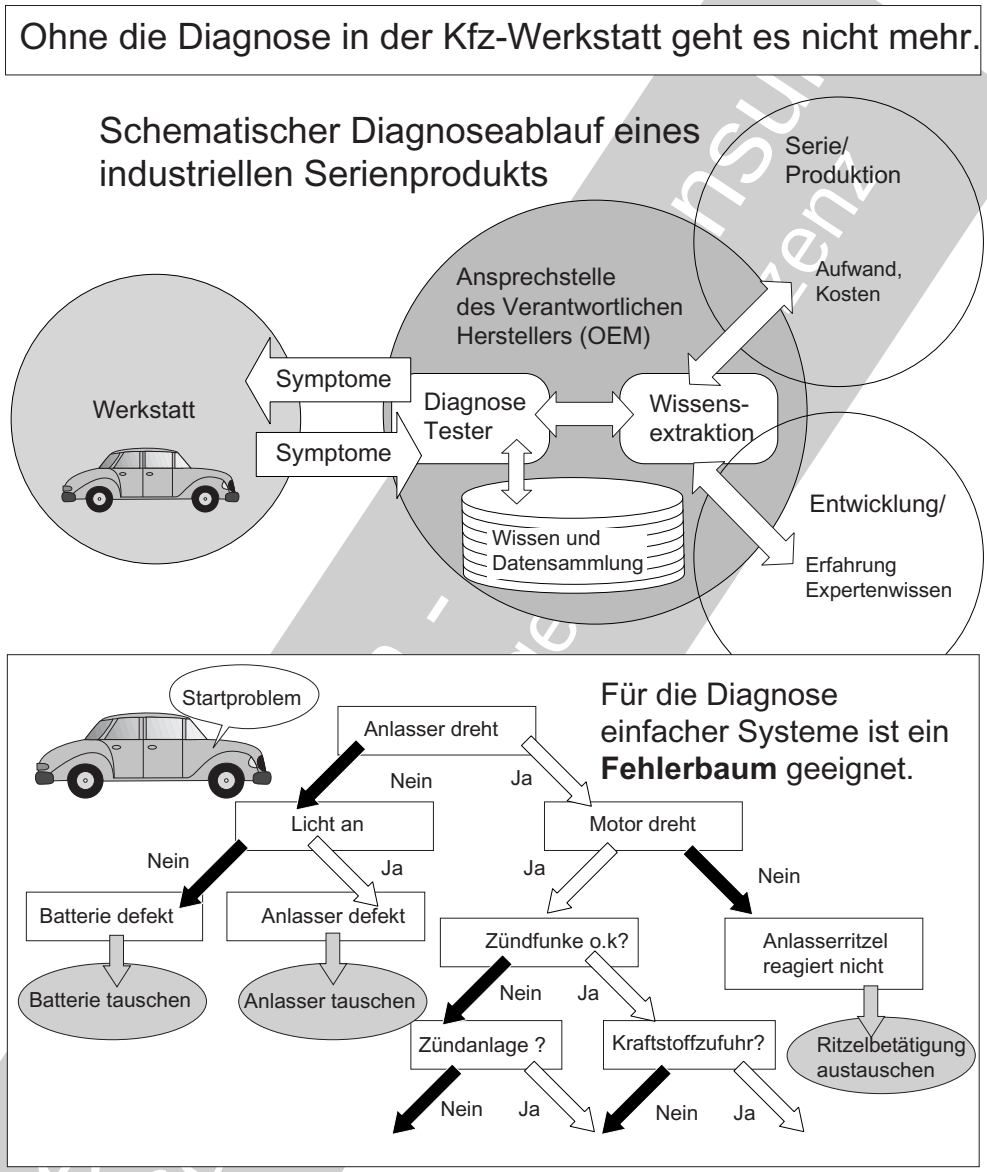


Bild 3.3-3.1

Bild 3.3-3.1 *(Lit. 3.3-6)**:** Die Skizze oben zeigt das Schema einer heute allgemein üblichen **Diagnose von Kraftfahrzeugen**. Eine Schlüsselstellung nehmen mechatronische Systeme ein. So lassen sich mit produktspezifischen Auswertungsprogrammen des Herstellers Symptome erkennen und bewerten. Basis der Auswertung sind Wissens- und Datensammlungen. Wichtig ist nutzbar dokumentiertes Wissen aus der Serie, insbesondere der Produktion (z.B. für Produktfehler) und der Entwicklung (z.B. Auslegung, Probleme im Rahmen der Entwicklung). So ist es möglich, auf **Ursachen von Symptomen** zu schließen. Das gilt auch für den Umkehrschluss auf **Symptome die von bestimmten Ursachen** zu erwarten sind.*

*Basis der Diagnosen sind die elektronischen **Steuergeräte** (Bild 3.3-2.1.1). Sie sind in der Lage Fehler/Abweichungen zu erkennen und zu melden. Zunächst wird auf **Unterbrechungen und Kurzschlüsse** in Leitungen der Datenübertragung überprüft. Es folgen schleichende Veränderungen sowie **Plausibilitätskontrollen**.*

*Ein hilfreiches Auswertungswerkzeug einfacher Zusammenhänge ist der **Fehlerbaum** (Skizze unten, Bild 3.3-3.1). Handelt es sich um komplexe Abläufe und Zusammenhänge, stehen eine Vielzahl Auswertungsverfahren zur Ver-*

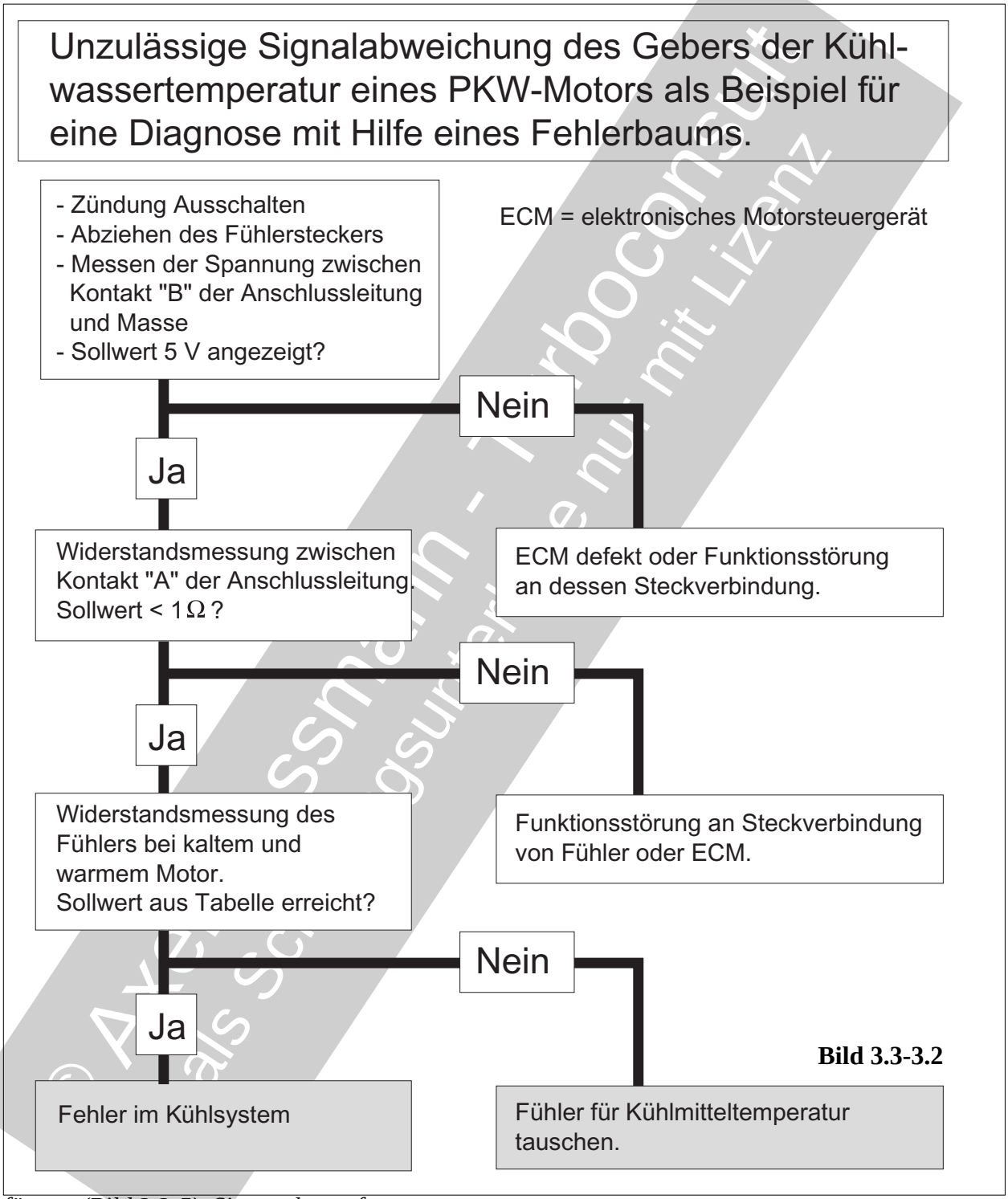


Bild 3.3-3.2

Bild 3.3-3.2 *(Lit. 3.3-14)**:** Dieses Beispiel gibt einen Eindruck einer* ***Problemdiagnose*** *an einem PKW in der praktische Anwendung (vergleiche Bild 3.3-3.1). Dahinter steht eine umfangreiche Expertise aus Betriebserfahrung, Entwicklung und Theorie (Bild 3.3-5).*

*fügung (Bild 3.3-5). Sie werden auf computergestützte Auswertungen und Bewertungen optimiert. Hierzu gehören als typische Verfahren sog. „**Probabilistische Netze**“ in Form der „**Bayes'schen Netze**“ (Bild 3.3-5 und 3.3-7, Lit. 3.3-7). Damit wird die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse und deren Auswirkungen berücksichtigt .*

"Health Monitoring" benötigt eine exakte Definition der Krankheitssymptome.

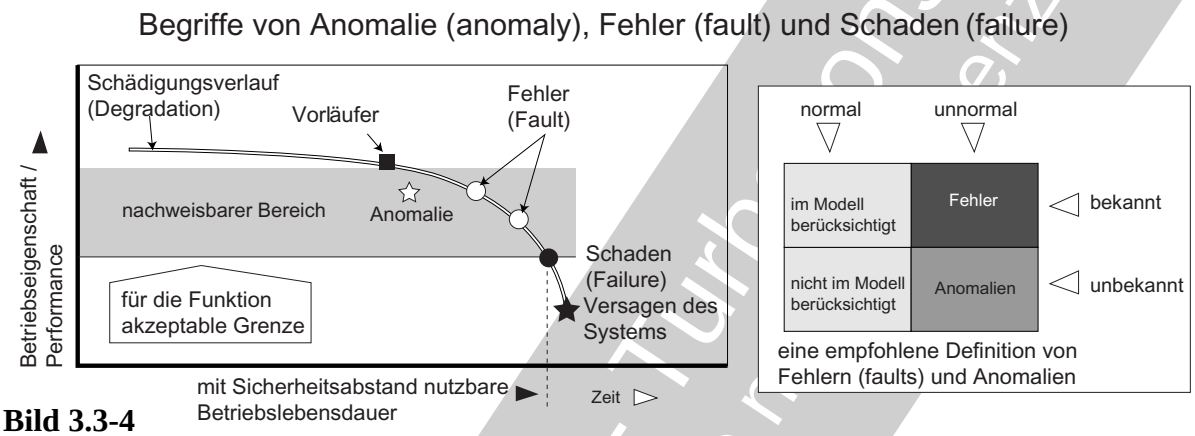


Bild 3.3-4

Merksatz:
Grundsätzlich besteht das Dilemma zwischen ausreichend sensibler Anzeige und robustem Betriebsverhalten.

Bild 3.3-4 *(Lit. 3.3-1 und Lit. 3.3-6): Offenbar leidet die* ***Effektivität und Sicherheit des Health Monitoring*** *an unterschiedlichen* ***Definitionen bzw. Unklarheiten wichtiger Begriffe****. Aus diesem Grund werden im Folgenden wichtige Definitionen angegeben.*

Ungewöhnlicher Zustand *(engl. abnormal condition) ist eine messbare* ***Abweichung des aktuellen Betriebszustands****. Sie liegt außerhalb der vorgegebenen Toleranz und wird als* ***„residual"*** *bezeichnet (Bild 3.3-6).*

Man unterscheidet zwischen drei Zuständen:

- ***Fehler*** *(engl. fault) ist ein bekannter bzw. erkannter und wiederholbarer ungewöhnlicher Zustand. Er ist im Modell des Monitoringsystems (Bild 3.3-2.2) berücksichtigt (rechtes Schaubild).*

Eine Verschlechterung (engl. degradation) wird ***erstmals wiederholbar sicher erfasst*** *(Diagramm links). Das erlaubt einen Alarm beim Betreiber.*

In vielen Fällen ist ein Fehler weniger gravierend als ein Schaden. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, das System noch einige Zeit sicher unter ***Beobachtung*** *(Nutzungsverfolgung) zu betreiben. Natürlich muss ein* ***ausreichender Sicherheitsabstand bis zur Entwicklung eines Schadens*** *gewährleistet sein.*

Fehler haben gewöhnlich eine spezifische (Haupt-) ***Ursache*** *(engl. root cause)*

Fehlersymptom *(engl. fault symptom) ist ein übereinstimmendes Merkmal mehrerer individueller Fehler. Es kann zu einem oder mehreren* ***Schadensmechanismen*** *(engl failure modes) passen, welche die* ***Funktion*** *(engl. functionality) beeinträchtigen. Ist diese quantitativ bestimmbar, sprechen wir von* ***Funktionalität*** *(engl. functionality oder capability). Wird diese auf der Y-Achse (Diagramm links) aufgetragen, zeigt die Kurve den* ***Schadensverlauf*** *(engl. failure progression path).*

- ***Schaden*** *(engl. failure) ist ein* ***Funktionsausfall*** *als ungewöhnlicher Zustand.*

- ***Anomalie*** *(engl. anomaly) ist ein* ***unbekannter bzw. vorher nicht gesehener, nicht voll verstandener oder nur zeitweise ungewöhnlicher Zustand****. Er ist im Modell nicht berücksichtigt.*

Diagnosen *(engl. diagnosis, diagnostics) beziehen sich auf den* ***Prozess zum Auffinden*** *ungewöhnlicher Zustände.*

Prognosen *(engl. prognoses) stehen für den Prozess, der einen* ***Schluss auf die zukünftige***

Auswirkung *des ungewöhnlichen Zustands ermöglicht.*
Die ***Schwere eines Fehlers*** *(engl. severity) steigt mit der* ***Häufigkeit*** *in einem System oder einer Ausrüstung (Diagramm links).*
Das Diagramm zeigt die Lage von Fehler und Schaden im Schädigungsverlauf.
Von einem ***Vorläufer*** *(engl. precursor) spricht man, wenn erste Anzeichen des ungewöhnlichen Zustands beobachtet werden. Er ist ein Indiz für die* ***Anzeigeempfindlichkeit*** *(engl. sensitivity) des Monitoring Systems (Bild 3.3-6).*
Der ***Schädigungsverlauf*** *(engl. trajectory of degradation) ergibt sich mit dem* ***Abfall der Betriebseigenschaft/Leistungsfähigkeit*** *(engl. performance) über der Lebensdauer. Beim Schaden erreicht er den unzulässigen Zustand.*

Bild 3.3-5 *(Lit. 3.3-6): Um aus den Messwerten und Informationen (Diagnosedaten) ein möglichst* ***verlässliches Diagnoseergebnis*** *zu generieren, stehen viele theoretische Hilfsmittel zur Verfügung.*
Erst die sinnvolle Kombination der unterschiedlichen Verfahren und Quellen ermöglicht höchstmögliche Aussagesicherheit. Dazu gehören:
Qualitative Modelle *betrachten die Reaktion auf eine bestimmte Situation. Sie sind dazu bestimmt Entscheidungshilfen zu geben. Voraussetzung für ein solches Modell ist ausreichende Erfahrung aus Entwicklung/Versuch und Betrieb.*

Quantitative Modelle *sind theoriebasiert. Sie nutzen mathematische Auswertungen mit oder ohne Schätzungen. Dazu ist eine iterative Optimierung hilfreich.*

Analytische Verfahren *nutzen den Input Quantitativer und Qualitativer Modelle um aus Sensorsignalen für eine Grenzwertüberwachung oder Analyse deines Prozesses.*

Virtuelles Funktionsmodell *beschreibt realitätsnah das Verhalten des Systems aus dem Input der analytischen Verfahren. Daraus bereitet es die Daten für das Diagnoseergebnis auf.*

Wissensbasierte *Ergebnisse werden aus gesammelter Erfahrung von Entwicklung/Versuch und Betrieb (Wahrscheinlichkeiten) generiert. Genutzt werden Systematiken wie Mustererkennung (findet in einer Datenmenge Regelmäßigkeiten, Wiederholungen, Ähnlichkeiten und Gesetzmäßigkeiten) und Fehlerbaumanalyse (Bild 3.3-3.1 und Bild 3.3-3.2, Lit. 3.3-24). Sie fließen direkt in das Diagnoseergebnis ein.*

Funktionale Verfahren *bewerten die Funktion auf Basis der Sensorsignale. Dabei wird auch die Statistik solcher Daten ausgewertet.*

© Axel Rossmann - TU Dresden
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Es gibt eine Vielzahl Möglichkeiten mit Diagnosedaten und Fachwissen die Ursachen von Problemen für gezielte Abhilfen herauszufinden.

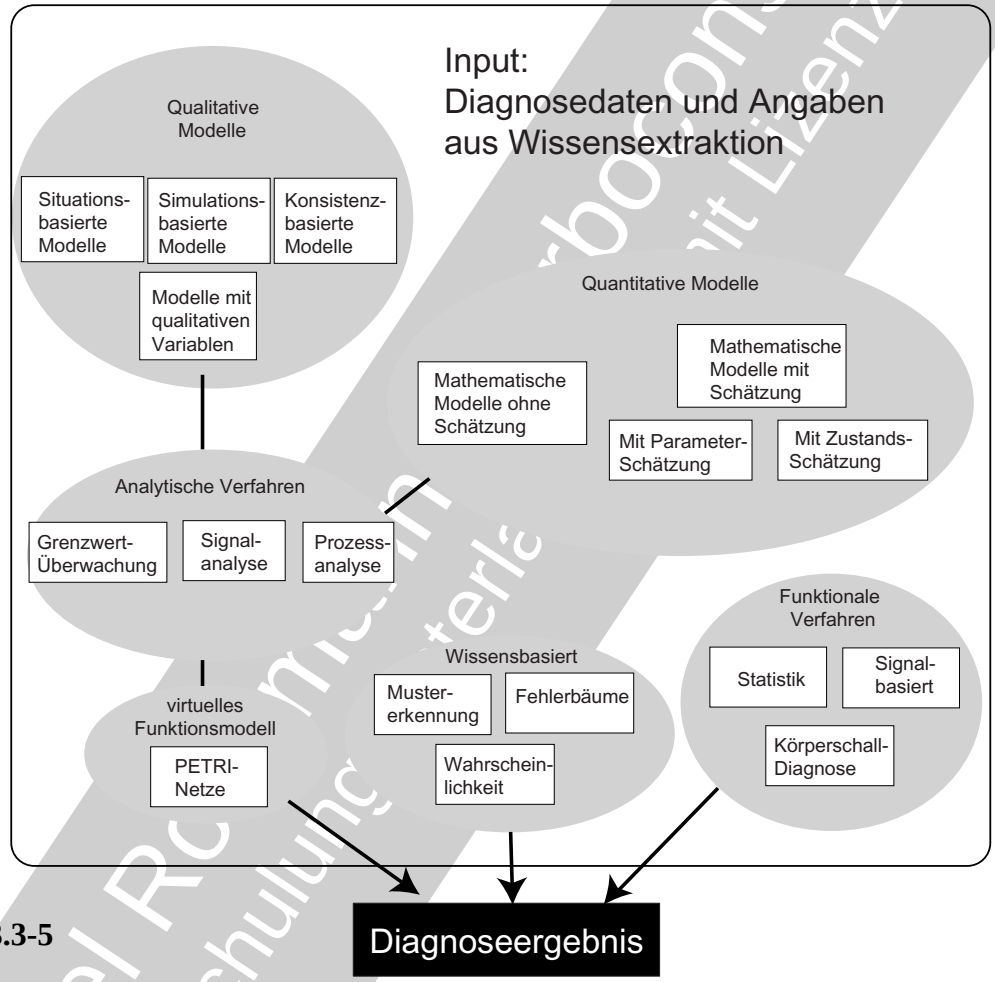


Bild 3.3-5

Signalbasiertes Beispiel ist die Körperschalldiagnose, beispielsweise eines Motorblocks. Auch diese Ergebnisse gehen direkt in das Diagnoseergebnis.

***Bild 3.3-6** (Lit. 3.3-1): Die modellbasierte Diagnose (**Model Based Controls and Diagnostics** = MBCD) kann ein leistungsfähiges und aussagesicheres Werkzeug der Überwachung sein.*

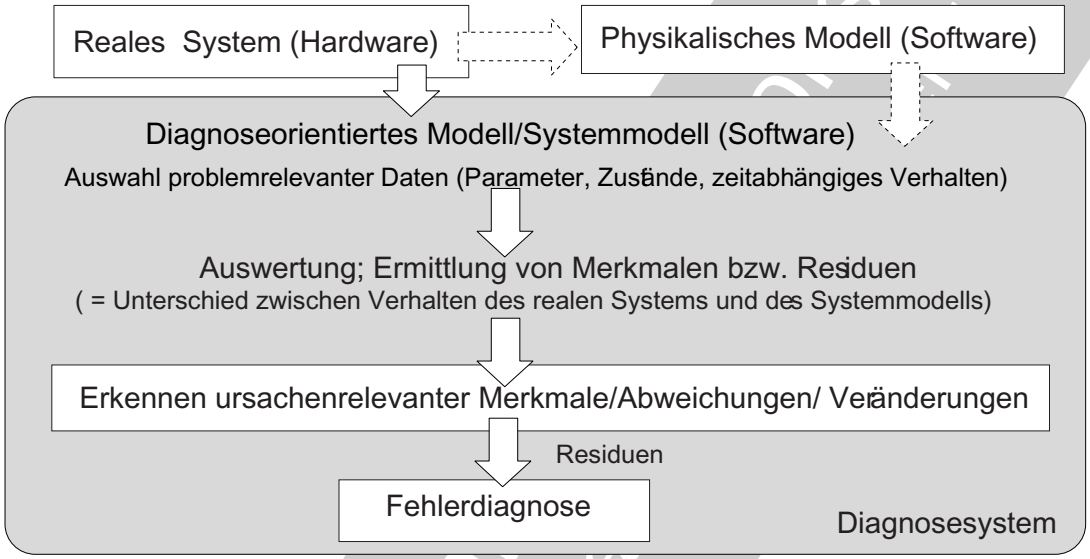
*Derartige Systeme haben sich seit Jahrzehnten bei **Industriegasturbinen** bewährt. Die Fortschritte der Computertechnik ermöglichen nun auch die 'On Line'-Anwendung in Flugzeugen.*

Die Architektur ist komplex. Sie benötigt fortgeschrittene Software- und Hardwarekomponenten. Darüber hinaus sind umfangreiche

Fortsetzung Seite 3.3-20

Bauteilverhalten
Messung, Überwachung, Diagnose

Modellbasierte Diagnosesysteme sind von großer Bedeutung für Betriebssicherheit und Logistik.



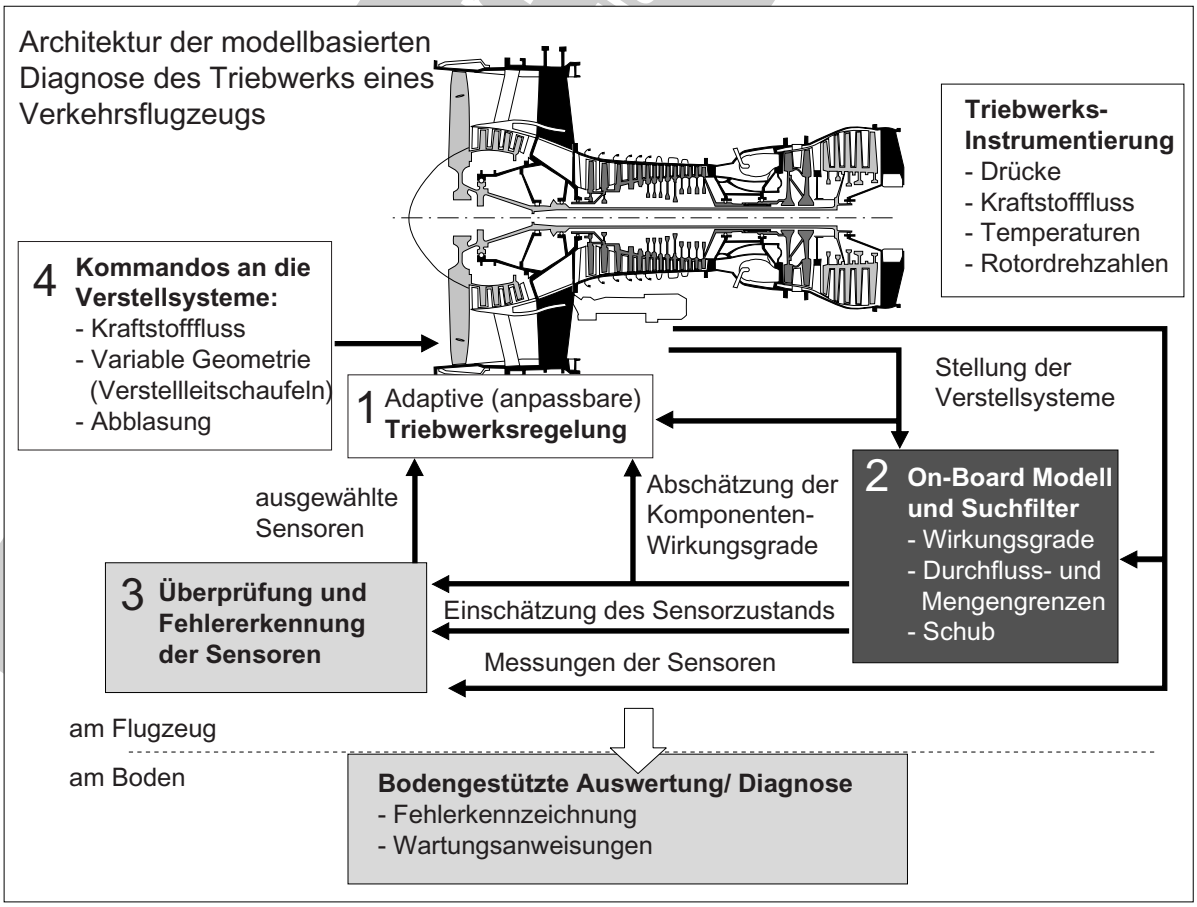


Bild 3.3-6

Fortsetzung von Seite 3.3-18

Kenntnisse/Erfahrungen zu den bestimmenden Einflüssen notwendig.
Das dargestellte System nutzt ein in Echtzeit arbeitendes ***softwarebasiertes aero-thermodynamisches Triebwerksmodell*** *(„**2**“). Dieser kontinuierlich arbeitende, elektronische Bewertungsalgorithmus bzw. Überwachungsfilter („**2**“) stimmt das Modell ab. So lassen sich ungewöhnliche(s) Komponentenverhalten/ Wirkungsgrade, abdriftende Sensoren und Verstellsysteme erfassen.*
Damit wird es möglich
- in Echtzeit ***Trends des Maschinenzustands*** *(„health“) zu verfolgen,*
- Sensoreigenschaften für eine Sensorüberprüfung (Bild 3.3-5) zu kombinieren und
- ***nicht direkt messbare Parameter*** *wie der Schub oder Grenzwerte für die Überwachungslogik von Komponenten bestimmen.*
- Die ***Sicherheit*** *durch rechtzeitiges Erkennen und Orten von Problemen und Fehlern zu steigern. So sind* ***Triebwerksabschaltungen im Flug und Verdichterpumpen zu vermeiden****. Die Logik arbeitet innerhalb des* ***Regelungssystems*** *(„**1**“). Dieses sollte anpassbar sein, um auf Ergebnisse aus der Überprüfung der Sensoren und Fehlererkennung zu reagieren.*

Bild 3.3-7 *(Lit. 3.3-, Lit. 3.3-6, Lit. 3.3-7 und Lit. 3.3-8):* ***Modellbasierte Verfahren*** *nutzen den Vergleich eines virtuellen Modells mit Messungen bzw. Beobachtungen an der Hardware bzw. dem System selbst. Dazu gibt es unterschiedliche Ansätze/Methoden.*
Es werden zunächst die ***Residuen*** *(Bild 3.3-6) ermittelt, die Differenz zwischen System****modell*** *(erwarteter/abgeschätzter Verlauf) und tatsächlichem System****verhalten*** *(gemessener Verlauf). Sie führen zum* ***Diagnoseergebnis*** *(Bild 3.3-5).*
Dabei muss ein ***Kompromiss*** *zwischen dem als* ***Fehler erkannten Grenzwert*** *und der für einen* ***Fehleralarm notwendigen Abweichung*** *(Triggerschwelle) gefunden werden.*
Typische Vorgehensweisen zur Ermittlung von Diagnoseergebnissen aus Residuen:
- Fehlermodelle,
- Netzwerke,
Neuronale Netze,
Bayes'sches Netz
Petri Netz
- Expertenwissen
- Kombination mit anderen Verfahren.

Das ***Bayes'sche Netz*** *(Lit. 3.3-6 und Lit. 3.3-7) hat in der Diagnose mechatronischer Systeme wie in Kraftfahrzeugen eine besondere Bedeutung. Es dient der Auswertung und Darstellung „****unsicheren Wissens****“. So lässt sich von erkannten* ***Symptomen auf deren Ursachen bzw. Einflüsse rückschließen*** *(Lit. 3.3-6).*
In diesem Netz ist die Auswirkung nicht wie im Fehlerbaum der Bilder 3.3-3.1 und 3.3-3.2 auf „Ja“ oder „Nein“ beschränkt. Es besteht statt dessen eine Unsicherheit für das Verhalten der Komponenten eines Systems. Dafür liegen spezifische Wahrscheinlichkeiten vor. Es kann sich um die Unsicherheit in einer ***Aussage zum Zustand einer Komponente*** *oder einer* ***Schlussfolgerung und damit der Wirksamkeit einer Abhilfe*** *handeln.*
Man unterscheidet:
Die ***a-priori-Wahrscheinlichkeit*** *bezieht sich auf die Ursache vor Eintreten des Symptoms.*

© Axel Rossmann - Proconsult
als Schulungsunterlage in Lizenz

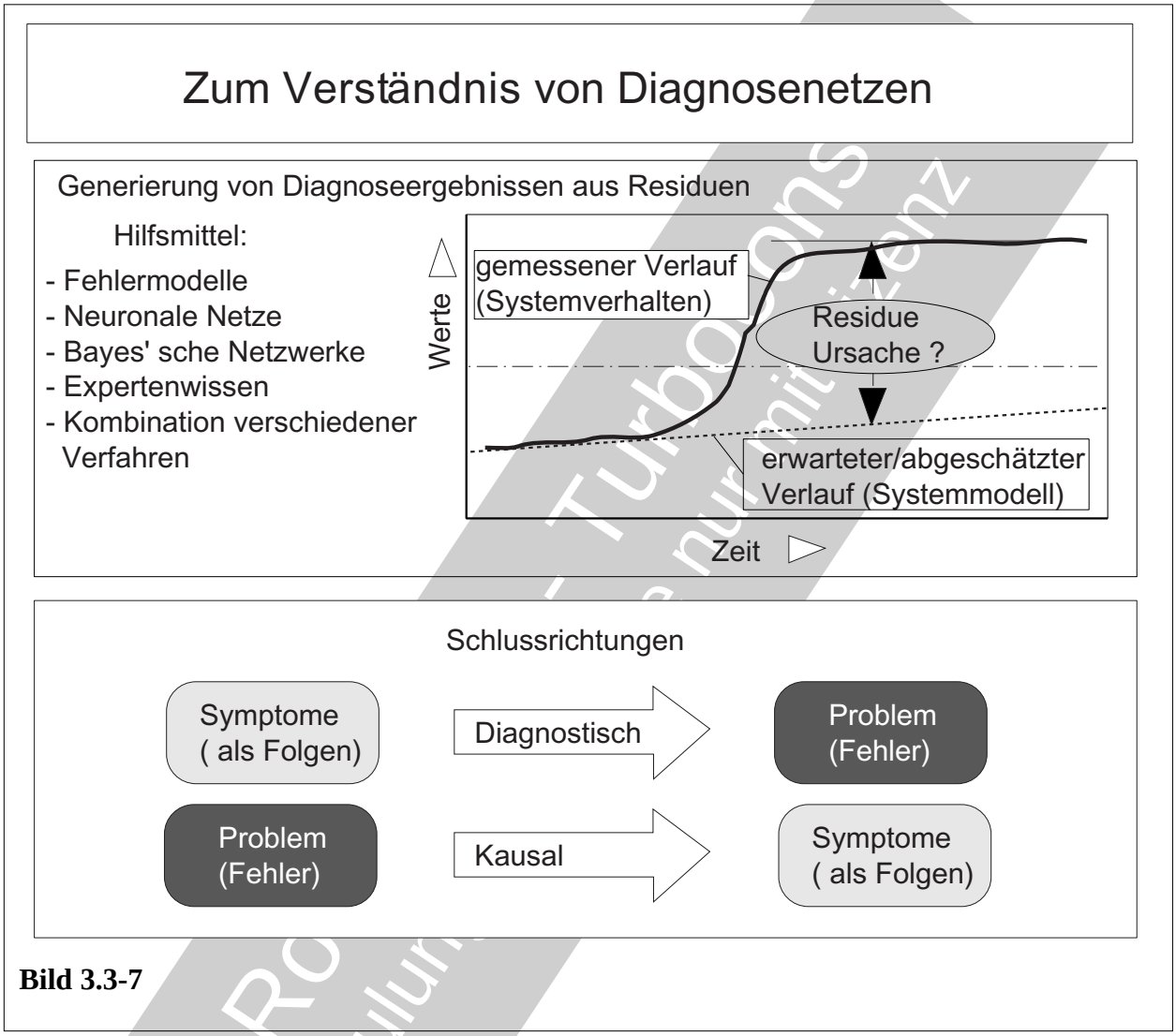


Bild 3.3-7

*Die **a-posteriori-Wahrscheinlichkeit** gibt Auskunft über das Eintreten des Ereignisses nachdem das Symptom erkannt wurde.*
*Man unterscheidet zwei **Schlussrichtungen** (Rahmen unten):*
***Diagnostische Schlussrichtung:** Schließt aus Symptomen (Folgen) auf die Ursache bzw. auf ausgefallene Komponenten. Dieses Vorgehen ist eher **intuitiv und wird in der Praxis bei Reparaturen** bevorzugt.*
***Kausale Schlussrichtung:** Schließt von den Ursachen, bei Mechatronik den ausgefallenen Komponenten (Bild 3.3-3.1 und Bild 3.3-3.2) auf das Symptom bzw. die Folge. Dieses Vorgehen empfiehlt sich bei der computergestützten Diagnose (Bild 3.3-5)*

*Nachteile des Verfahrens sind die benötigten **Wahrscheinlichkeiten** zu den Systemkomponenten. Sie müssen **von Experten geschätzt** werden (Erfahrung!). Das erhöht die Unsicherheit. Das Netz lässt sich auch **mit Testdaten iterativ trainieren,** was jedoch zeit-und kostenaufwändig ist.*

***Petri Netz** (Lit. 3.3-9). Man spricht auch von einem Bedingungs- oder Ereignisnetz. Eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Bayes'schen Netz ist zu erkennen. Es handelt sich um eine formale Methode zur Modellierung von Systemen bzw. deren Datentransport. Dazu sind Algorithmen definiert.*

Neuronales Netz *(Lit. 3.3-10): Vorbild ist die Verknüpfung von Zellen in einem Nervensystem. Die typische Funktionsstruktur besteht aus* ***mehreren Verbingungen zum Eingang und eine zum Ausgang****. Überschreitet die Summe aller Eingangsimpulse eine Triggerschwelle sendet die Zelle (Neuron) den Ausgangsimpuls. Die Besonderheit dieses Netzes ist seine* ***Lernfähigkeit****. Das gilt gerade für komplexe Netze bzw. Systeme.* ***Voraussetzung für eine befriedigend sichere Aussage*** *ist ausreichend* ***problemspezifische Lernerfahrung****. Liegt sie nicht vor oder entspricht nicht dem Gelernten tritt 'zufälliges' Verhalten auf. Wegen dieser Problematik beschränkt sich die technische Anwendung in erster Linie auf* ***Mustererkennung****.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur 3.3

3.3-1 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 5“, Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 978-300-025780-3, 2008, Kapitel 19.2.1 und Kapitel 25.

3.3-2 W.Larl, „Vom mechanischen Gefährt zum rollenden Computer - Verkehrsunfallrekonstruktion auf der Grundlage serienmäßiger Datenaufzeichnungen in Kraftfahrzeugen“, 20.06.2007, Seite 1-8.

3.3-3 „Elektronische Komponenten in der Kfz-Unfallreparatur“, Allianz Zentrum für Technik (AZT), www.allianz-autowelt.de, 2004, Seite 1 und 2.

3.3-4 S.Liu, „Arbeiten im Forschungsschwerpunkt Modellbasierte Diagnose“, Technische Universität Karlsruhe/ Lehrstuhl für Regelungssysteme, www.eit.uni-kl.de, Stand 2010, 1 Seite.

3.3-5 F.Schwarz, „Entwicklung und Einsatz innovativer HMI-Software zur Diagnose elektronischer Steuergeräte in der Automobilindustrie“, Universität Passau, Dissertation eingereicht 30.04.2008, Seite 1-23.

3.3-6 T.Form „Vorlesungsscript Fahrzeugelektronik 2“, Technische Universität Braunschweig / Lehrstuhl für elektronische Fahrzeugsysteme, 04.06.2007, Folie 1-17.

3.3-7 „Bayes’sche Netzwerke - Einsatz zur Identifikation von Kundenwünschen“, www.mathe.tu-freiberg.de, März 2010.

3.3-8 „Bayes’sche Netze - Einführung“, user.cs.tu-berlin.de, März 2010, Seite 1-11.

3.3-9 „Petri-Netz“, de.wikipedia.org, März 2010, Seite 1-6.

3.3-10 „Neuronales Netz“, user.cs.tu-berlin.de, Februar 2010, Seite 1-3.

3.3-11 „Faseroptischer Sensor zur Erfassung der tatsächlichen Flächenpressung in Schraubenverbindungen“, www.paliwoda.ch, März 2010, Seite 1 und 2.

3.3-12 J.Deininger, „Untersuchung des Dichtverhaltens von metallischen Profildichtungen für Hochdruck-Apparate“,Dissertation 2004, Seite 56 und 62.

3.3-13 T.Degenstein, H.Winner, „Messung der Kräfte in der Reibfläche einer Scheibenbremse während des Bremsvorgangs“, Fahrzeugtechnik TU Darmstadt (FZD), Seite 1-13.

© Axel Rossmann, Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

3.3-14 „Motorsteuerung, Wartungs- und Reparaturhandbuch“, AO AVTOVAZ. 2001, www.cp-cars-und-parts-gmbh.online.de, Seite 1-220.

3.3-15 S.Barth. H.Koch, J.Peinke, J.Burgold, H.Wurmus, „Laser-Cantilever-Anemometer“.

3.3-16 „Thermische Anemometrie“, de.wikipedia.org, Stand März 2010, Seite 1-4.

3.3-17 S.Barth, „Neuartiger Mikrosensor für Strömungen“, ForWind-Zentrum für Windenergie-forschung, www.forwind.de, Stand März 2010, Seite 1und 2.

3.3-18 „Pyrometer“, de.wikipedia.org, Stand März 2010, Seite 1-4.

3.3-19 „Drehzahlmessung“, www.emt.tugraz.at/publications/diplomarbeiten, Stand März 2010, Seite 1-6

3.3-20 „Komponenten mechatronischer Systeme -Unterkapitel Sensoren“, aus Lernmodul Mechatronik des Fachgebiet Mechatronik, Technische Universität Ilmenau, http://mechatronik.tu-ilmenau.de/lernmodul-mechatronik, Stand März 2010, Seite 1-23.

3.3-21 J.Wiesenger, „Kfz-Technik-Inf Wiesinger - Die Plattform für die Kfz-Technik“, http://www.kfztech.de/kfztechnik, Stand März 2010.

3.3-22 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 2“, Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-008429-0, 2001, Kapitel 9.2.

3.3-23 „Lambdasonde“, de.wikipedia.org, März 2010, Seite 1-5.

3.3-24 „Fehlerbaumanalyse Teil 1 und Teil 2“, DIN 25424, April 1990.

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

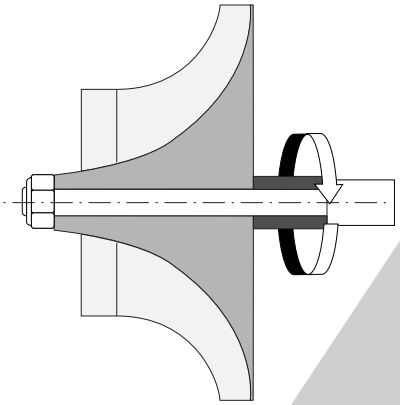
Werkstoffverhalten

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

4. Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten

4.1 Der Einsatz hochfester Werkstoffe



Höhere Belastungen sind nur mit einer besseren zerstörungsfreien Prüfung möglich!

© Axel Rossmann - Turbocensult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Tauscht man einen Werkstoff gegen einen mit höherer Festigkeit, wird dies häufig fälschlicherweise mit einem Anstieg der Sicherheit gleichgesetzt. Eher das Gegenteil dürfte der Fall sein, wenn man gleichzeitig die Festigkeit des gewöhnlich auch teureren Werkstoffs aus Materialersparnis mit einem Anstieg der Belastung nutzt (Lit.4.1-5). Das hat Probleme zur Folge:

- Kleinere **Fehlstellen** führen zu Anrissen und Risswachstum. Um diese ausreichend sicher zu finden, kann eine empfindlichere **zerstörungsfreie Prüfung** (ZfP, Bild 4.1-4 und Bild 4.3-7) notwendig werden. Das könnte eine unüberwindbare Hürde sein.
- Das Risswachstum ist schneller (Bild 4.3-3).
- Die Empfindlichkeit gegen **Oberflächenbeschädigungen** steigt.
- Rissbildende Effekte wie **Spannungsrisskorrosion** (Kapitel 5.6.3.1.1), **Wasserstoffversprödung** (Kapitel 5.7) und Lötrissigkeit (Kapitel 5.8) treten auf. Dies gilt auch, wenn die Belastung nicht erhöht wird (Bild 4.1-1).

So ist der Einsatz eines höher festen Werkstoffs, genauestens zu prüfen. Das beginnt bereits bei der **Rohteilbeschaffung**.

Ist im Falle einer Nutzung der höheren Werkstofffestigkeit im Halbzeug mit der gleichen Fehlstellengröße wie am bewährten Bauteil zu rechnen? Im Fall niedriger Belastungen handelt es sich möglicherweise noch um tolerierbare Schwachstellen, Bild 3.2.1-1. Sind diese jedoch unter der höheren Belastung wachstumsfähig, werden sie zu Fehlstellen. Sie müssen für eine ausreichende Sicherheit außerhalb der Auslegungsgrenzen liegen und sind deshalb unzulässig. Dies fordert eine **empfindlichere zerstörungsfreie Prüfung,** die gegebenenfalls erst entwickelt werden muss. Erfahrungsgemäß besteht die Wahrscheinlichkeit, dass kein für die geringe Fehlergröße seriengeeignetes, sicheres Verfahren am Markt ist. Die Realisierungschancen sind deshalb gering, der **Werkstoffwechsel** scheitert.

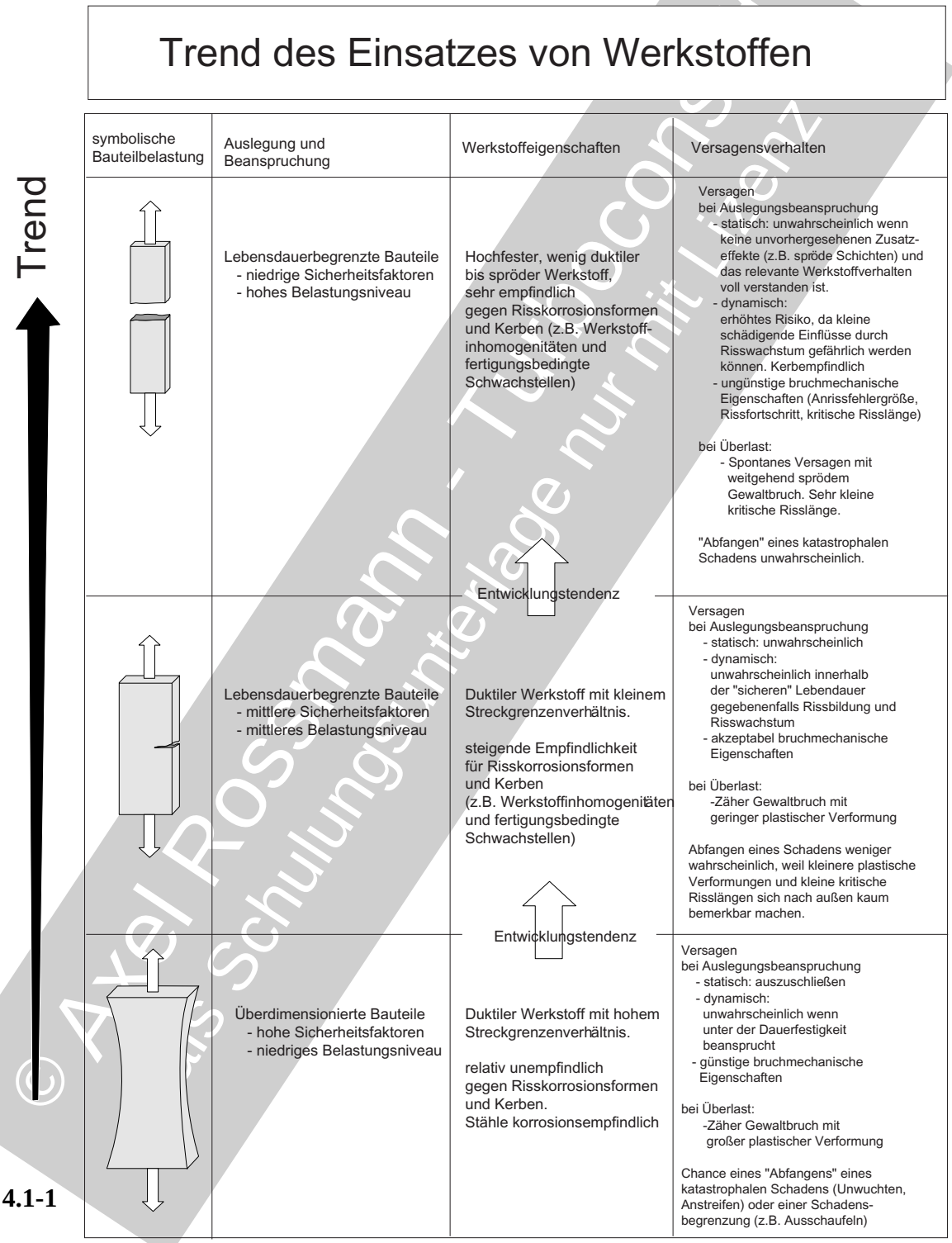


Bild 4.1-1

© Axel Rossmann - TÜV Consult
Als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 4.1-1: *Der Trend zu* ***steigenden, möglichst weit ausgelasteten Werkstofffestigkeiten unterstützt die Tendenz zu einem potenziell risikoreicheren Verhalten der Komponenten*** *(Bild 4.3-7). Dies kann nur mit erhöhtem Qualitätssicherungsaufwand, besserer analytischer Beherrschung aller relevanten Beanspruchungen,* ***Damage-Toleranz-Konzepten*** *und umfangreicher betriebsnaher Erprobung ausgeglichen werden.*

Risiken für die Bauteilsicherheit sind von drei Hauptfaktoren beeinflusst:

- Auslegung bzw. Beanspruchung
- Werkstoffeigenschaften
- Versagensverhalten

Auslegung und Beanspruchung: *Mit der Festigkeit steigen gewöhnlich die auslegungsgemäßen Betriebsspannungen. Damit erhöht sich die Rissfortschrittsgeschwindigkeit. Das Risswachstum erfolgt bereits bei kleineren Initialfehlern. Der Restbruch tritt bei kleineren kritischen Risslängen auf (Bild 4.3-3 und Bild 4.3-7). Die Folgen zeigen einige typische Beispiele:*
Kleine Werkstoffschwachstellen werden zu lebensdauerbeeinflussenden Fehlern. Anforderungen an seriengeeignete ZfP-Methoden steigen. Fertigungsprozesse müssen genauer festgeschrieben und kontrolliert werden. Beschädigungen wie Kratzer sind bei Wartungs- und Montagearbeiten noch weniger tolerierbar.
Hohe Mittelspannungen verringern die ertragbaren Spannungsausschläge und vergrößern so die Gefahr von Ermüdungsschäden.

*- **Werkstoffeigenschaften und Versagensverhalten**: Das **Streckgrenzenverhältnis** ist das Verhältnis Bruchfestigkeit zu Streckgrenze. Mit steigender Belastung kamen Werkstoffvarianten mit höherer Streckgrenze bei ähnlicher Bruchfestigkeit zum Einsatz. Das Streckgrenzenverhältnis reduzierte sich.*
*Je größer der Abstand der Streckgrenze von der Bruchfestigkeit, umso eher zeigt sich eine **plastische Verformung vor dem endgültigen Versagen (Bruch)** an. **Warnungen** wie starke Unwuchten lassen sich so sicherer rechtzeitig erkennen.*
*Verringert sich mit steigender Festigkeit die Bruchdehnung, wird der Werkstoff spröder. Dies ist bei einer Festigkeitsmaximierung zu erwarten. Kerbspannungen können dann weniger leicht ohne Schädigung durch plastisches Fließen abgebaut werden. Bei Heißteilwerkstoffen steigt mit der Warmfestigkeit die Möglichkeit hoher **Eigenspannungen.** Einem Spannungsabbau sind von einer hohen Kriechfestigkeit enge Grenzen gesetzt. Die höhere Eigenspannung wirkt als Mittelspannung und senkt die zyklische Belastbarkeit ab (Bild 5.4.3.2-4). Überlast kann bereits bei dünneren Querschnitten und niedriger **kritischer Risszähigkeit** zu **Sprödbrüchen** führen (Bild 4.3-2 und Bild 4.3-3 und Bild 5.2.1-4).*
*Mit höheren Festigkeiten nimmt gewöhnlich die Empfindlichkeit eines Werkstoffs für **Umgebungseinflüsse** zu. Es handelt sich um **rissbildende und das Risswachstum fördernde Korrosionsarten** (Bild 4.3-12, Bild 4.3-13 und Bild 5.6.3.1.1-5).*
*Geht die Anhebung der Werkstofffestigkeit und damit die Belastung mit kleineren **Korngrößen einher** (z.B. pulvermetallurgische Werkstoffe), können sich die ungünstigen bruchmechanischen Kennwerte zusätzlich risikoerhöhend auswirken. Beispielsweise kann die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ansteigen (Bild 4.1-4) und die Bruchzähigkeit abfallen. Dies führt wie eine Spannungserhöhung zu kleineren rissfortschrittsfähigen Fehlern und kleineren kritischen Rissgrößen.*
*Kleine Korngrößen können den Vorteil einer besseren **Ultraschallprüfung** haben (kleinere Störungen, „**Gras**“). Bauteile aus gleichem Werkstoff jedoch konventionell durch Gießen und Schmieden hergestellt, können größere Körner als die pulvermetallische Variante aufweisen (Bild 4.1-4). Damit wird die Ultraschallprüfbarkeit schlechter. Die Wahrscheinlichkeit größerer Fehler steigt und die mögliche **Festigkeitsausnutzung** sinkt.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Annahme, dass die Eigenschaften eines Werkstoffs im Betrieb erhalten bleiben, kann zu bösen Überraschungen führen.

Einfluss	Auswirkungen/Mechanismus	Beispiele	Literatur
Betriebs-atmosphäre: Korrosion:	- Korrosionsgrübchen, Kerbwirkung - Aufrauung, - Mechanische Eigenschaften der Reaktionsprodukte/-schichten. - Langzeit-Gefügeänderung	Schwingermüdung Strömungsstörung spröde Oberfläche, Anrissbildung Rissbildung (IK, SpRK)	Bild 5.6.1-2 Bild 5.6.1-8 Bild 5.6.1-3 Bild 5.6.1-2 Bild 5.6.1-8 Bild 5.6.1-6 Bild 5.6.3.1.2-2
Fremdmaterial/ Verunreinigungen	- Reaktionen mit dem Werkstoff Diffusion Schmelzeneinwirkung (Lötrissigkeit)	Rissbildung, Abtrag/Lebensdauer-abnahme	Bild 5.8.2-2 Bild 5.8.1-4 Bild 5.3-6 bis Bild 5.3-8 Bild 5.8.1-2 Bild 5.8.1-3
Temperatur:	- Kriechschädigung - Oxidation, - Gefügeorientierung - Bildung spröder Phasen - Alterung: Versprödung, Quellen, Festigkeitsabfall	Lebensdauer, Reparatur Floßbildung bei Ni-Guss Einkristallen Sigma-Phase Elastomerdichtungen	Bild 5.3.2-6 Bild 5.3.2-7 Bild 5.3-4 Bild 5.3-5 Bild 5.3.1-5 Bild 5.6.3.1.1-11
Mechanische elastung:	- plastisch, Eigenspannungen - Schwingermüdung ohne Makrorissbildung	Kunststoffe/ Elastomere z.B. Reifen Überschreitung der Fließgrenze, Kriechen Problem bei Wieder-verwendung	Bild 5.6.3.1.1-12 Bild 5.3.2-9 Bild 5.3.2-10
Verschleiß: Abrasiver Verschleiß	- Veränderungen der Geometrie - Maßänderungen	- Strömungsstörungen - Wirkungsgradabfall - Vibrationen - Auflage-/Positionie-rungsprobleme	Kapitel 5.9 Bild 5.1-2 Kapitel 5.5 Kapitel 5.5.1.1 Bild 5.6.1-8
Schwingverschleiß/ Reiboxidation:	- Werkstoffschädigung (Fretting) - Abrasion schützender Oxidschicht	Schwingfestigkeitsabfall - verstärkte Oxidation - verstärkte Sulfidation	Kapitel 5.9.3

Kein Anspruch auf Vollständigkeit

Bild 4.1-2

© Axel Rossmann - Turbocon
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

***Bild 4.1-2**: Obwohl es naheliegt, ist dem Konstrukteur nicht immer bewusst, dass der ausgewählte **Werkstoff sich im Betrieb ungünstig verändern** kann. Damit verliert er die für die Betriebssicherheit notwendigen, bzw. der Auslegung zu Grunde liegenden Eigenschaften. Typische Beispiele sind:*

***Betriebsatmosphäre**: Es ist zu berücksichtigen, dass sich diese verändern kann. Beispielsweise sind aggressive Verunreinigungen denkbar, die nur zeitweise auftreten und/oder sich erst über längere Zeiträume bilden. Der **Oberflächenbereich** wird auf mehrfache Weise beeinflusst. Bei **Korrosion** können **Anfressungen** in Form von **Grübchen** (Lochfraß) entstehen. Sie wirken als Kerbe und senken die Schwingfestigkeit merklich ab (Bild 5.6.1-2). Bereits eine **Aufrauung** durch **Korrosionsprodukte** kann eine Strömung, z.B. in einer **Rohrleitung** oder einer **Strömungsmaschine** unvorhergesehen beeinflussen. Das kann sich auch auf andere Komponenten auswirken. Beispielsweise indem ein verschlechterter Wirkungsgrad in einer thermischen Turbomaschine mit höheren Prozesstemperaturen kompensiert werden muss. Diese können die Kriechlebensdauer der Heißteile entscheidend verkürzen (Bild 5.3.2-4).*
*Korrodieren **Wälzlager**, z.B. im Stillstand der Maschine, ist mit einem frühzeitigen Ausfall als Folge einer **Laufbahnermüdung** (Grübchen) zu rechnen.*
*Auch die Aufnahme von Bestandteilen der Betriebsatmosphäre durch **Diffusion** kann die Oberfläche gefährlich verändern. Eine **Versprödung** begünstigt Anrisse und verringert die Schwingfestigkeit. Das gilt auch für die Veränderung der **chemischen Beständigkeit** mit verstärkter Korrosion. Verändert ein Abtrag die Geometrie und damit die Funktion des Bauteils werden z.B. aerodynamische und thermodynamische Annahmen ungültig.*

***Betriebstemperatur**: Grundsätzlich ist zunächst anzunehmen, dass sich Werkstoffe bei auslegungsrelevanten Betriebstemperaturen verändern (Bild 5.3-4).*
*Es ist nicht von vornherein von einem gleichbleibenden **Werkstoffgefüge** auszugehen. Werkstoffspezifisch können sich Gefügebestandteile auflösen, vergröbern oder entsprechend der äußeren Belastung ausrichten. Spröde und/oder niederfeste Bestandteile (Phasen) können sich ausscheiden. Damit wird die Festigkeit und das bruchmechanische Verhalten (Bild 4.3-4) beeinflusst. Auch das Korrosionsverhalten kann sich gefährlich verändern (Bild 5.6.3.1.2-2)*
*Grundsätzlich ist bei einem werkstoffspezifischen **Temperaturniveau** (Bild 5.3.2-1) mit einer **zeit-belastungsabhängigen, bleibenden Schädigung** zu rechnen (Bild 5.3.2-4 und Bild 5.3.2-6). In diesem Fall ist also die sichere Betriebszeit entsprechend zu berücksichtigen. Kommt es zum merklichen **Kriechen**, d.h. einer **zeitabhängigen plastischen Verformung** (Bild 5.3.2-3) können unterschiedliche Bauteilfunktionen betroffen sein (Bild 5.3.2-10). Das gilt besonders für Kunststoffe (Bild 5.6.3.1.1-12)*

***Betriebskräfte**: Ein oft schleichender Anstieg der einwirkenden Kräfte ist in vielen Fällen nicht auszuschließen und deshalb zu berücksichtigen. Eine solche Situation kann entstehen, wenn absinkende Wirkungsgrade (Verschleiß, Korrosion, Aufrauung) höhere Maschinenparameter wie einen Drehzahlanstieg erfordern. Eine ungünstige Veränderung der Geometrie umströmter Bauteile (z.B. Erosion, Ablagerungen - 'fouling') kann **Strömungsstörungen** auslösen, die das Bauteil selbst und/oder benachbarte Bauteile zu gefährlichen **Schwingungen anregen** (Kapitel 5.4.3).*
*Die Lebensdauer von Bauteilen (z.B. Rotoren) unter **LCF-Beanspruchung**, d.h. mit einer **zyklischen Belastung im plastischen Bereich** (Bild 5.4-1) ist entsprechend der Auslegung (akzeptable Ausfallwahrscheinlichkeit) begrenzt (Kapitel 4.5). Wenn nicht eine ausreichend emp-*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

findliche und sichere zerstörungsfreie Prüfung auf betriebsbedingte Mikrorisse möglich ist, deren geringe Größe eine Verlängerung der Laufzeit erlauben, sind die Teile in vielen Fällen nicht mehr reparierbar und zu ersetzen (Bild 4.5.2-1). Dies ist zumindest in der Logistik (Ersatzteilversorgung) einzuplanen.

***Verschleiß** kann in **abrasiver Form** als Abtrag (Kapitel 5.5) oder auch als Werkstoffschädigung (**Schwingverschleiß**, engl. Fretting, Kapitel 5.9.3, Bild 5.9.3-4) auftreten. Beeinflusst abrasiver Verschleiß die Bauteilfunktion direkt (z.B. in einer Strömung) oder indirekt als Überlastung (Schiefstellung, Wackeln/Stoßbeanspruchung, Vibrationen), ist mit katastrophalem Versagen zu rechnen. Schwingverschleiß kann werkstoffspezifisch (besonders bei Titanlegierungen) die Schwingfestigkeit so gefährlich absenken, dass auch die normalen/ auslegungskonformen Belastungen zum Versagen führen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

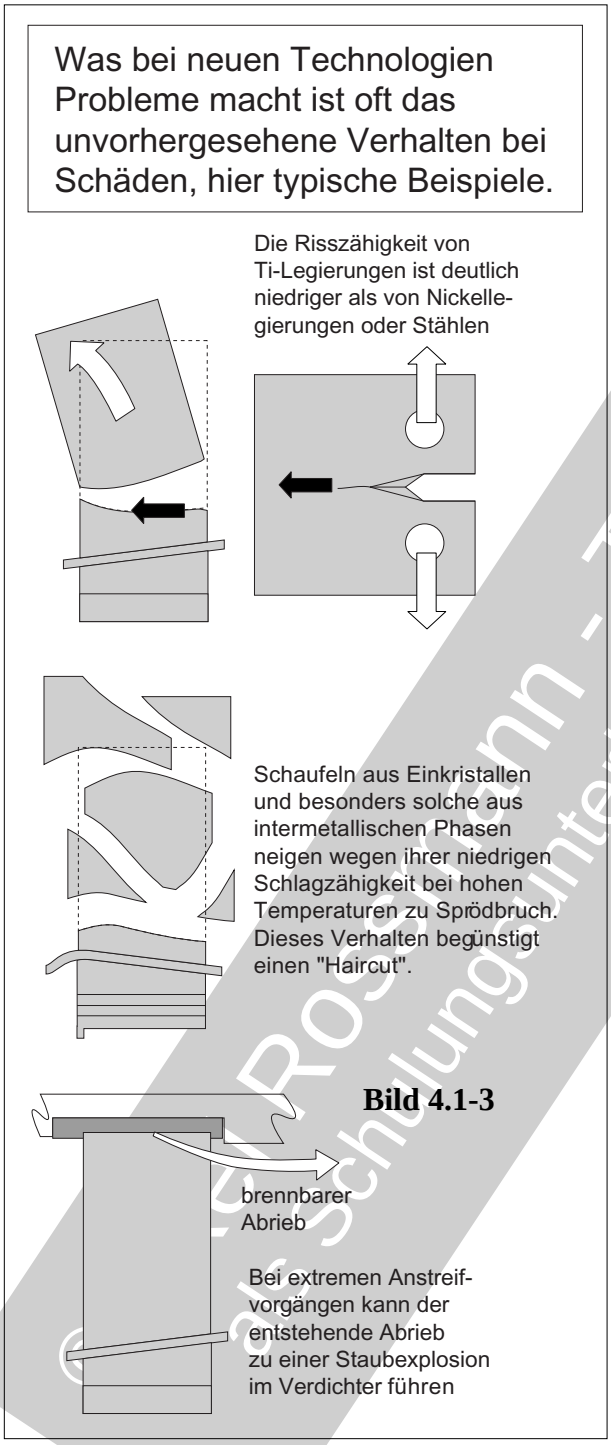


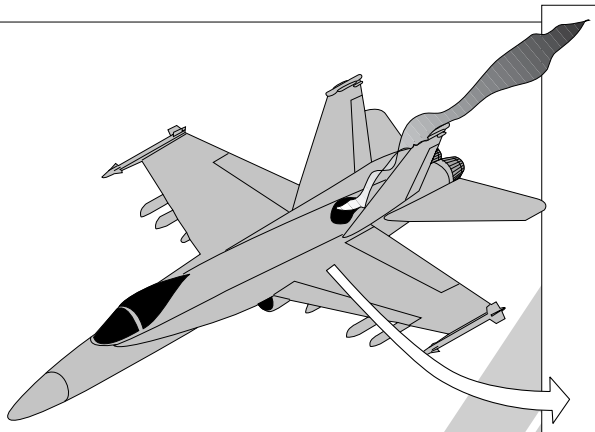
Bild 4.1-3

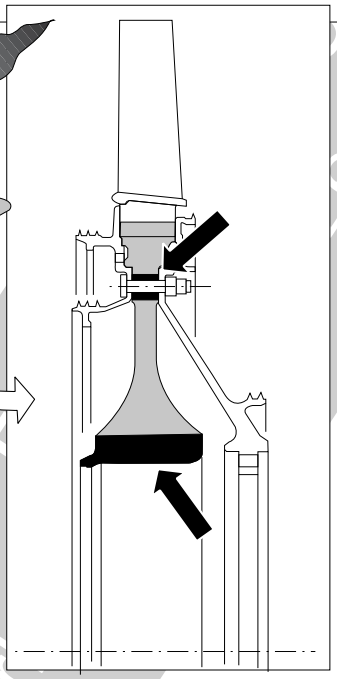
Bild 4.1-3: *Das* ***unvorhergesehene Verhalten bei ungewöhnlichen Belastungen*** *wie im Schadensfall, heftigen Anstreifvorgängen und FOD, kann die Einführung einer neuen Technologie verhindern oder einschränken. Hier einige Beispiele:*
Typische Situationen treten im Ablauf von ***Schadensfällen*** *auf.*

Hohe Verformungsgeschwindigkeiten ***wie Schlagbeanspruchung*** *führen bei metallischen Werkstoffen und Kunststoffen zu sprödem Verhalten (Kapitel 5.2.2). Das Maß der* ***Versprödung*** *ist werkstoffspezifisch. Schlagbeanspruchungen entstehen in Situationen wie Containmentfall, Vogelschlag und Einwirkung sonstiger angesaugter Fremdkörper oder durch Bruchstücke der Maschine selbst. Der Versprödungseffekt kann von der Betriebstemperatur deutlich beeinflusst werden. Wider Erwarten beobachtet man nicht nur bei sehr niedrigen Temperaturen, sondern auch bei sehr* ***hohen Temperaturen im Schadensbereich eine ausgeprägte Versprödung****. Die besondere Neigung mancher* ***Kunstharze zur Versprödung*** *bei Schlagbeanspruchung kann z.B. den vorteilhaften Einsatz in rotierenden Nasenkonen aus FVK verhindern. Bei Betriebstemperatur* ***verminderte Schlagzähigkeit von Einkristallwerkstoffen*** *in Flugtriebwerken führt zu deutlich größeren Folgeschäden als sie der unempfindlichere aber weniger warmfeste vielkristalline Werkstoff zeigt.*
Das mit dem Einsatz ***hochfester Werkstoffe*** *steigende Risiko kann nicht zuletzt mit ungünstigen* ***bruchmechanischen Kennwerten*** *in Zusammenhang stehen (Bild 5.2.1-7). Wird ein solches Verhalten nicht richtig eingeschätzt, ist die Realisierung für den Serieneinsatz gefährdet (Bild 4.1-1). Erhöhte* ***Kerbempfindlichkeit*** *kann nach Beschädigungen durch Fremdkörper oder im Ablauf eines Schadens unerwartet große Folgeschäden (z.B. Haircut der Schaufelstufe einer Turbomaschine) auslösen.*
Kerben und Risse in harten, spröden und festhaftenden Beschichtungen *wie sie durch Fremdkörper entstehen, können die Schwingfestigkeit deutlich stärker abfallen lassen als bei unbeschichtetem Material (Bild 5.4.4-1 und Bild 5.4.3.2-10).*
Extreme Anstreifvorgänge *im Schaufelspitzenbereich und in Labyrinthen lassen an Kontaktflächen sehr viel Abrieb entstehen. Kommt es zur Zündung, besteht die Gefahr einer Staubexplosion (Bild 5.11-2).*

© Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

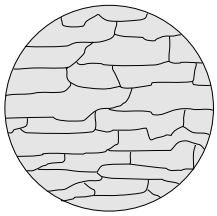
Das bruchmechanische Verhalten gewinnt an Bedeutung



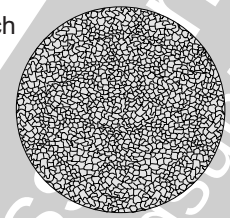


- Schwachstellen werden zu Fehlern
- Qualitätssicherung wird anspruchsvoller
- Zeit bis zum Versagen wird kürzer
- Die Empfindlichkeit für Risse steigt

Gefüge schematisch



Schmiedematerial
- gröberes Korn
- Gefügeorientierung



Pulvermetallurgischer Werkstoff (PM)
- Feinkorn,
- homogen

Anwendungsrelevante Eigenschaften

	Schmiede-material	PM
Risswachstum	+	-
Ultraschallprüfung	-	+
Festigkeit	-	+
Versagensverhalten	+	-
Empfindlichkeit	+	-

\+ günsig - ungünstig

Bild 4.1-4

***Bild 4.1-4**: Dem **Einsatz der hochfesten Variante eines Werkstoffs** können andere Eigenschaften entgegenstehen. Zwar ist von einem gleichmäßig feinkörnigen Gefüge wie in pulvermetallurgisch nach dem HIP-Verfahren hergestellten Bauteilen eine hohe, insbesondere dynamische Festigkeit zu erwarten. Auch lassen sich sehr kleine Fehlstellen durch **Ultraschallprüfung** sicher finden. Nachteilig ist jedoch, falls ein solcher Werkstoff ein ungünstigeres, bruchmechanisches Verhalten aufweist, wenn er z.B. einem **Risswachstum** vergleichsweise wenig Widerstand entgegensetzt. Das zeigt sich in einer **niedrigeren kritschen Riss-/Bruchzähigkeit** (Bild 4.3-7 und Bild 4.3-8) und/oder einer hohen **Rissfortschrittsgeschwindigkeit** (Bild 4.3-3). Die Folge ist eine schnelle Rissausbreitung. So wird die Zeit vom Anriss bis zum katastrophalen Versagen eines Bauteils durch Bruch sehr kurz. In solchen akuten Fällen ist damit eine Überwachung von Bauteilen nicht mehr möglich. Im Sicherheitsfall oder/und bei untragbaren Schadenskosten muss dann ein sofortiger Tausch aller potenziell gefährdeten Bauteile erfolgen.*
Ein Schmiedewerkstoff kann mit geeignetem Verformungsprozess eine bauteiloptimale Gefügeorientierung (Faserverlauf) erhalten. Damit werden im günstigen Fall Fehlstellen parallel zu gefährlich hohen Betriebsspann-

©Axel Rossmann - Technische Referenz

ungen ausgerichtet und so weniger wirksam. Zusätzlich setzt ein quer zum Ermüdungsriss orientiertes Gefüge diesem einen erhöhten Widerstand entgegen. Das kann ein ***Abfangen und/oder Überwachen*** *(z.B. praktisch nutzbare Inspektionsintervalle) der Rissbildung ermöglichen.*

Der dargestellte Fall kann als beispielhaft für die Risiken der Einführung neuer Technologien in hochbeanspruchten Serienkomponenten gelten. Das Militärflugzeug befand sich in der Erprobung. Es kam zum ***Bruch der ND-Turbinenscheibe*** *und nachfolgendem Absturz. Wahrscheinliche Schadensursache war ein* ***LCF-Bruch****, der von einem kritisch hoch beanspruchten Bereich ausging (Pfeile im Detail rechts). Der Triebwerkstyp war in seiner Leistung deutlich verbessert worden. Die wegen der* ***Einstufigkeit*** *hochbeanspruchte Niederdruckturbine erhielt eine Scheibe aus besonders festem („****ultra-high tensile strength****“) Material. Es handelte sich um einen pulvermetallurgischen Werkstoff in der* ***„as HIP“-Version****, d.h. nicht nachgeschmiedet. Einen solchen Werkstoff zeichnet sehr feines gleichmäßiges Korn aus (Detail unten links). Nachteile des Gefüges waren* ***Kerbempfindlichkeit, niedrige Risszähigkeit und schneller Rissfortschritt****. Die Gefahren einer derartigen Kombination von schadensbegünstigenden Effekten sollte jedem der Technologien entwickelt als wichtige Erfahrung dienen.*

Es darf vermutet werden, dass wegen der hohen Beanspruchung, eine Risswachstumsphase nur äußerst schwer beherrschbar ist. Der große Vorteil des PM-Werkstoffs war neben der hohen Festigkeit das äußerst preisgünstige ***„as HIP“-Verfahren****. Es ermöglicht eine endkonturnahe Halbzeugform. Dieser Fertigungsprozess verwendet eine hohle Blechform (Kanne) mit Metallpulver im Vakuum gefüllt und dicht verschweißt. Diese gefüllte Kapsel wird in einem Autoklav, der sog. Heißisostatpresse (engl. hot isostatic pressing = HIP) unter hohem Argondruck (>1000 bar) und hoher Temperatur zu einem dichten Werkstoff verpresst. Anschließend wird die Kapsel entfernt.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur 4.1

4.1-1 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, www.Turboconsult.de, ISBN 3-00-017733-7, 2000, Kapitel 14.2.

4.1-2 J.Föhl, „Schadensbilder bei Verschleißbeanspruchung - Verschleißschäden durch abrasive und erosive Besanspruchung in J.Grosch und Mitautoren, „Schadenskunde im Maschinenbau. Charakteristische Schadensursachen-Analyse und Aussagen von Schadensfällen“, Band 308 der Reihe ‘Kontakt & Studium Maschinenbau’, ISBN 3-8169-1202-8, Expert Verlag Seite 314-345.

4.1-3 M.Pohl „Werkstoffschäden durch Verschleiß“ in G..Lange, „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, 5. Edition, April 2001, ISBN 3-527-30417-7, Verlag Wiley-VCH, Weinheim.

4.1-4 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden“, 2. Auflage ISBN 3-446-13416-6. 1982, Carl Hanser Verlag München Wien.

4.1-5 L.Kopp, H.W.Lenz, M.Schwarz,, „Bersten eines Hochdruckbehälters während einer Wasserdruckprobe. Gedanken zur Auslegung von Hochdruckapparaten insbesondere hinsichtlich der Sprödbruchsicherheit“, Zeitschrift „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik“, Volume 17, Issue 4, (www3.interscience.wiley.com) Seiten 126-134.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage zur mit Lizenz

4.2 Der Einfluss von Beschichtungen

© Axel Rossmann Consult
Lizenz
als Schulungsunterlage

Gerade die Forderungen an Leichtbaukonstruktionen nach integralen Bauteilen die **mehrere Funktionen vereinen**, die vorher nur von Einzelkomponenten übernommen werden konnten, sind oft nur mit Schichten realisierbar. Typische Baispiele sind

- Erosionsfestigkeit,
- Tribologische Eigenschaften,
- Korrosions- und Oxidationsbeständigkeit,
- Verhalten gegenüber Strahlung (Wärmedämmung, Reflexion, Absorption),
- Steigerung der Schwingfestigkeit und Entschärfung von Beschädigungen.

Dies erfordert auf die Bauteilfunktion und den Grundwerkstoff abgestimmte **Schichteigenschaften** wie Härte, Dicke, Sprödigkeit bzw. Zähigkeit und natürlich die Machbarkeit. Das setzt eine geeignete Fertigung und Qualitätssicherung voraus.

Schichten haben in den meisten Fällen einen entscheidenden Einfluss auf das Betriebsverhalten eines Bauteils. Dafür sind eine Vielzahl schichtspezifischer Effekte verantwortlich (Bild 4.2-1). Gerade hochbeanspruchte Bauteile des modernen Leichtbaus sind oft nur durch die Anwendung von Schichten realisierbar. Es ist also unabdingbar, dass sich der Konstrukteur mit dieser Problematik intensiv auseinandersetzt, um alle relevanten Effekte in Gestaltung und Auslegung zu berücksichtigen.

Schichten beeinflussen auf vielfältige Weise das Bauteilverhalten.

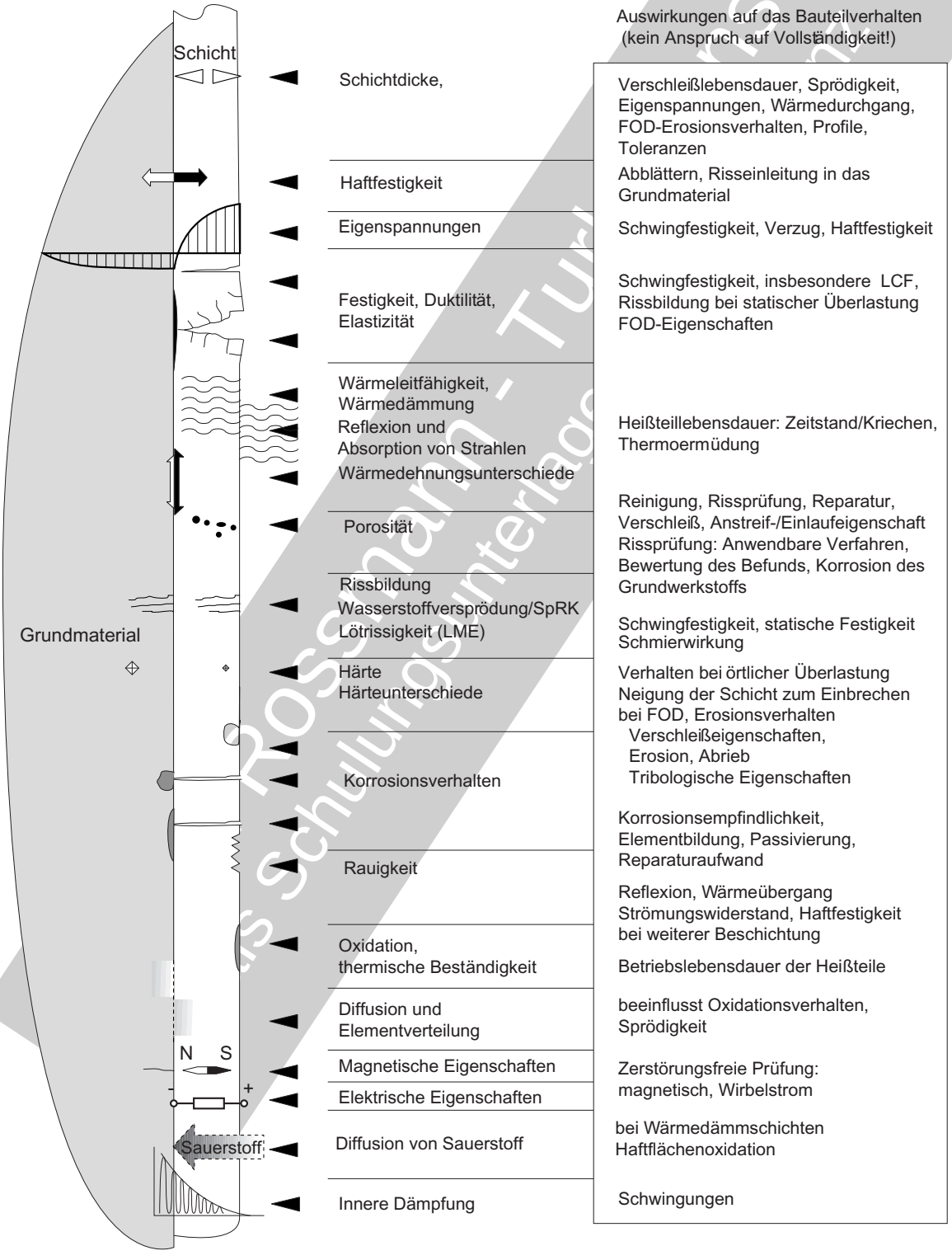


Bild 4.2-1

Bild 4.2-1: *Schichten beeinflussen das* ***Betriebsverhalten*** *und damit die Sicherheit eines Bauteils auf vielfältige Weise. Hierzu gehören:*

- *Tribologie (Kapitel 5.9)*
  - *Reibung*
  - *Gleitverschleiß/Schwingverschleiß*
  - *Notlaufeigenschaften*
- *Schwingungen (Kapitel 5.4)*
  - *Dynamische Festigkeit*
  - *Verhalten*
  - *Dämpfung (Kapitel 5.4.3.3)*
- *Erosion (Kapitel 5.5)*
- *Oxidation*
- *Korrosion (Kapitel 5.6)*
- *Wärmefluss*
- *Strahlung*
  - *Reflexion*
  - *Absorption*
- *Eigenspannungen*
- *zerstörungsfreie Prüfbarkeit (Bild 4.2-3)*

Vom Fertigungsprozess herrührende Abweichungen und Fehlstellen sind deshalb von großer Bedeutung. Im Bild sind Eigenschaften (Lit. 4.2-2), Probleme und Fehler, die das Betriebsverhalten von Schichten bestimmen, zusammengestellt. Jeder Schichttyp hat auch ***spezifische Probleme****,* ***bedenkliche Einflüsse*** *und* ***Fehler*** *die zusammenwirken und die Schichteigenschaften im Betrieb bestimmen.*

Schwingfestigkeit: *Zum einen geht es um die Schwingfestigkeit der* ***Schicht*** *selbst, und zum anderen um deren Einfluss auf die Schwingfestigkeit des* ***Grundwerkstoffs*** *(Bild 4.2-4). Beschränkt sich die Betrachtung auf die Schwingfestigkeit der Schicht, handelt es sich bei* ***Ablösungen*** *in vielen Fällen um eine* ***LCF-Beanspruchung****. Diese kann in Form* ***zyklischer Fliehkräfte*** *auftreten. An Heißteilen überwiegt häufig die* ***Thermoermüdung*** *(Lit. 5.4.2). Bei Wärmedämmschichten kommt als ein besonderer Einfluss die* ***Oxidbildung zwischen Schicht und Grundwerkstoff*** *hinzu (Bild 5.6.1.4.2-5).*

Beispiele für LCF-beanspruchte Schichten sind Anstreifschichten auf ***Rotoren****, keramische* ***Panzerungen*** *auf* ***Labyrinth- und Schaufelspitzen*** *sowie* ***Wärmedämmschichten*** *auf Heißteilen. Diese Ablösung unter zyklischer Beanspruchung ist in hohem Maß von den im Beschichtungsprozess induzierten* ***Eigenspannungen der Schicht*** *abhängig. Kleine Abweichungen von optimierten und erprobten Prozessparametern, insbesondere der Temperaturführung, können die mit einer* ***Ablösung definierte Lebensdauer*** *entscheidend verkürzen. Eigenspannungen sind auch von der Schichtstruktur, z.B. der Porosität oder erwünschten Rissen abhängig. Bei Wärmedämmschichten handelt es sich um sog.* ***Segmentierungsrisse*** *(Bild 4.2-3 und Bild 5.6.1.4.2-5) oder in galvanisch abgeschiedenen Cr-Schichten um ein typisches* ***Rissnetzwerk****. Diese Merkmale werden von den Prozessparametern bestimmt. Auch die Schichtdicke wirkt sich auf das Eigenspannungsniveau aus (Bild 4.2-4). Ungleichmäßige Schichtdicken können örtlich zu hohen Eigenspannungen mit Abplatzungen führen. Ein weiterer wichtiger Einfluss ist die Haftfestigkeit (Bild 4.2-3), die wiederum mit der Haftflächenvorbereitung, z.B. der Rauigkeit und Reaktivität eng zusammenhängt.*

Ist die ***Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs*** *betroffen, können Schichten sehr unterschiedlich wirken.*

Bei ***LCF-Beanspruchung****, d.h. definitionsgemäß merklicher plastischer Verformung, ist in spröden Schichten mit Rissbildung zu rechnen. Ein Risswachstum von diesen Anrissen in den* ***Grundwerkstoff*** *lässt mit einem deutlichen Abfall der LCF-Festigkeit rechnen. Dieser Effekt wird mit der* ***Schichthärte*** *und der* ***Haftung*** *zum Grundwerkstoff ausgeprägter (Bild 4.2-3).*

Bei ***HCF-Beanspruchung*** *(Bild 4.2-4), d.h. nur wenig oberhalb der Dauerfestigkeit, können Schichten mit hohen* ***Druckeigenspannungen*** *und hoher Festigkeit (Härte) wie Einsatz- und Nitrierschichten die Schwingfestigkeit des Bauteils deutlich steigern (Bild 4.3-18). Schichten mit hohen* ***Zugeigenspannungen****, wie galvanische Cr-Schichten (Bild 4.2-5) und Ni-Schichten (Bild 4.2-4) können dage-*

© Axel Rossmann - Turbocon-Sulz
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

gen die HCF-Festigkeit entscheidend absenken (Bild 4.2-5).
Indirekt wird die Schwingfestigkeit von der ***FOD-Resistenz einer Schicht*** *beeinflusst. So kommt es auf Grund von Fertigungsabweichungen leichter zu Schichtrissen oder Abplatzern als Starter der Risse in das Grundmaterial.*

Verschleiß, tribologisches Verhalten: *Die Verschleißeigenschaften (Kapitel 5.9.3) sind für Gleitflächen wie Anstreif- und Einlaufbeläge, Frettingschutz und Panzerungen von entscheidender Bedeutung. Sie stehen mit fertigungsbedingten Schichteigenschaften wie* ***Rauigkeit****,* ***„Reservoirwirkung“*** *(z.B. Risse in Cr-Schichten),* ***Schichtdicke*** *und* ***Porosität*** *(Größe, offen, geschlossen),* ***Zusammensetzung*** *(z.B. Ni/Grafit Einlaufschichten) in engem Zusammenhang. Abweichungen dieser Eigenschaften von den Spezifikationsforderungen können sich im Betrieb unzulässig verändern.*

Oxidation *an Heißteilen lässt sich mit* ***Diffusions- oder Auflageschichten*** *beherrschen. Die* ***Konzentration*** *und* ***Verteilung*** *der für die Schutzwirkung einer Diffusionsschicht wichtigen Elemente (meist Aluminium) spielen neben der* ***Schichtdicke*** *eine entscheidende Rolle.*
Auch die Eigenschaften thermischer Spritzschichten vom Typ MCrAlY sind entscheidend von den Prozessparametern abhängig. Handelt es sich um eine ***Haftschicht*** *(Zwischenschicht) richtet sich das Interesse auch auf eine geeignet hohe Rauigkeit.*
Bildet eine Schicht dagegen die Oberfläche eines umströmten Bauteils, ist eine möglichst niedrige Rauigkeit anzustreben.

Korrosion: *Prozessbedingte Schichtbesonderheiten wie Porosität und Rissbildung spielen für das Korrosionsverhalten, besonders im Zusammenwirken mit dem Grundmaterial, eine wichtige Rolle (Bild 5.6.3,1.2-3).*

Wärmefluss: *Thermobarrieren (Wärmedämmschichten) ermöglichen mit ihrer Isolationswirkung ausreichende Heißteillebensdauern bei minimalem Kühllufteinsatz. Fertigungsbedingte Schichtfehler und Eigenschaftsabweichungen wie unerwünschte Porosität, Abplatzungen wegen fehlender Segmentierungsrisse (Bild 5.6.1.4.2-5) und Eigenspannungen sowie Abweichungen in der Struktur können mit einer verschlechterten Isolierwirkung die Bauteilsicherheit entscheidend beeinträchtigen.*
In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass auch die Resistenz keramischer Beschichtungen gegen ***Titanfeuer eine optimale Porosität*** *erfordert.*
Reflexion und Absorption von Strahlung lassen sich ebenfalls nutzen. In Extremfällen wird eine Aufheizung (z.B. von Ölleitungen) mit einer reflektierenden Gold- oder Silberschicht verhindert.

Zerstörungsfreie Prüfbarkeit: *Die Prüfbarkeit einer Schicht und des darunter liegenden Grundmaterials ist in hohem Maß von Schichteigenschaften abhängig. Der Einsatz magnetischer Rissprüfung hängt anscheinend trivial von den magnetischen Eigenschaften der Beschichtung ab. Die* ***unmagnetischen Cr-Schichten*** *erfordern z.B. eine* ***Eindringprüfung****. Ausreichend dünne Cr-Schichten ermöglichen es, dass Risse in einem darunter liegenden magnetischen Stahl, von einer magnetischen Prüfung angezeigt werden, was Fehlinterpretationen begünstigt.*
Viele Schichten sind sehr begrenzt zur Absicherung ausreichender Betriebseigenschaften zerstörungsfrei prüfbar. Hier bleibt nur die ***Qualitätssicherung über eine geeignete und ausreichend dokumentierte Prozesskontrolle in Kombination mit Betriebserfahrung****.*
Poröse Schichten *wie Einlaufschichten lassen eine Prüfung mit Ultraschall nicht zu. In wenigen Fällen ist* ***Eindringprüfung*** *sinnvoll. Speziell zum Auffinden von Schichtablösungen kommt die* ***Thermografie*** *zum Einsatz.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Nachbehandlung einer Schicht kann sich positiv auswirken aber auch problematisch sein.

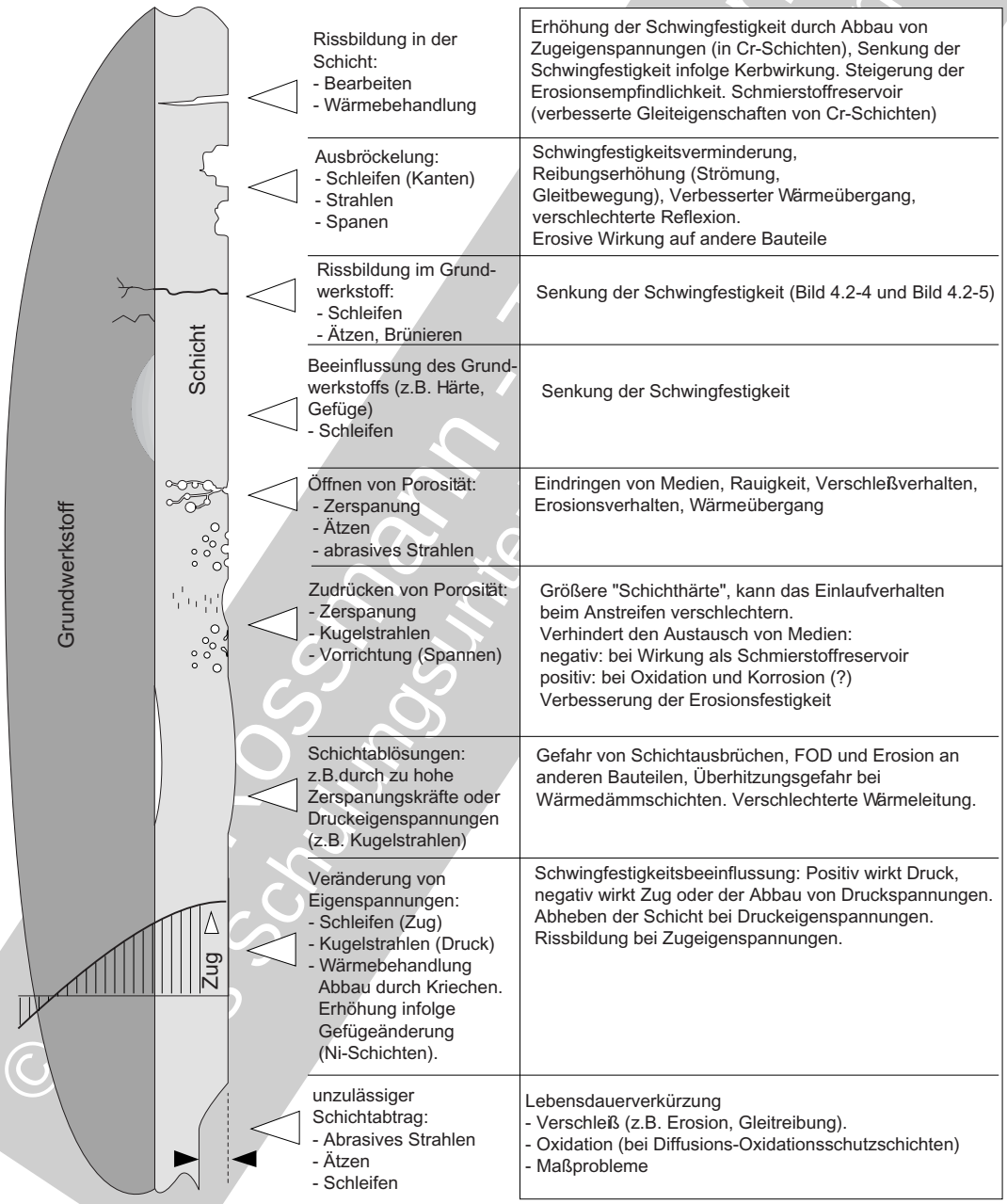


Bild 4.2-2

Bild 4.2-2. *(siehe auch Bild 4.2-1): In vielen Fällen ist die* ***Nachbehandlung einer Schicht*** *erforderlich, um gewünschte Eigenschaften zu erhalten. Solche Nachbehandlungen sind schichtspezifischer Bestandteil spezifizierter Zeichnungsangaben. Diese werden von* ***optimierten, nachgewiesenen bzw. erprobten Prozessparametern*** *gewährleistet. Man ver-*

lässt sich auf die Einhaltung dieser Vorgaben im Beschichtungsprozess.

Glätten von Schichten: *Um minimale Rauigkeiten (z.B. an aerodynamisch wirksamen Flächen) oder bestimmte Oberflächenstrukturen zu erhalten (z.B. Ölfilmbildung an Gleitflächen), kann eine* ***Nacharbeit*** *notwendig werden. Sie darf keine erwünschten Eigenschaften der Beschichtung beeinträchtigen. Ist z.B. eine ausreichende Rauigkeit der Panzerung einer Labyrinthspitze für einen Anstreifvorgang erforderlich, um einen guten Zerspanungseffekt zu erreichen (wenig Reibungswärme), darf die Schicht nicht mit einer Diamantfeile nachgearbeitet werden. Die Glättung einer weichen porösen Einlaufschicht (z.B. Metallfilz) in einem Gehäuse durch Verfestigung (z.B. Walzen) kann den Anstreifpartner gefährlich überlasten (Überhitzung, Biegung, Schwingungen). Deshalb dürfen* ***Schichten geringer Festigkeit nur mit ausdrücklicher Genehmigung spanend (nach-) bearbeitet*** *werden. Zusätzlich besteht die Gefahr einer Überlastung mit* ***Rissbildung*** *(bei spröden Schichten) und/oder örtlicher* ***Ablösung****.*
Überschleifen von galvanischen Cr-Schichten *kann erfahrungsgemäß zur Rissbildung unter der Schicht im Grundmaterial führen (Bild 4.2-3).*
Als Nacharbeit bei spezifizierten Abweichungen wie anhaftenden Pulverpartikeln an diffusionsbeschichteten Bauteilen kann eine Glättung erfolgen. Insbesondere bei spröden Schichten ist darauf zu achten, dass ***kein Ausbrechen der Oberfläche und/oder eine Mikrorissbildung*** *entsteht. Solche Kerben können die Schwingfestigkeit unzulässig absenken oder die Schichtfunktion beeinträchtigen. Ein Beispiel ist die örtliche Schädigung einer Oxidationsschutzschicht. Im Betrieb kommt es hier zu einem frühzeitigen Angriff des Grundwerkstoffs mit Unterwanderung der umliegenden gesunden Beschichtung.*

Verfestigen von Beschichtungen: Kugelstrahlen der Schicht hebt erstaunlicherweise die Schwingfestigkeit in einigen Fällen deutlicher an als eine Strahlbehandlung des Grundwerkstoffs vor der Beschichtung *(Bild 4.2-4). Wider Erwarten zeigen relativ spröde galvanische Cr-Schichten ein solches Verhalten. Der Effekt beruht in erster Linie auf dem Abbau hoher Zugeigenspannungen in der Schicht, und einem Aufbau von Druckeigenspannungen.*
In duktile (plastisch verformbare) Schichten (z.B. Silberschicht) lassen sich mit Kugelstrahlen (Glasperlen) ohne Schädigung ausreichend hohe Druckspannungen einbringen, die in Zonen geringer Haftfestigkeit zum Abheben mit Blasenbildung führen (Bild 4.2-3). Damit ist wenigstens in manchen Fällen eine zerstörungsfreie Haftfestigkeitsprüfung möglich.

Beeinflussung einer schichttypischen Porosität: *Spanende Bearbeitung (Drehen, Schleifen), Verfestigung (z.B. Strahlen) oder abrasive Behandlung können die Porosität in einer Schicht und so ihre Eigenschaften verändern. Wird offene Porosität verschmiert bzw. zugedrückt, wirkt sich dies bei verschlechterter Aufnahme von Schmiermittel auf das Gleitverhalten aus.* ***Bearbeitungsstaub*** *der in den Poren hängen bleibt, kann sich später im Betrieb lösen und durchströmte Systeme verunreinigen und schädigen (Verschleiß im Ölsystem).*
Wird geschlossene Porosität zur Oberfläche mit einem Abtrag geöffnet, können sich eindringende Umgebungsmedien auf das Oxidations- oder Korrosionsverhalten auswirken.
Porosität im Inneren der Schicht, die mit plastischer Verformung (Spanen, Strahlen) ganz oder teilweise ***zugedrückt*** *wurde, kann Eigenschaften wie* ***Elastizität, Einlaufverhalten oder Wärmedurchgang*** *unerwünscht verändern.*

Eine ***Wärmebehandlung*** *ist in der Lage die Eigenschaften* ***einer Schicht*** *entscheidend zu verändern. So lässt sich die* ***Härte bestimmter***

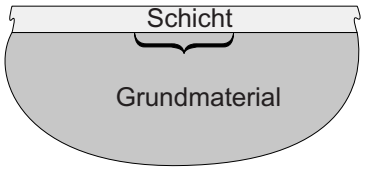
© Axel Rossmann - Turbocon Sult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Ni-Schichten deutlich steigern. *Al-Diffusionsschichten erhalten erst mit einer Glühung die optimale Elementverteilung, die das erwünschte Betriebsverhalten (Oxidationsbeständigkeit bei ausreichender Zähigkeit) ermöglicht.*

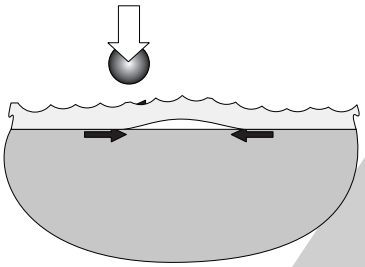
Die Erhitzung einer Schicht kann sich natürlich auch negativ auswirken. Schleifen von Cr-Schichten ist erfahrungsgemäß sogar in der Lage, Risse im darunterliegenden Grundwerkstoff auszulösen. Organische Beschichtungen wie ***Elastomere und Kunstharze*** *verlieren bereits bei scheinbar harmlos erhöhten Temperaturen ihre gewünschten Eigenschaften. Das zeigt sich in Versprödung, Festigkeitsverlust und Schrumpfung, gegebenenfalls mit Rissbildung.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

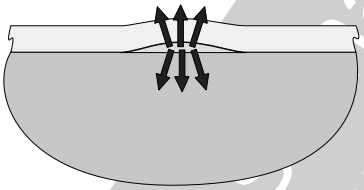
Die zerstörungsfreie Prüfung der Haftfestigkeit einer Schicht ist auf einem Bauteil in bestimmten Fällen qualitativ möglich.



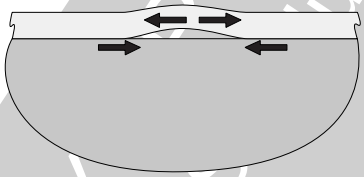
Schicht mit örtlich verminderter Haftfestigkeit bzw. Bindefehler, jedoch mit einer Restbindung, keinem Abheben.



Kugelstrahlen einer duktilen Schicht (z.B. Silber) erzeugt Druckeigenspannungen in der Schicht und führt zum Abheben, erkennbar durch Blasenbildung.

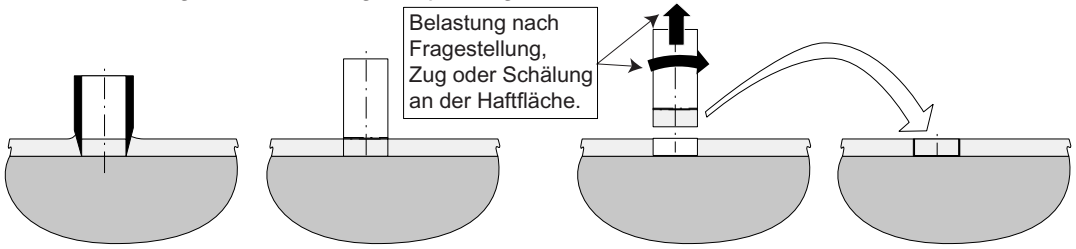


Sind Gas oder flüchtige Stoffe in Schicht oder Grundmaterial gelöst, kann eine **Erwärmung** zum Druckaufbau an der Haftfläche und damit zu erkennbarer Blasenbildung (Beizblasen) führen.



Mit einer geeigneten **Erwärmung** kann sich durch den Aufbau von Druck-Wärmespannungen die Schicht im Bereich geringer Haftfestigkeit erkennbar abheben. Nachweis mit **Thermografie.**

Quasi zerstörungsfreie Haftfestigkeitsprüfung von Elastomerschichten auf Bauteilen.



Stanzen der Schicht | Aufkleben eines Zugankers | Abreißen der ausgestanzten Schicht | Wiedereinkleben der ausgestanzten Schicht

Kriterium ist der Bruchverlauf in der Schicht oder entlang der Haftfläche.

Bild 4.2-3

Bild 4.2-3: *Die seriengeeignete zerstörungsfreie* ***Prüfung der Haftfestigkeit einer Beschichtung ist äußerst problematisch****. Proben thermisch gespritzter Schichten, die an einer geeigneten Position zum Bauteil angebracht sind, lassen sich mitspritzen und können anschließend in einem Belastungsversuch geprüft werden. So lässt sich die* ***Haftfestigkeit an der Probe*** *quantifizieren. Zusätzlich ist der* ***Bruchverlauf*** *durch die Schicht und/oder entlang der Haftfläche ein qualitatives Kriterium. Verständlicherweise ist die Aussagekraft dieser Proben für die* ***Haftfestigkeit an der beschichteten Bauteiloberfläche*** *zumindest eingeschränkt. Deshalb dienen solche Prüfungen eher zur Bestätigung der Prozesssicherheit.*

In einigen Fällen ist eine ***qualitative Haftfestigkeitsprüfung*** *möglich. An zähen metallischen Schichten wie Silber lässt sich ein abgestimmtes Strahlen mit Glasperlen anwenden. Natürlich ist darauf zu achten, dass kein unzulässig großer Abtrag auftritt. Der Strahlprozess erzeugt in der Schicht Druckspannungen, die an Orten mit niedriger Haftfestigkeit zur Ablösung und Blasenbildung der Schicht führen (zweite Skizze von oben). Nur Schwachstellen werden angezeigt, die, abhängig von der Strahlintensität und den Schichteigenschaften, eine ausreichend niedrige Haftfestigkeit aufweisen.*

Hat der Grundwerkstoff beim Beschichten ***Wasserstoff aufgenommen****, lässt sich mit einer anschließenden* ***Wärmebehandlung****, als Entsprödung meist vorgeschrieben, eine gefährliche Versprödung vermeiden. Weist die Schicht geeignete Eigenschaften wie ausreichende Gasdichtigkeit auf, kommt es in Zonen geringer Haftfestigkeit bei austretendem Wasserstoff zur* ***Blasenbildung*** *(„****Beizblasen****“, dritte Skizze von oben). Abzuschätzen ist, ob die Blasenbildung Ursache einer ungewöhnlich starken Gasaufnahme oder einer zu niedrigen Haftfestigkeit der Beschichtung ist.*

Ist die ***Wärmedehnung*** *einer Schicht deutlich größer als die des Grundmaterials, entstehen beim Aufheizen in der Schicht Druckspannungen. Spröde Schichten wie keramische* ***Wärmedämmschichten*** *oder anorganische Anstreif- und Einlaufschichten neigen bei niedriger Haftfestigkeit zum* ***Abheben*** *(vierte Skizze von oben). In diesen Fällen ist die Spaltbildung zwischen Schicht und Grundwerkstoff jedoch minimal. Mit Augenschein, wie bei den vorher beschriebenen Verfahren, ist sie als Blase nicht erkennbar. Deshalb ist ein geeignetes zerstörungsfreies Prüfverfahren erforderlich. Die* ***Thermografie*** *hat sich in vergleichbaren Aufgaben bewährt (Lit. 4.2-2). Sie beruht auf der schlechteren Wärmeleitung im Spaltbereich der sich bei äußerer Wärmeeinbringung (Wärmeimpuls) mit einem Temperatursprung deutlich bemerkbar macht.*

Die Haftfestigkeit bzw. das Haftverhalten ausreichend elastischer ***Elastomerschichten*** *wie* ***Einlaufbeläge aus gefülltem Silikongummi****, lässt sich mit Hilfe einer als zerstörungsfrei zu bezeichnenden technologischen Prüfung abschätzen (Rahmen unten). Zuerst wird mit einem Locheisen ein Ringspalt bis zum Grundmaterial in die Schicht eingebracht. Dann wird ein passender Belastungskopf aufgeklebt. Dieser kann mit einer Zug- oder einer Biegebeanspruchung so weit belastet werden, bis die ausgestanzte Schicht ausbricht. Im Falle der Biegung wird der zugseitige Schichtrand auf* ***Schälung*** *beansprucht, auf die eventuelle Haftfestigkeitsmängel besonders sensibel reagieren (Bild 3-13).* ***Hauptbeurteilungkriterium ist der Bruchverlauf innerhalb der Schicht, oder die Ablösung an der Haftfläche****. Nach der Prüfung kann die ausgestochene Schicht wieder von der Probe gelöst und auf das Bauteil geklebt werden.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

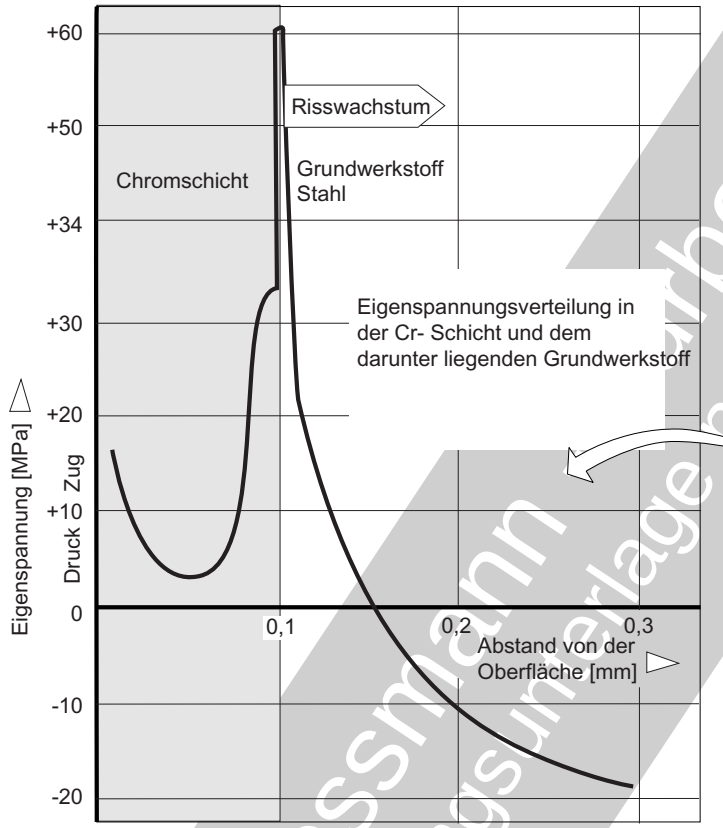
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

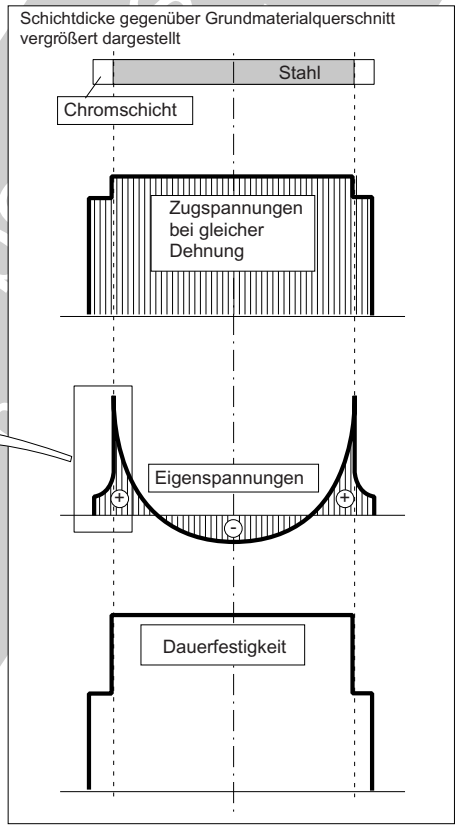
Bild 4.2-4 *(Lit. 4.2-2): Bei einer* ***Hartverchromung*** *muss mit einer* ***Absenkung der Schwingfestigkeit*** *des Bauteils gerechnet werden. Das Diagramm oben links zeigt beispielhaft den Eigenspannungsverlauf im Oberflächenbereich einer hartverchromten Stahlprobe. Die erstaunlich niedrigen Eigenspannungen werden auf eine Entspannung der Cr-Schicht als Folge der typischen Rissbildung zurückgeführt.* ***Wichtig für die Dauerfestigkeit ist die Spannungsspitze an der Haftfläche*** *Schicht/Grundwerkstoff. Hier ist gegebenenfalls mit einem Schwinganriss zu rechnen. Den Einfluss auf die Dauerfestigkeit zeigt das untere Diagramm im Rahmen oben rechts. Sie liegt für die Cr-Schicht deutlich unter der des Grundwerkstoffs.*

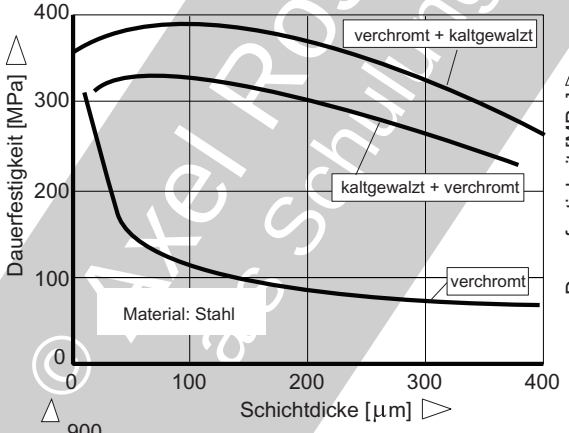
Mit einer Verfestigung durch plastische Verformung lässt sich die Dauerfestigkeit wieder anheben. Dazu dienen ***Kugelstrahlen*** *oder* ***Rollen****. Erstaunlich ist, dass sowohl bei Ni- als auch bei Cr-Schichten die* ***Behandlung der Schicht günstiger ist, als eine Verfestigung des Grundwerkstoffs vor der Beschichtung*** *(mittlere Diagramme). Dieser Effekt ist auch bei dicken Schichten wirksam. Die Wirkung ist dann gegenüber dünnen Schichten leicht abgeschwächt (Diagramm Mitte links).*

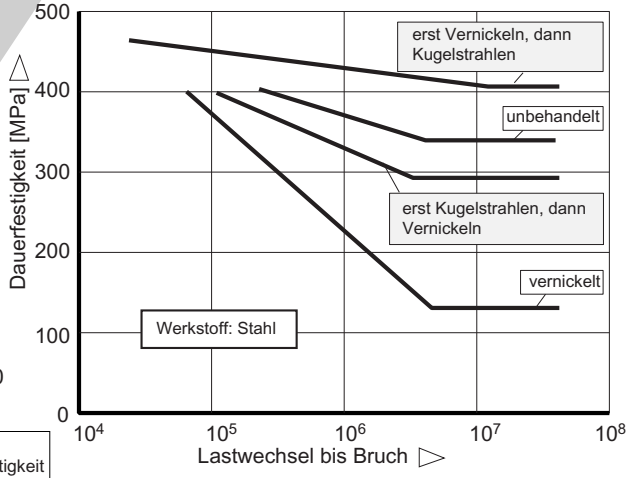
Interessant ist, dass verfestigte Zustände ein Maximum der Dauerfestigkeit bei Schichtdicken zwischen 100 µm und 200 µm zeigen. Ein linearer Dauerfestigkeitsabfall mit der Schichtdicke liegt also nicht vor. Die ***Zugeigenspannungen*** *in der Cr-Schicht überlagern sich erwartungsgemäß mit den Betriebsspannungen (Diagramm oben rechts). Damit wirkt der Mittelspannungseinfluss auf die Dauerfestigkeit verchromter Teile offenbar deutlich stärker als auf unverchromte (Diagramm unten). Bei einer Beschichtung hochbelasteter Bauteile wie Federn und Schrauben ist dieser Effekt zu berücksichtigen.*

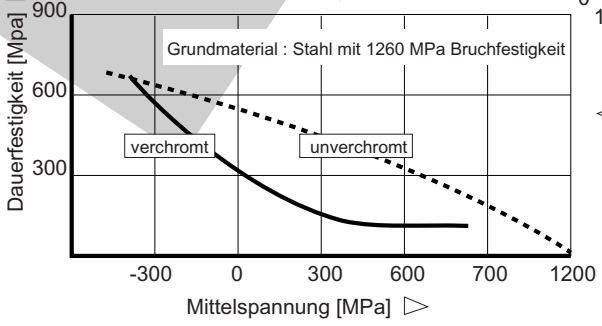
Einflüsse galvanischer Cr- und Ni-Schichten auf die Schwingfestigkeit.











Einfluss der Mittelspannung auf die Dauerfestigkeit verchromter Stahlproben

Bild 4.2-4

© Axel Rossmann
Alle Schulungsunterlagen urheberrechtlich geschützt

Bild 4.2-5 *(Lit.14.2-2): Die Dicke* ***galvanischer Cr- und Ni-Schichten*** *hat einen deutlichen Einfluss auf die* ***Schwingfestigkeit****. Dickere Schichten wirken sich jedoch nicht generell ungünstiger aus. Im Diagramm oben links ist zu erkennen, dass an glatten Proben, abhängig von den Beschichtungsparametern, Schichtdicken von 50 µm die Dauerfestigkeit weniger absenken als solche von 25 µm. Der* ***Dauerfestigkeitsabfall*** *mit einer Cr- oder Ni-Beschichtung* ***vergrößert sich mit Härte****,* ***Zugfestigkeit und Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs****. Dieser Effekt scheint für* ***Ni-Schichten wegen des höheren E-Moduls ausgeprägter als für Cr-Schichten*** *zu sein. Er führt bei gleichen Dehnungen zu deutlich höheren Spannungen. Der Festigkeitseinfluss des Grundwerkstoffs wird auf den wachsenden Unterschied zur Schichtfestigkeit zurückgeführt. Damit entstehen in der Schicht Risse, deutlich bevor der Grundwerkstoff überlastet ist. So kann die Schicht keine Kräfte mehr übernehmen und der Grundwerkstoff wird von der Schicht nicht entlastet. Ein weiterer Einfluss dürfte eine erhöhte Kerbempfindlichkeit von Werkstoffen hoher Festigkeit sein. Die Schwingfestigkeit niedrigfester Werkstoffe reagiert deutlich weniger auf eine Beschichtung: Werden* ***hochfeste und damit gewöhnlich auch hochbeanspruchte Werkstoffe beschichtet, ist besondere Vorsicht geboten****.*

Dichte Rissbildung in der Schicht senkt die Zugeigenspannungen. Somit fällt die Schwingfestigkeit weniger ab. Die ***Dauerfestigkeit steigt deshalb mit der Rissdichte*** *(Diagramm oben rechts).*

Werden Kerben beschichtet (Diagramme unten) ist bei dünnen Schichten der Schwingfestigkeitsabfall sogar geringer als bei glatten Proben (mit Pfeil gekennzeichnete Bereiche). ***Dicke Schichten*** *schädigen dagegen gekerbte Proben mehr. Ein weicher/zäher Werkstoff kann im Kerbgrund durch plastische Verformung einen* ***Stützeffekt*** *hervorrufen. Dieser beruht auf Druckspannungen nach der Entlastung und einer Verfestigung. Das dürfte den Rissfortschritt aus spröden Schichten behindern.*

© Axel Rossmann - TU Dortmund
als Schulungsunterlage nutzbar

Bauteilverhalten Beschichtungseinfluss

Insbesondere galvanisch abgeschiedene Beschichtungen beeinflussen die Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffs nicht selten auf unerwartete Weise. Schichtdicke und Rissbildung in der Schicht sind wichtige Einflussfaktoren.

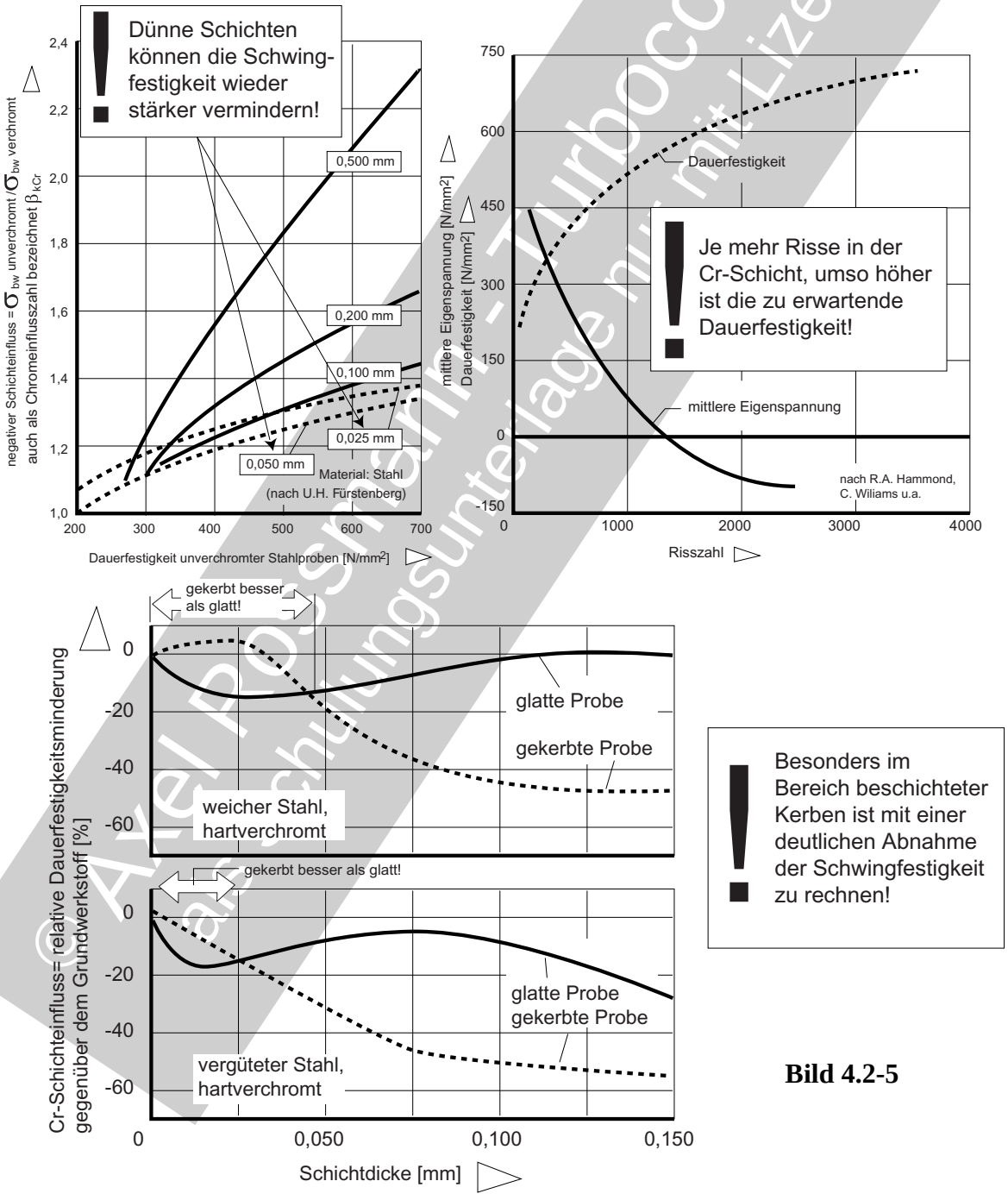


Bild 4.2-5

Das heißt: ***Die Beschichtung von Bauteilzonen mit Spannungskonzentrationen (Kerben) ist an Werkstoffen hoher Zugfestigkeit besonders riskant.***

© Axel Rossmann - Turbocon
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

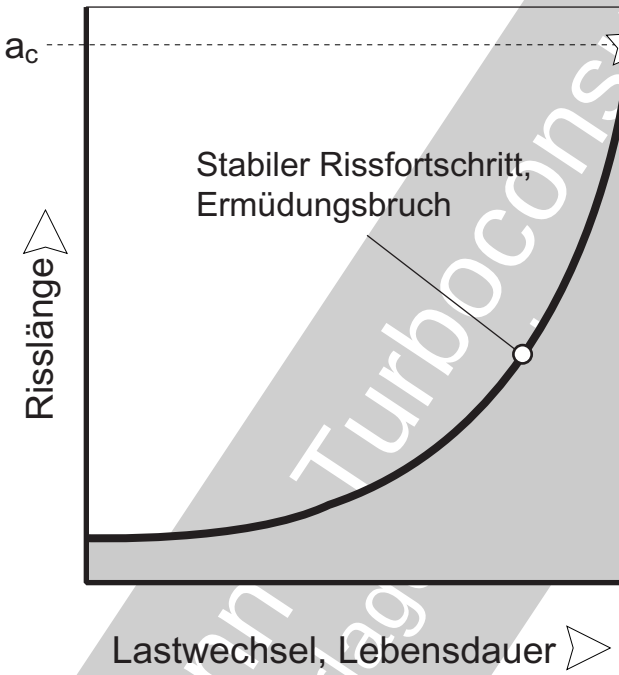
Literatur 4.2

4.2-1 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, www.Turboconsult.de, ISBN 3-00-017733-7, 2000, Kapitel 12.4, Kapitel 12.5, Kapitel 12.6.1, Kapitel 12.6.2, Kapitel 12.6.3.4,

4.2-2 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 4“, www.Turboconsult.de, ISBN 3-00-017734-5, 2005, Kapitel 16.2.1.8 und Kapitel 16.2.2.8.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

4.3 Anriss und Rissfortschritt



Bevor auf die einzelnen belastungsspezifischen Schadensmechanismen in gesonderten Kapiteln näher eingegangen wird, in denen auch die Anrissentstehung (Kapitel 5.4.3.2) und der Restbruch (Kapitel 4.4 und Kapitel 5.2.1) eingehend behandelt werden, soll das Entstehen und das Wachstum von Rissen bis zum unmittelbaren Versagen des Bauteils betrachtet werden. Die Erkenntnisse der **Bruchmechanik** sind wichtige Voraussetzungen für das Verständnis dieser Vorgänge.

Der Anriss und der unterkritische Rissfortschritt (Bild 4.3-1 und Bild 4.3-2) können sowohl unter statischer (Zeitstandbelastung, Bild 5.3.2-7) als auch unter dynamischer Last (LCF, HCF; Bild 4.3-3) oder deren Kombinationen (überlagert oder zeitlich getrennt) erfolgen.

Bei dynamischer Beanspruchung wird unter **Rissfortschrittsgeschwindigkeit** in der Bruchmechanik der auf einen Lastwechsel bezogene Fortschritt ($\Delta a/\Delta N$) verstanden. Nicht dagegen der Fortschritt in der Zeiteinheit. Das heißt, die Schwingfrequenz geht in diese Größe nicht ein, obwohl sich natürlich bei höherer Frequenz ein Riss schneller ausbreiten wird. Bruchmechanische Betrachtungen kommen häufig im Zusammenhang mit hohen zyklischen Beanspruchungen, wie bei Start/Abstell-Zyklen rotierender Komponenten (z.B. Turbomaschinen, Schwungräder), zur Anwendung. Dies hat mehrere Gründe:

Bei HCF-Beanspruchung (Bild 5.4-1) handelt es um eine dynamische Beanspruchung die über 10^5 Anrisslastwechsel benötigt. Derartig viele Lastwechsel werden gewöhnlich nur bei hochfrequenten Schwingungen erreicht. Entsprechend der Frequenz erfolgt ein sehr schneller Rissfortschritt, der es kaum erlaubt, den Riss vor dem Bruch durch eine Zwischeninspektion abzufangen. Selten ist der Zeitpunkt der Schwingbeanspruchung, die Zahl der Zyklen bis zum Anriss und die Beanspruchungshöhe bekannt, der Anrisszeitpunkt also nicht bestimmbar. Damit verlieren bruchmechanische Betrachtungen für die Schadensverhütung an Bedeutung.

Erfolgt die **Rissbildung und der unterkritische Fortschritt unter statischer Last**, ist die gleichzeitige Einwirkung zusätzlicher Effekte wie Spannungsrisskorrosion oder Temperatur (Zeitstand) notwendig (Bild 4.3-12 und Bild 4.3-13). Ist der Anrisszeitpunkt (z.B. bei Korrosion) oder die Rissfortschrittsgeschwindigkeit nicht ausreichend genau vorausbestimmbar, hat die Anwendung

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage ...zenz

der Bruchmechanik für Risikoabschätzungen und die Festlegung von Inspektionsintervallen enge Grenzen.

Bei der LCF-Beanspruchung mit Anrisslastwechseln unter 10^5 sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung der Bruchmechanik zur Schadensverhütung in akuten Fällen gut. Voraussetzung ist, dass sowohl die Zahl der relevanten Zyklen bis zum Anriss als auch die Höhe der Beanspruchung ausreichend genau bekannt sind. Dafür sind die Auslegungsdaten für die Lebensdauer und/oder eine Bruchflächenanalyse (Bild 4.3-1) geeignet. Es handelt sich in erster Linie um instationäre Zustände wie Start/Abstell Vorgänge und Leistungsänderungen. Auch im Fall einer Rissbildung in Wellen, beispielsweise Radwellen von Zügen, wird entsprechend vorgegangen. Dazu müssen natürlich die relevanten Belastungszyklen bekannt sein. Die zyklische Beanspruchung ergibt sich bei Rotoren aus Fliehkräften, Biegebeanspruchung, und Wärmespannungen (Kapitel 5.4.2). Der Anrisszeitpunkt und der Rissfortschritt pro Lastwechel sind somit gut abschätzbar, vorausgesetzt die notwendigen Werkstoffdaten liegen vor. Das ermöglicht Maßnahmen bei akuten Schäden. Hierzu zählt die Festlegung von **sicheren Restlaufzeiten** und/oder **ausreichenden Inspektionsintervallen**, bevor das Risiko eines Versagens durch einen Bruch des Bauteils zu hoch wird.

© Axel Rossmann - Tungo Consult
als Schulungsunterlage nutzbar

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
Anriss und Rissfortschritt

© Axel Rossmann - Turbocon
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Bild 4.3-1: *Ein Ermüdungsbruch unter zyklischer Beanspruchung (**Schwingbruch**) entsteht in mehreren Phasen. Bruch- bzw. **Riss-/Bruchflächen-Untersuchungen** können rückwirkend Aussagen zu den dynamischen Beanspruchungen und der Mittelspannung zulassen (Bild 4.3-21 und Bild 4.4-2).*

Inkubation: *An der höchstbelasteten Schwachstelle („A"), die in ihrer Wirkung größer ist als ein Grenzwert (engl. „**threshold**") unter dem kein Rissfortschritt entsteht (Bild 4.3-3 und Bild 4.3-14), erfolgt eine Schädigung. Diese vergrößert sich mit der Zyklenzahl zu einem Anriss von dem aus der Riss fortschreitet (Bild 5.4-2). Mehrere nahezu gleich lange Risse in anderen Bauteilen des gleichen Typs (z.B. von Antriebswellen) lassen auf eine sehr hohe, möglicherweise kurzzeitige, dynamische Beanspruchung im LCF-Bereich schließen, die bereits nach wenigen Lastwechseln den Rissfortschritt auslöste (Bild 4.3-20 und Bild 4.3-21).*

Stabile Rissfortschrittsphase: *Hier erfolgt meist auf Grund der ansteigenden Belastung des Restquerschnitts und der Kerbwirkung des Risses ein „stabiler" beschleunigter zyklischer Rissfortschritt („Phase 1", „Phase 2" und „Phase 3"). Häufig zeigen die Bruchflächen makroskopische, bogenförmige, konzentrische Linienmuster (**Rastlinien**). Sie entstehen durch eine ungleichförmige Rissfortschrittsgeschwindigkeit. Ursache sind Schwankungen der dynamischen Belastung infolge zeitlich unterschiedlicher Erregung, Veränderung der Resonanzfrequenz infolge eines Steifigkeitsabfalls durch die Rissbildung und sich ändernde Dämpfung. Auch Lastspitzen zeichnen sich bei korrosionsfesten Werkstoffen wie 'rostfreie Stähle' (CrNi-Legierungen), Titanlegierungen und Nickellegierungen in Rastlinien ab. Hier ist nicht eine Korrosion im Stillstand des Geräts ursächlich wie der Name ungerechtfertigt suggeriert. Eine Verfärbung entsteht infolge Oxidbildung bei erhöhten Betriebstemperaturen. Auch während des Rissstillstands entstehen vergleichbare Markierungen.*

Restgewaltbruch: *Dieser tritt ein, wenn der Riss eine kritische Länge „a_c" erreicht und instabil wird („R"). Die **Fläche des Restgewaltbruchs in Relation zur Schwingbruchfläche** (Primärbruch) ermöglicht einen Rückschluss auf die statische Beanspruchung beim Bruch. Mit der kritischen Risslänge a_c lässt sich diese bruchmechanisch abschätzen (Bild 4.3-3). Voraussetzung ist die Kenntnis der Risszähigkeit K_c für den vorliegenden Fall. Bei dünnen Querschnitten (z.B. Bleche) liegt K_c über der kriti-*

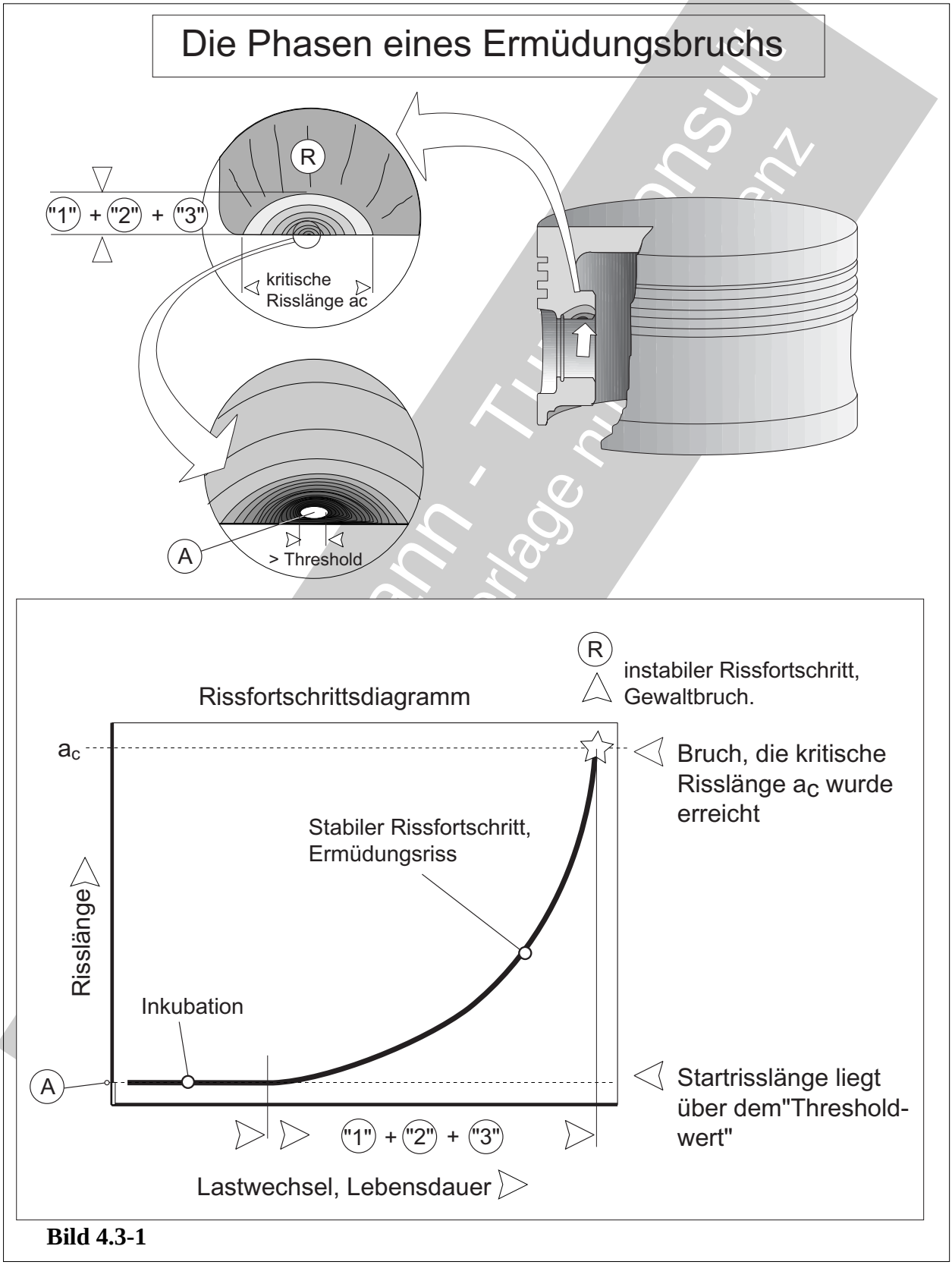


Bild 4.3-1

*schen Risszähigkeit K_{Ic} (Bild 4.3-4). Ein Hinweis auf den **Spannnungszustand** beim Restbruch sind **Scherflächen** (Bild 5.2.1-4 und Bild 5.2.1-5).*

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
Anriss und Rissfortschritt

Für das Verständnis der Bruchvorgänge genügen dem Praktiker meist die Grundlagen.

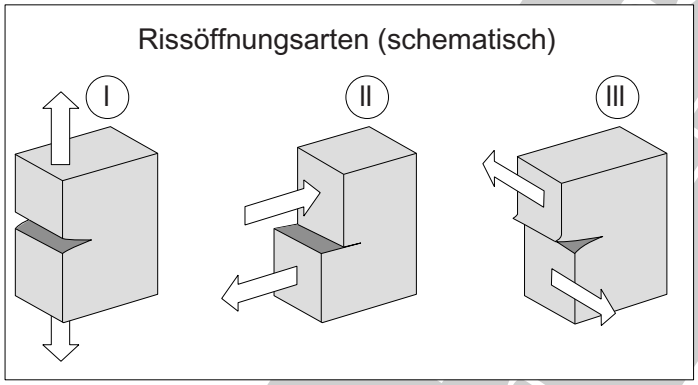


Bild 4.3-2

Bild 4.3-2 *(Lit 4.3-1 und Lit. 4.3-2): In der Bruchmechanik werden die drei* ***Rissöffnungsarten*** *unterschieden (Skizze oben). Je nachdem, ob die den Riss vorwärts treibende Kraft senkrecht zur Rissebene („I"), in der Rissebene in Fortschrittsrichtung („II") oder quer zum Fortschritt („III") wirkt. Die zugehörigen* ***Spannungsintensitäten*** *werden mit den entsprechenden Indices „I, II" und „III" (K_I, K_{II}, K_{III}) gekennzeichnet. Die Rissöffnungsart „I" tritt in der Technik am häufigsten auf. Bei ihr werden die Rissflächen auseinandergezogen. Die Rissöffnungsart „II" beansprucht die Rissebene rein auf Scherung. Rissöffnungsart „III" erfolgt ebenfalls unter Abgleiten der Rissflächen. Scherflächen bilden sich auch an dünnen Querschnitten unter Zug. Grund ist die große plastische Verformung an der Oberfläche (Bild 4.3-5).*

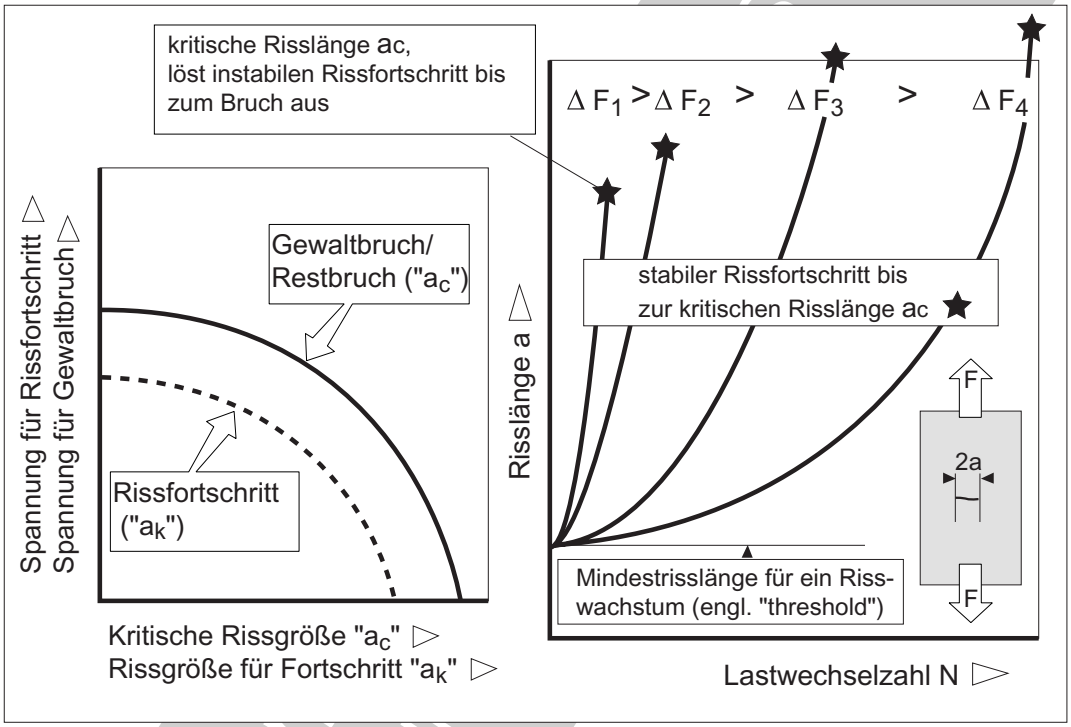
Bild 4.3-3 *(Lit 4.3-8 und 4.3-19): Das Diagramm oben stellt das stabile Wachstum in Abhängigkeit von der Höhe der dynamischen Belastung (F) dar.* ***Bei stabilem Risswachstum lässt sich der Rissfortschritt durch Absenkung der dynamischen Belastung bis zum Stillstand verlangsamen.***

Je höher die Belastung, desto geringer ist die Lastwechselzahl bis zum Bruch (instabiles Risswachstum). Dieser zu erwartende Zusammenhang beruht auf zwei Effekten: Einem schnelleren Risswachstum das sich in dem steileren Kurvenverlauf zeigt und der kürzeren kritischen Risslänge „a_c" ab der es zum instabilen Rissfortschritt bzw. Gewaltbruch kommt.

Das Diagramm unten (nach ***Paris****) zeigt das* ***stabile Risswachstum*** *unter dynamischer Beanspruchung pro Lastwechsel (da/dN) gegenüber der Belastungsgröße „K" (Spannungsintensität). Risswachstum während statischer Last findet man z.B. unter Korrosionseinfluss (Bild 4.3-13). Für eine dynamische Beanspruchung gilt die Belastungsamplitude ΔK. Dieser Wert gibt die Beanspruchung an der Rissspitze unter den Lastzyklen in Abhängigkeit von der Rissgröße an (Bild 4.3-4 und Bild 4.3-5). Man erkennt, dass abhängig von der Höhe der Nennbeanspruchung ein Risswachstum erst ab einer Mindest-Spannungsintensität K_{th} (statisch) bzw. einer entsprechenden Amplitude ΔK_{th} (dynamisch) eintritt (engl. threshold = Grenzwert). Diese Mindest-Intensität ist von vielen Faktoren wie Gefüge und Umwelteinflüssen abhängig (Bild 4.3-13 und Bild 4.3-14). Den stabilen Rissfortschritt selbst kann man in drei Phasen entsprechend Bild 4.3-1 aufteilen (nicht zu verwechseln mit den Bezeichnungen der Rissöffnungsarten). Eine Phase 1 nach der Anrissbildung, eine mittlere Phase 2 und einer Phase 3 in der sich das Risswachstum stark beschleunigt, bevor instabiles Risswachstum mit dem Bruch eintritt (Diagramm unten, Lit. 4.3-8).*

© Prof. Dr. Gudehus - Alle Rechte vorbehalten - Lizenz

Der Rissfortschritt verändert sich vom Anriss bis zum Bruch in charakteristischer Weise.



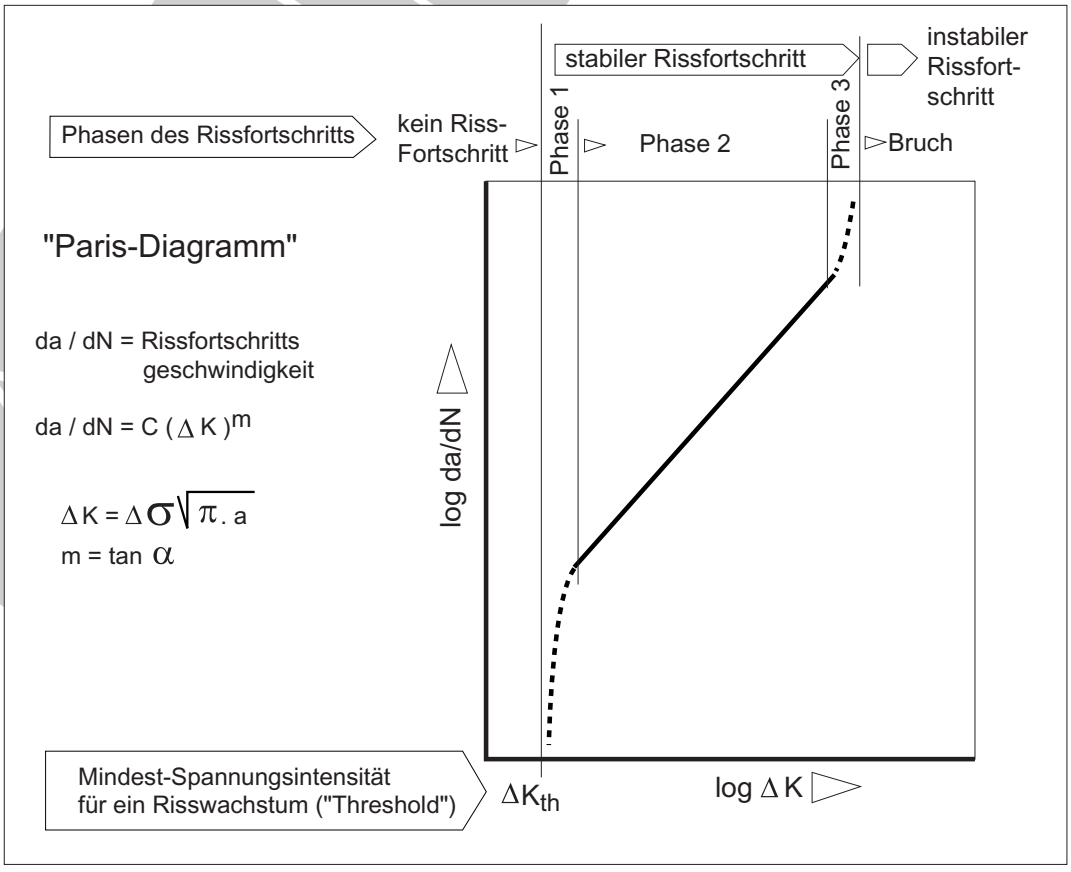


Bild 4.3-3

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
Anriss und Rissfortschritt

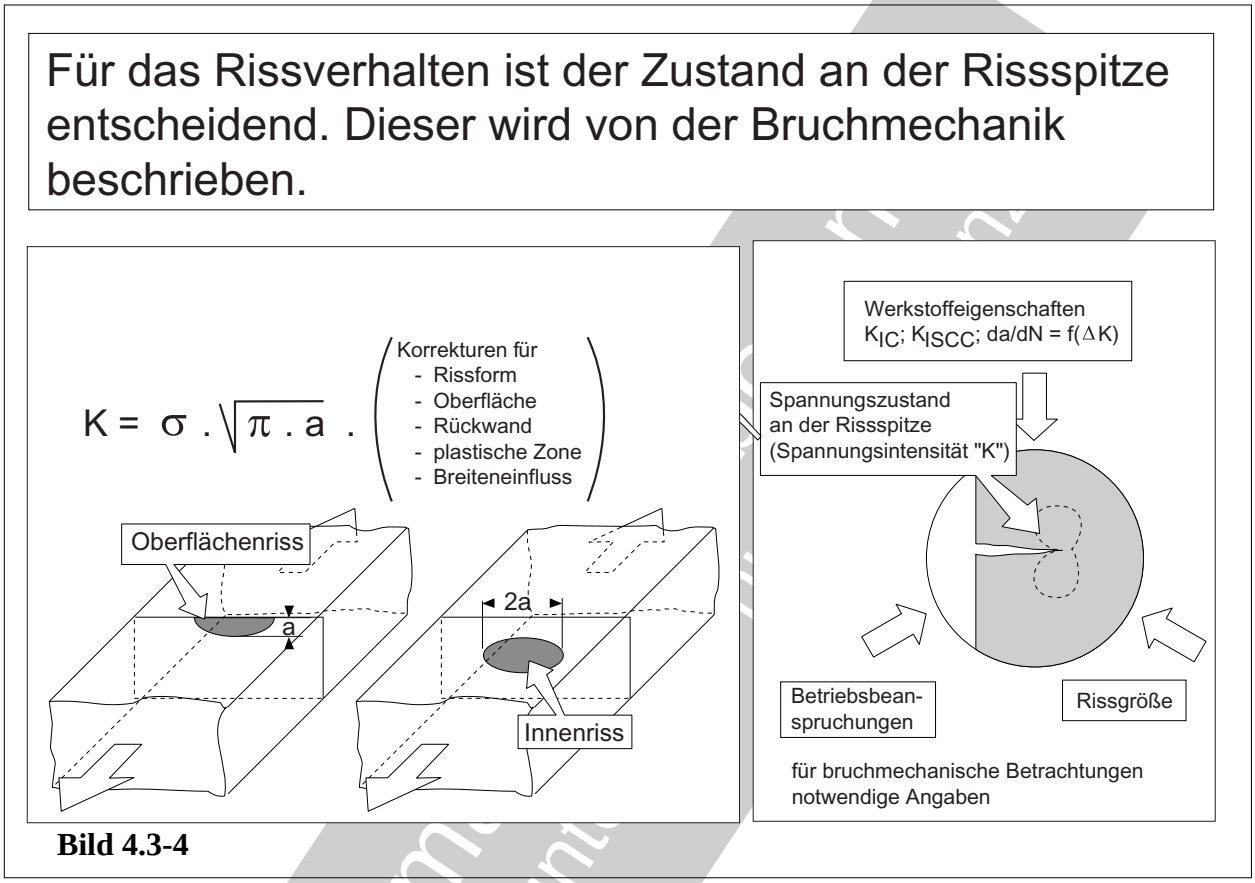


Bild 4.3-4

Bild 4.3-4 *(Lit. 4.3-19): Weil an der Rissspitze der* ***Rissfortschritt*** *stattfindet, ist der hier herrschende Spannungs- und Verformungszustand (Skizze rechts, Bild 4.3-5) von entscheidender Bedeutung.*
Bei bruchmechanischen Betrachtungen der Rissspitze werden zwei Größen benötigt: Die ***Spannungsintensität „K“*** *der Bruchmechanik entspricht der Beanspruchung (Spannung σ). Die* ***Risszähigkeit*** *entspricht der Festigkeit des angerissenen Werkstoffs (z.B. „K_I“ für die Rissöffnungsart „I“, Bild 4.3-2).* ***Überschreitet die Spannungsintensität die Risszähigkeit kommt es zum Restgewaltbruch*** *(instabiler Rissfortschritt). Sind die Bedingungen an der Rissspitze geeignet einen Trennbruch (makroskopisch sprödes Aussehen, Bild 5.2.1-4 und Bild 5.2.1-5) auszulösen, liegt die niedrigste (kritische) Risszähigkeit „K_{IC}“ vor (Bild 5.2.1-5). Unter Bedingungen die Scheranteile im Bruch entstehen lassen (schmaler Bruchquerschnitt, Lit. 4.3-2 und Lit 4.3-8) ist die Risszähigkeit höher und wird mit „K_I“ gekennzeichnet.*
Die linke Skizze zeigt den einfachen Zusammenhang zwischen der Spannungsintensität, der anliegenden Nennspannung „σ“ quer zum Riss und der wirksamen Rissgröße „a“, wobei sich diese aus Rissform und Risslage (z.B. Oberflächenriss, Innenriss) ergibt.

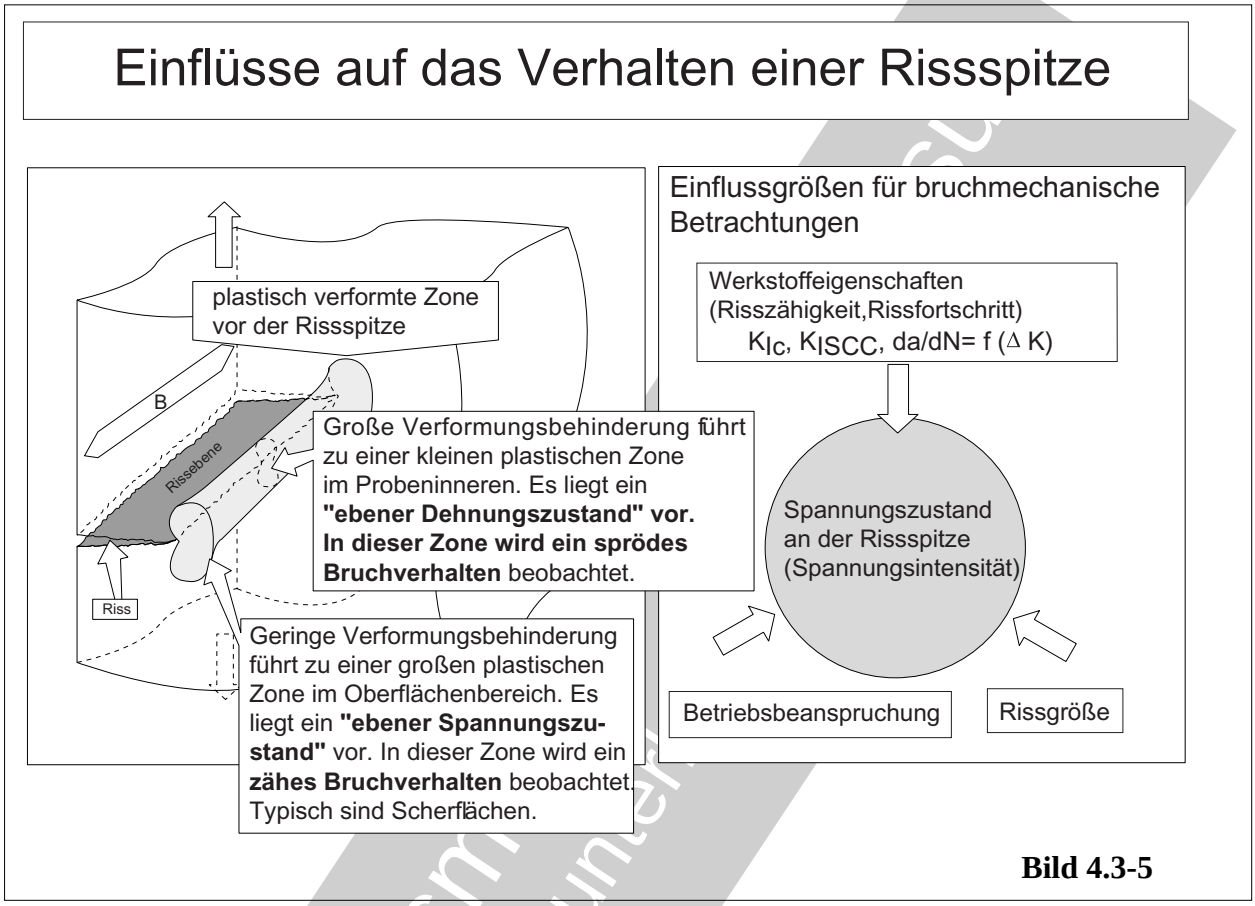


Bild 4.3-5

Bild 4.3-5 *(Lit 4.3-2): Vor der Rissspitze bildet sich eine plastisch verformte Zone deren Volumen und Form von der Breite „B“ des rissbehafteten Querschnitts und der Zähigkeit des Werkstoffs abhängig ist (Skizze links). Solche Zonen lassen sich an plastisch verformten gekerbten Proben aus zähem Werkstoff gut erkennen. Sind die Zonen im Vergleich zur* ***Querschnittsdicke*** *groß (dünne flache Querschnitte), geht die Rissöffnungsart „I“ in die Rissöffnungsart „III“ über (Bild 4.3-2). An den Oberflächen behindert das benachbarte, weniger hoch belastete Volumen die Verformung im Rissspitzenbereich relativ wenig. Es kommt zu einem nicht ebenen Dehnungszustand. Im Inneren des Querschnitts wird dagegen die Verformung so stark behindert, dass die Dehnung vor dem Riss gleichmäßig erfolgt. Man spricht in diesem Fall von einem ebenen* ***Dehnungszustand****. Hier führt die* ***Verformungsbehinderung*** *zu einem makroskopisch spröden Verhalten (Bild 5.2.1-4).*

Die Skizze rechts zeigt wichtige Einflüsse auf den Zustand der Risspitze und damit auf das Verhalten des Risses.

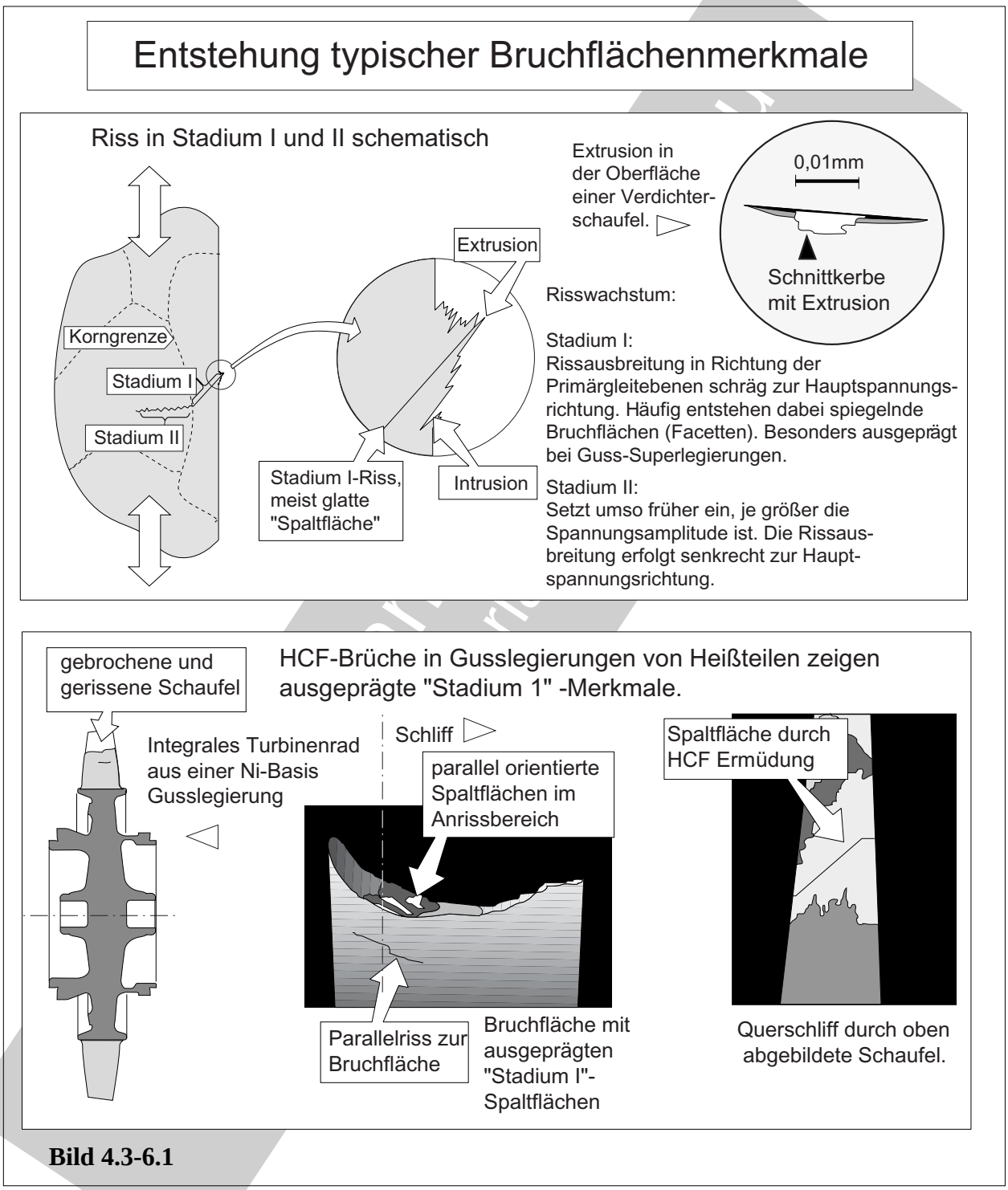


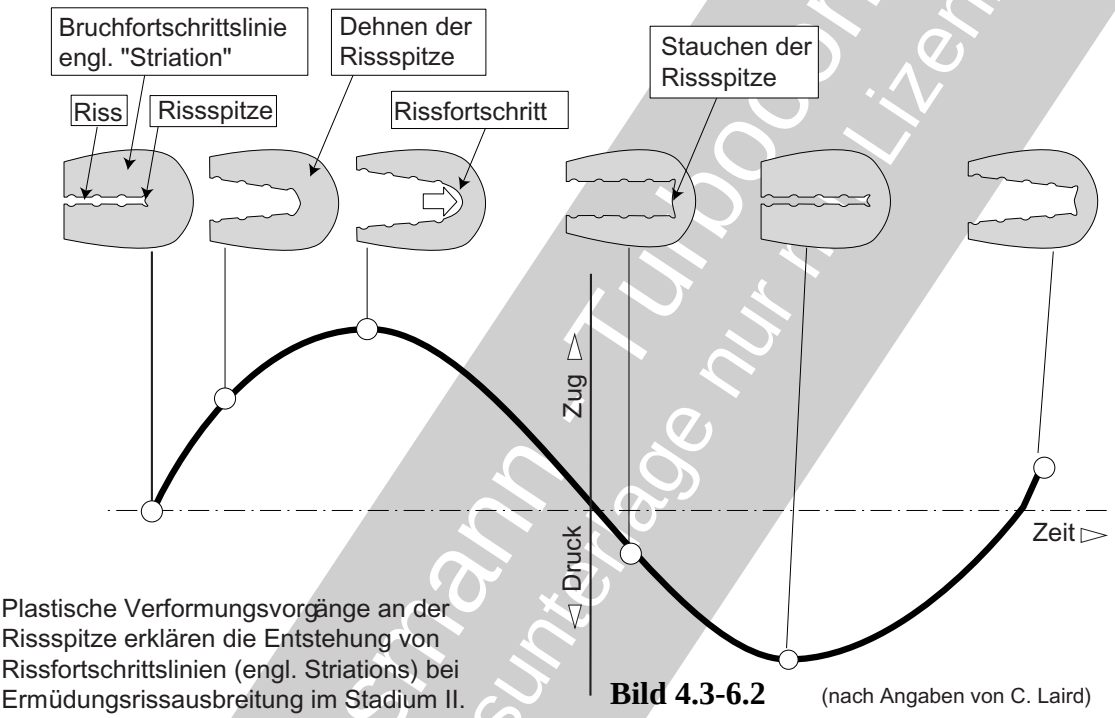
Bild 4.3-6.1

Bild 4.3-6.1 *(Lit 4.3-9): Man unterscheidet verschiedene Stadien eines Schwingrisses. Zu Beginn einer* ***Rissentstehung in Oberflächennähe (Stadium I)*** *erfolgt eine* ***intrakristalline, häufig sehr glatte Trennung*** *unter etwa 45°. Dabei bilden sich Ein- und Ausbeulungen (In- und Extrusion, Detail).*

Das Detail oben rechts zeigt eine ***Extrusion.*** *Es handelt sich um einen REM-Befund an einer schnittartigen Kerbe auf dem Blatt einer dynamisch hoch belasteten Verdichterschaufel. Der mikroskopische Walkvorgang presst Material aus der plastisch verformten Kerbe.*

Austenitische Legierungen *zeigen bei dynamischer Überlastung, insbesondere im HCF-*

Bruchfortschrittslinien ("Striations") ermöglichen Schlüsse auf Belastungsart, -richtung, -höhe, Zeitabläufe und den Anrissort sowie ursächliche Schwachstellen.



Plastische Verformungsvorgänge an der Rissspitze erklären die Entstehung von Rissfortschrittslinien (engl. Striations) bei Ermüdungsrissausbreitung im Stadium II.

Bild 4.3-6.2 (nach Angaben von C. Laird)

Bereich im Stadium I typische transkristalline (Skizze unten rechts) facettenartige Strukturen. ***Sie werden als Spaltflächen*** *(engl.* ***cleavage cracks****) bezeichnet. Sie treten bevorzugt am Rissbeginn auf, können aber auch weiter innen noch beobachtet werden.*

Als Beispiel wurde hier ein HCF-Schwingbruch an einem integralen gegossenen Turbinenrad gewählt (Skizze unten links). Diese Bruchstrukturen sind bei großen Körnern (im 10 mm Bereich), wie für Ni-Basis-Guss besonders ausgeprägt. Bei geringer Oxidation (frischen Bruchflächen) fallen die Bruchfacetten als ***spiegelnd glatte Flächen*** *auf (Skizze unten Mitte). Selten lassen sich* ***mikroskopisch auswertbare Rissfortschrittslinien*** *erkennen. Diese Facetten müssen von ähnlichen Bruchmerkmalen an Gewaltbrüchen, die bei sehr hohen Temperaturen (Solidusbereich) durch Schlagwirkung entstanden sind, unterschieden werden.*

Bild 4.3-6.2 *(Lit 4.3-9): Beim Rissfortschritt (****Stadium II****) unter zykli scher Beanspruchung entstehen während jedem Lastwechsel linienförmige Markierungen entlang der Rissfront. Es handelt sich um mikroskopische* ***Rissfortschrittslinien*** *(engl.* ***striations****) und nicht um makroskopische Rastlinien (Bild 4.3-1). Die Erklärung für* ***Striations*** *ist die plastische Verformung bei jedem Lastspiel: Dehnung bei Rissöffnung und Stauchen beim Schließen des Risses (Skizze unten).*

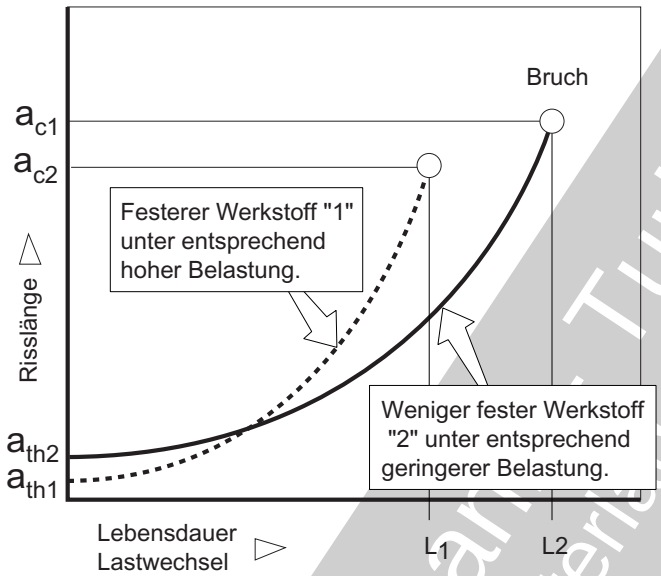
Strittig ist, ob in der Praxis tatsächlich wie im Modell immer eine (erkennbare) Fortschrittslinie einem Lastwechsel zuordenbar ist. Das gilt besonders bei HCF-Belastungen. Je höher diese sind (LCF) umso besser ist die Erkenn- und Auswertbarkeit.

Auch unter statischer Last kann sich ein Linienmuster ausbilden, das einem zyklischen Rissfortschritt ähnlich ist, z.B. unter Korrosionseinwirkung. Hier besteht eine besondere Gefahr der ***Fehlinterpretation*** *(Bild 5.6.3.1.1-5).*

© Axel Rossmann Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten Anriss und Rissfortschritt

Je höher die genutzte Festigkeit eines Werkstoffs, um so kleiner müssen die Fehler sein. Damit spielen die Prüfverfahren eine entscheidende Rolle.



$$K_{th} \sim \sigma \sqrt{a_{th}}$$
$$K_{IC} \sim \sigma \sqrt{a_c}$$

Höhere Festigkeiten werden durch höhere Belastungen genutzt. Dies führt zu **erheblichen Sicherheitsproblemen**: Bei gleichem Grenzwert ("Threshold" K_{th}) der Bruchzähigkeit und höherer Spannung wird die Fehlergröße (a_{th}), ab der diese zum Risswachstum führt, kleiner. Infolge der höheren Belastung sinkt die Lebensdauer bzw. die Lastwechselzahl (L) bis zum Versagen. Die Rissfortschrittsgeschwindigkeit steigt und die kritische Risslänge (a_c), bei der spontanes Versagen auftritt, verkleinert sich.

Bild 4.3-7

Bild 4.3-7: *Höherfeste Werkstoffe bedeuten nicht zwangsläufig höhere Sicherheit gegen Bauteilversagen durch Rissbildung und Bruch. Leider ist eher mit dem Gegenteil zu rechnen.* ***Höherfeste Werkstoffe werden gewöhnlich auch entsprechend höher belastet*** *(Kapitel 4.1). Dadurch steigt bei Ermüdung das Schadensrisiko als Folge einer erhöhten Anrisswahrscheinlichkeit und weil das Teil nach einem Anriss früher versagt (****verkürzte Rissfortschrittsphase****). Gründe für dieses Verhalten sind (Bild 4.3-9):*

- Bereits kleinere Initialfehler neigen zum Rissfortschritt weil K_{th} als Werkstoffkennwert gleich bleibt, die Spannung σ aber höher liegt, muss die Größe des wachstumsfähigen Fehlers am Anriss kleiner sein (Bild 4.3-3).

- die Rissfortschrittsgeschwindigkeit steigt, denn jeder Lastwechsel führt zu einem größeren Schritt (Bild 4.3-6.2).

- Der Riss wird bei kürzeren kritischen Risslängen („a_c“) wegen der höheren Belastung instabil (Bild 4.3-3), wenn K_{IC} als Werkstoffkennwert auch für den höherfesten Werkstoff gleich bleibt. Das angerissene, höher belastete Teil bricht also früher. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass sich ein ***höherfester Werkstoff sogar rissempfindlicher*** *zeigt, d.h. eine kleinere kritische Risszähigkeit aufweist (Bild 4.3-8) und damit das Verhalten weiter verschlechtert.*

© Axel Rossmann - Turbocon als Schulungsunterlage mit Lizenz

Bild 4.3-8 *(Lit.4.3-24): Das* ***bruchmechanische Verhalten*** *eines Werkstoffs erhält mit dem Trend zum Leichtbau und der Auslastung des Festigkeitspotenzials immer größere Bedeutung. Dabei wird die Bruchzähigkeit/Risszähigkeit zum wichtigen Kennwert (Bild 4.3-4). Sie beschreibt den Widerstand, den ein Querschnitt dem Rissfortschritt entgegensetzt. Bei ausreichend dickem Querschnitt (Bild 5.2.1-5) kommt es zum spröden Gewaltbruch wenn die Sapnnungsintensität die kritische* ***Bruchzähigkeit*** *überschreitet. Diese ist der niedrigste und damit auch gefährlichste Wert für ein spontanes Versagen den der Werkstoff erreicht. Aus* ***Bruchdehnung*** *und* ***Fließgrenze/Festigkeit*** *ist nicht unbedingt auf die Bruchzähigkeit zu schließen. Es gilt jedoch die Tendenz, dass eine hohe Fließgrenze ein spröderes Verhalten und damit eher eine niedrigere Bruchdehnung erwarten lässt (Bild 4.1-1, Diagramm oben links). Auch aus* ***Kerbschlagzähigkeit*** *oder* ***Kerbempfindlichkeit*** *ist nicht unbedingt auf die Tendenz der Bruchzähigkeit zu schließen. Grund dafür dürfte sein, dass im Gegensatz zur Rissspitze ein relativ großer Kerbradius vorhanden ist. Die Rissspitze wirkt dagegen im Mikrobereich. Damit dürfte das* ***Gefüge*** *(Orientierung, Korngröße, Inhomogenität, Bild 4.3-9) einen deutlich größeren Einfluss haben.*

Dieser Unterschied wird besonders deutlich, wenn man den ***unterkritischen Rissfortschritt*** *bei statischer und dynamischer Beanspruchung betrachtet (Bild 4.3-3 und Bild 4.3-6.1). Eine höhere Risszähigkeit erleichtert mit höherem Grenzwert (engl. threshold), ab dem ein (größerer) Fehler wachstumsfähig wird, die erforderliche* ***Qualitätssicherung*** *(Bild 4.3-3). Dies kann über den Einsatz eines Werkstoffs entscheiden (Bild 3.2.1-1).*

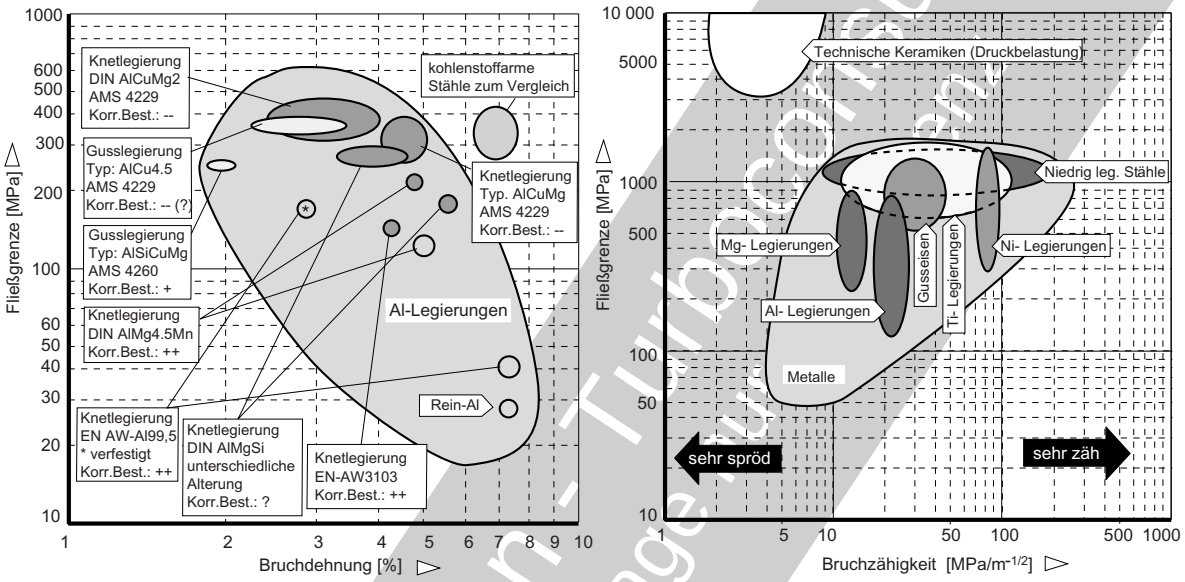
Beispielsweise weisen hochfeste Titanlegierungen eine geringe Kerbempfindlichkeit (Schwingbelastung) auf. Bei einem Riss ist jedoch mit einer niedrigen Bruch-/Risszähigkeit und damit einer erhöhten Versagensempfindlichkeit zu rechnen.

Im Diagramm oben links erkennt man, dass mit der ***Zähigkeit eines Metalls auch die Bruchzähigkeit tendenziell zunimmt****. Dabei ist die Bruchzähigkeit für Al-, Mg- und Nickellegierungen im Gegensatz zu Stählen und Ti-Legierungen von der Höhe der Fließgrenze offenbar weniger abhängig. Dasselbe Bild findet man auch für den Zusammenhang zwischen* ***Bruchfestigkeit und Bruchzähigkeit*** *(Diagramm unten). Auffällig ist der breite Bereich der Bruchzähigkeit bei faserverstärkten Werkstoffen. Dies lässt sich mit dem Lagenaufbau und der Faserorientierung erklären (Bild 3-11). Je höher die Bruchzähigkeit, umso toleranter ist der Werkstoff gegenüber Rissbildung****.*** *Die* ***Rissfortschrittsgeschwindigkeit*** *(Bild 4.3-3) nimmt ab, die* ***kritische Risslänge*** *(Bild 4.3-1) wird größer. Damit verbessert sich die Chance,* ***Risse vor einem katastrophalen Versagen mit abgestimmten Inspektionsintervallen abzufangen****.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
Anriss und Rissfortschritt

Bruchmechanisch relevantes Verhalten von Werkstoffen.



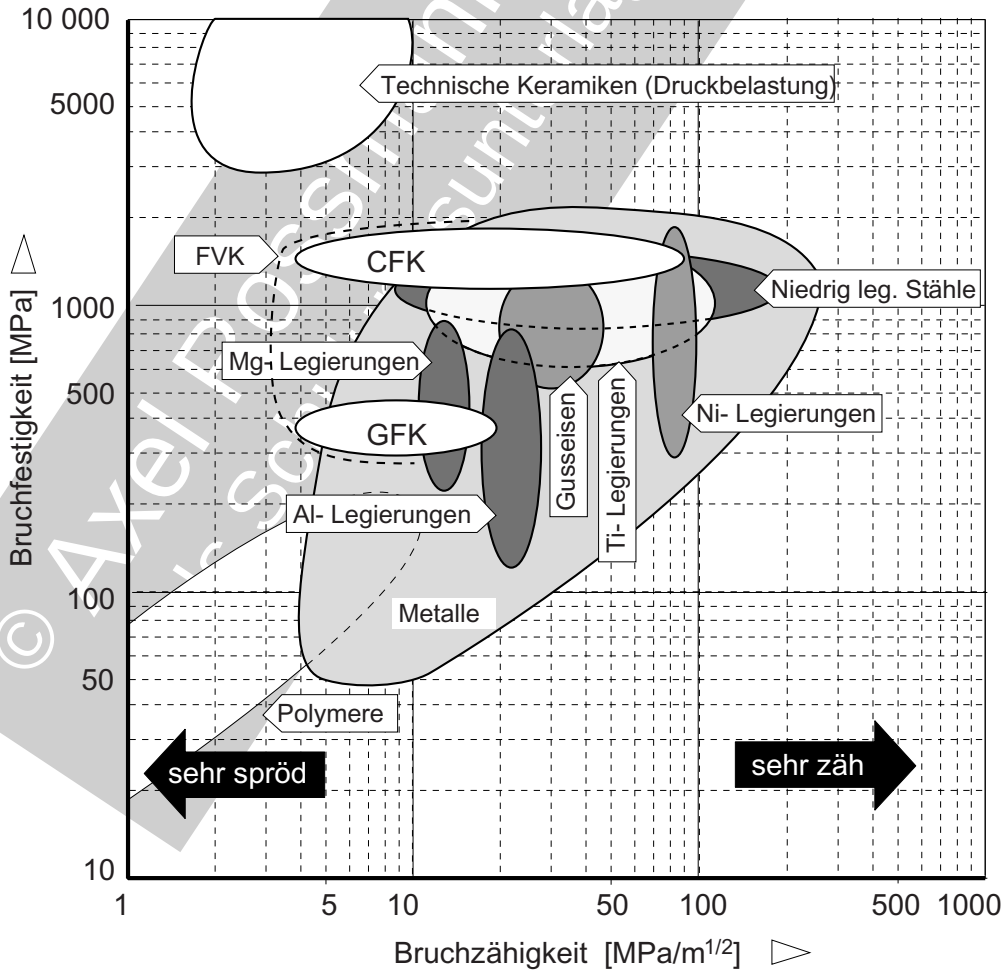
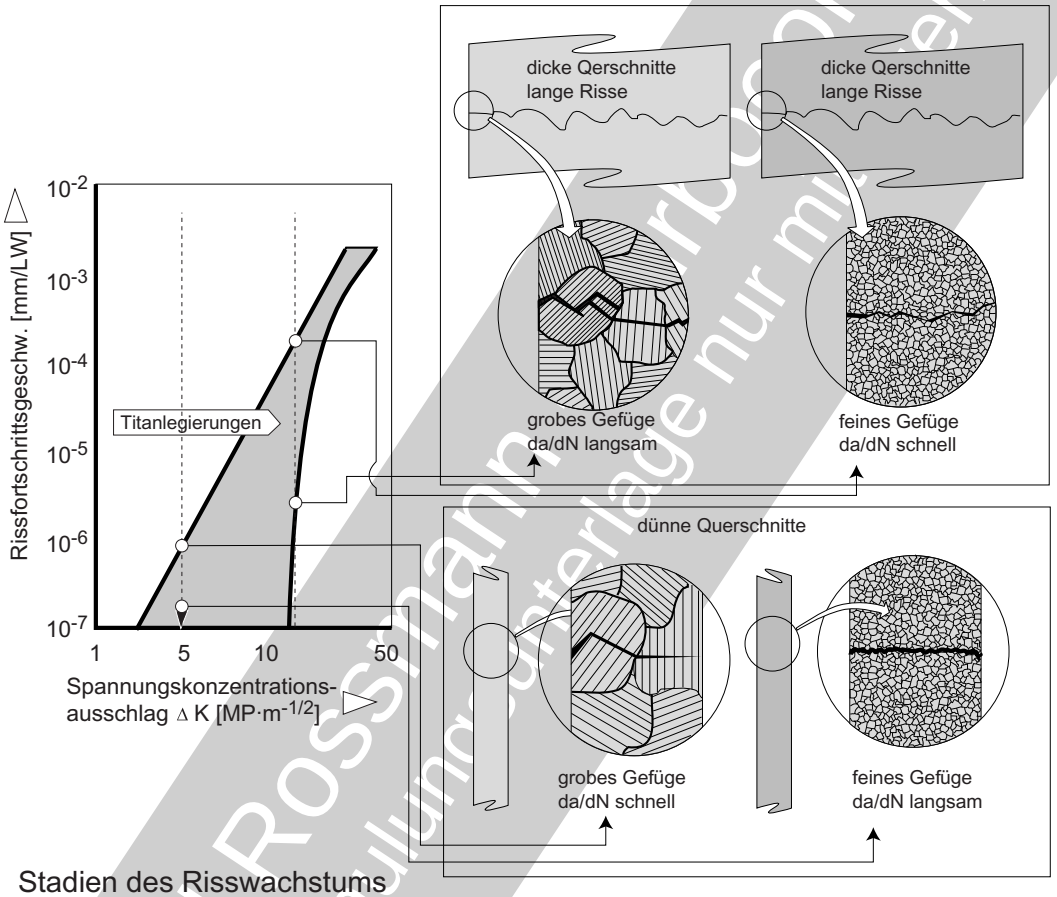


Bild 4.3-8

© Axel Rossmann - Technische Universität Chemnitz

Der Rissfortschritt (da/dN-ΔK-Kurve) wird u.A. vom Gefüge, der Risslänge und dem Querschnitt beeinflusst.



Stadien des Risswachstums

$$N_T = N_n + N_S + N_{\sigma/p} + N_{\varepsilon/p}$$

N_T = gesamte Lebensdauerzyklen

N_N = Zyklen, um eine rissartige Schwachstelle, deren Größe zu definieren ist, zu erzeugen.

N_s = Zyklen für ein Risswachstum, das von der Gefügestruktur abhängig ist.

$N\sigma_{/p}$ = Zyklen eines Risswachstums, welches durch die linear-elastische Bruchmechanik (LEBM, engl LEFM) beschrieben wird.

$N\varepsilon_{/p}$ = Zyklen eines Risswachstums, das wegen zu großer Risslänge und plastischer Verformung im Rissbereich nicht mehr durch die LEBM beschrieben wird.

Bild 4.3-9

© Axel Rossmann
als Schulungsunterlage nur mit Genehmigung

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten Anriss und Rissfortschritt

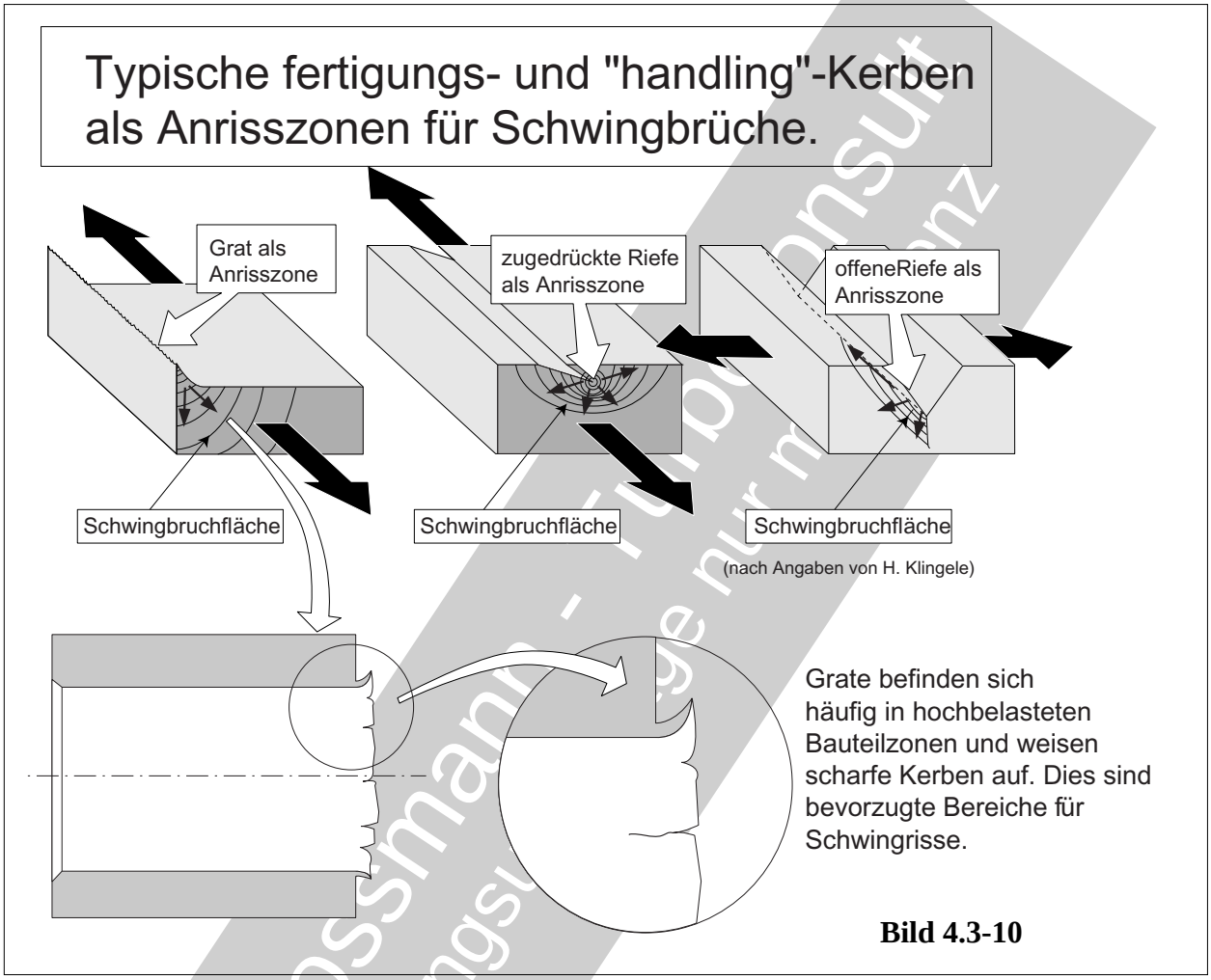


Bild 4.3-10

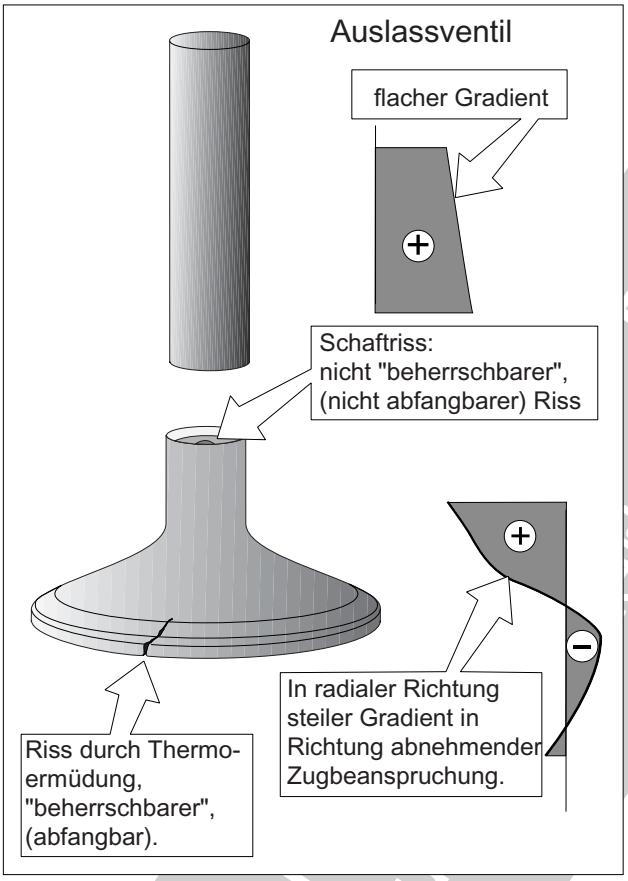
Bild 4.3-9: *Die Größe eines Fehlers, von dem sich ein Anriss bilden kann und der Rissfortschritt sind außer von der Amplitude der Spannungskonzentration (ΔK) auch vom Querschnitt des Bauteils in der Risszone und dem Gefüge abhängig (Diagramm). Bei Titanlegierungen mit* ***„grobem" Gefüge*** *ist die* ***Rissfortschrittsgeschwindigkeit*** *in einem* ***dicken Querschnitt langsamer*** *als in „feinem" Gefüge (Skizzen, Lit 4.3-22). Dieses Verhalten beobachtet man auch bei feinkörnigen Nickellegierungen, die geschmiedet oder pulvermetallurgisch (besonders feinkörnig) hergestellt wurden.* ***In dünnen Querschnitten schreitet dagegen der Riss im grobkörnigen*** *Gefüge schneller fort als im feinkörnigen (Lit 4.3-11).*

Die eingerahmten Größen der Formel repräsentieren den Einfluss von Gefüge und Querschnitt. „N_S" ist die Zahl der Lastwechsel, welche den Einfluss der Gefügestruktur auf die Rissentstehung berücksichtigt (siehe auch Lit. 4.3-21). $N_{\sigma/p}$ ist vom Probenquerschnitt abhängig (Lit 4.3-10).

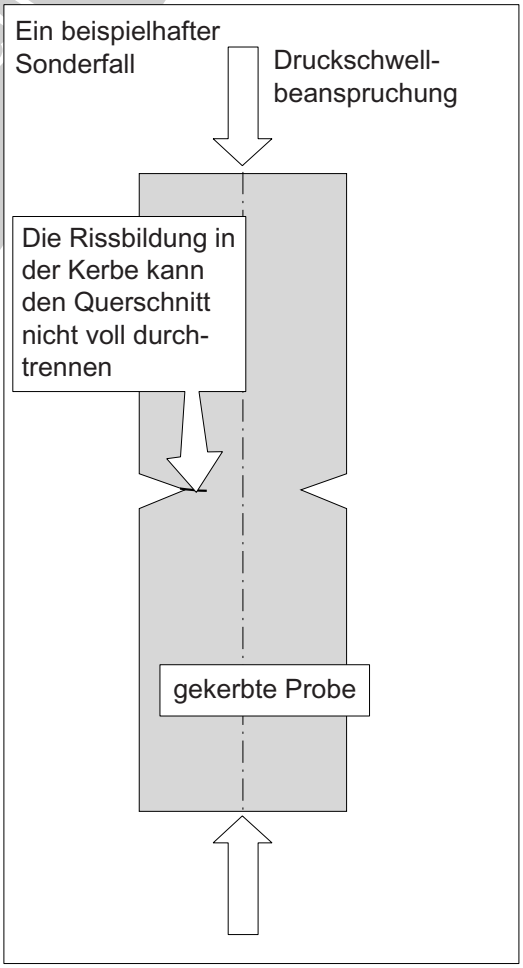
Bild 4.3-10 *(Lit. 4.3-9):* ***Rissauslösende Kerben*** *müssen nicht notwendigerweise quer zur Beanspruchungsrichtung (Skizze rechts) liegen. Auch Längsriefen (Skizze Mitte) und* ***Grate, die ähnlich wie eine Längsriefe wirken,*** *können auf Grund ihres zerklüfteten Kerbgrunds Anrisse auslösen.* ***Die Gefährlichkeit von Graten an dynamisch hoch beanspruchten Bohrungen und Kanten wird oft unterschätzt*** *(Bild 5.4.1.1-8).*

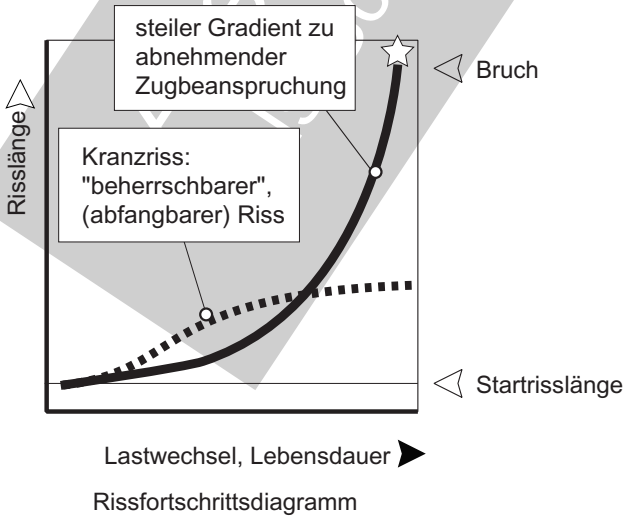
© Axel Rossmann - Turbokonsult
alle Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Der Zugspannungsgradient entscheidet über die "Beherrschbarkeit" eines Risses.



In Handbüchern oder Inspektions-Spezifikationen zugelassene Risse oder Risse, die erst bei der Überholung zur Aussonderung von Teilen führen, müssen beherrschbar sein!





Rissfortschrittsdiagramm

Bild 4.3-11

Bild 4.3-11: *Unter* ***„Beherrschbarkeit" eines Risses*** *wird hier die Chance verstanden, diesen* ***Riss vor dem Versagen des Bauteils „abzufangen"*** *(Bild 4.3-24). Die „Beherrschbarkeit" eines Risses ist Voraussetzung mit Rissen „zu leben". Dies gilt erfahrungsbasiert für im Betrieb zugelassene Risse (z.B. Thermoermüdungsrisse in Ventiltellern oder Kolbenböden). Sie sollten im* ***Lebensdauerkonzept*** *der Bauteile berücksichtigt sein und können gegebenenfalls überwacht werden (z.B. Boroskop-Inspektion). Eine weitere Situation, in welcher Risse beherrscht werden müssen, liegt vor, wenn ein Schaden durch LCF-Rissbildung auftrat. Sind Abhilfemaßnahmen nicht schnell genug möglich, können sichere Inspektions- und/oder Austauschintervalle festgelegt werden. So ist das Problem erst einmal entschärft und wichtige Zeit gewonnen. Voraussetzung ist natürlich, dass Anriss, Rissfortschritt und die wirksamen Einflüsse ausreichend sicher verstanden werden und das Risswachstum verfolgbar ist.*

Damit ***hängt die „Beherrschbarkeit" von LCF-Rissen besonders von der Rissfortschrittsgeschwindigkeit und der kritischen Risslänge ab*** *(Bild 4.3-4). Im Falle einer bekannten LCF-Beanspruchung, die bestimmten Betriebszyklen zuordenbar ist, lässt sich die sichere Lebensdauer definieren und überwachen (Zugänglichkeit vorausgesetzt).*

Bei ***hochfrequenten Schwingungen*** *zeigt die Erfahrung, dass auf Grund der*

-meist unbekannten Höhe der Schwingbelastung,

- Unsicherheit über Zeitpunkt und Dauer der Schwingbelastung,

- hohe Rissfortschrittsgeschwindigkeit, hier bezogen auf die Zeit und nicht auf die Lastwechsel;

die Chancen äußerst gering sind, nach dem Anriss das rissbehaftete Teil vor dem Versagen/Bruch zu erkennen bzw. auszusondern*.*

Der Rissfortschritt pro Lastwechsel muss sich nicht notwendigerweise mit der Risslänge beschleunigen (Bild 4.3-1 und Bild 5.4.2.1-2). Ein exponentiell anwachsender Rissfortschritt tritt auf, wenn die Spannung im Querschnitt in Richtung der Rissausbreitung nahezu konstant ist (kleiner ***Gradient****, Skizze oben links) oder gar mit der Rissgröße (Verkleinerung des Restquerschnitts) ansteigt. In einem solchen Fall erschwert der beschleunigte Rissfortschritt die Beherrschbarkeit eines LCF-Risses erheblich, wenn diese nicht gar unmöglich gemacht wird. Ein typisches Beispiel ist der Riss in der Nabe eines Turbinenrades (Skizze oben links).*

Liegt nach dem Anriss eine steil abfallende Spannung vor (großer Spannungsgradient), der möglicherweise noch in eine Druckzone übergeht (Kranzbereich eines Turbinenrades, Lit 3.2-25), dann ***verlangsamt sich die Rissausbreitung*** *und kommt, wenn die Spannungsumlagerung beim Risswachstum dies zulässt, sogar bei ausreichend niedrigem Spannungsniveau einige Zeit zum Stillstand (Diagramm unten links und Bild 4.4-1). Werden Risse in vorgegebenen Grenzen zugelassen, handelt es sich um* ***dehnungsgesteuerte Beanspruchungen.*** *Meist um Thermoermüdungsrisse. In diesen Fällen haben Wärmespannungen einen entscheidenden Anteil (Kapitel 5.4.2).*

Schwingermüdung und Risswachstum entstehen nur unter Zugspannungen. Die Werkstofftechnik kennt jedoch einen Sonderfall, in dem unter äußerer pulsierender Druckbelastung Ermüdungsrisse in Kerben entstehen. Solche Risse können aber den Querschnitt ohne Zusatzlasten nicht voll durchtrennen (Skizze rechts). Infolge der Kerbwirkung verformt sich der Kerbgrund unter den hohen Druckspannungen plastisch. In der Entlastungsphase steht dieser gestauchte Bereich unter Zugspannungen und im Gleichgewicht mit dem elastisch beanspruchten Restquerschnitt. Man erkennt leicht, dass im beschriebenen Fall die Zugspannungen, als Voraussetzung für einen Rissfortschritt, mit diesem abnehmen. Einem ähnlichen Mechanismus unterliegt ein Bauteil unter ***Thermoermüdung****.*

© AVL Prüfstandbau GmbH, Tulln
als Schulungsunterlage genehmigt

Die Mindest-Anrissfehlergröße ("threshold") reagiert auf viele Einflüsse äußerst empfindlich. Dieses Verhalten mahnt zur Vorsicht bei der Anwendung zu Lebensdauer-Aussagen ("Damage Tolerance").

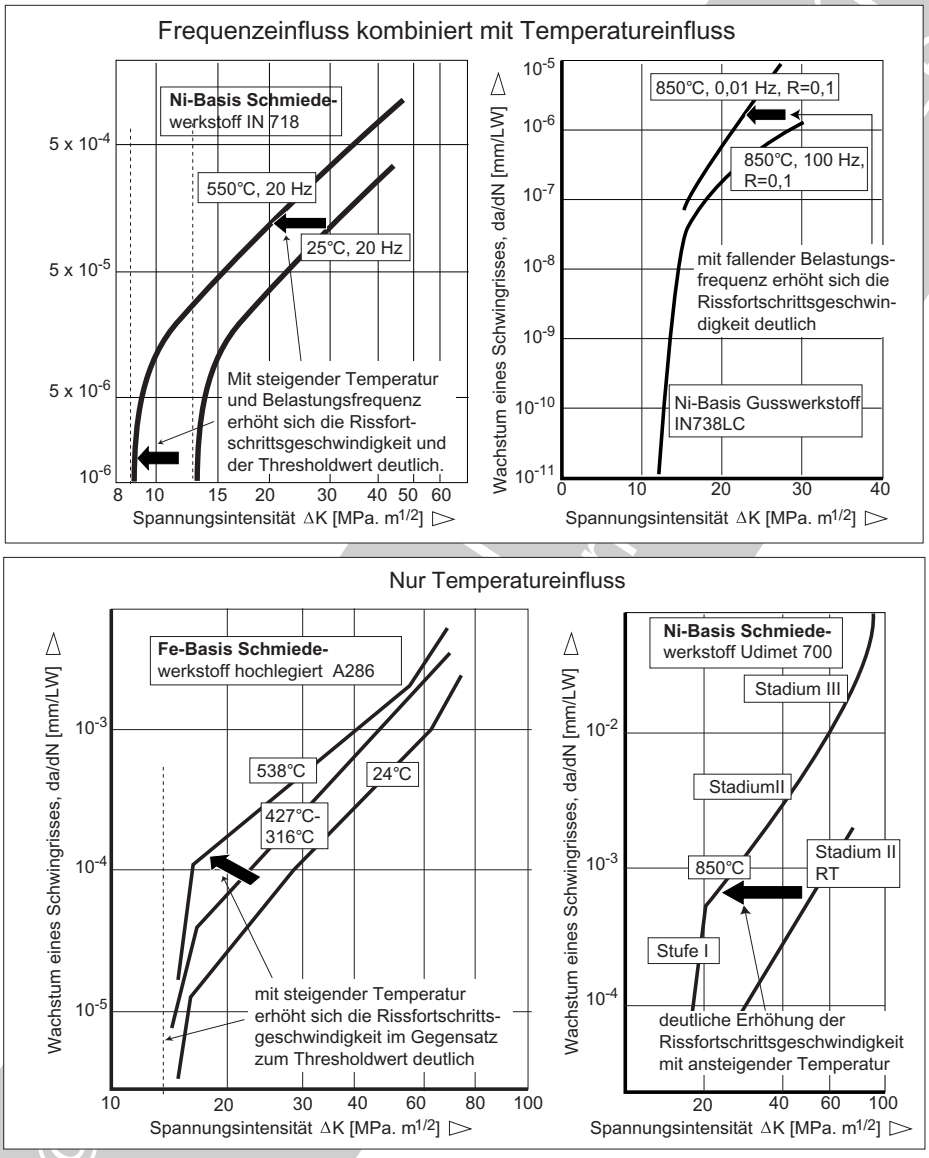


Bild 4.3-12

Bild 4.3-12 *(Lit4.3-16):Die* ***fortschrittsfähige Mindestfehlergröße*** *reagiert sensibel auf unterschiedliche* ***Einflüsse****. Die Paris-Diagramme (Bild 4.3-3) zeigen beispielhaft den Frequenz- und Temperatureinfluss auf das Rissverhalten unter dynamischer Beanspruchung.*

Frequenzeinfluss*: Der Schmiedewerkstoff IN 718, eine hochfeste Nickellegierung (Diagramm oben links) wird bei erhöhter Temperatur (550°C) und gleichbleibender Frequenz im Vergleich mit dem Verhalten gegenüber Fehlern bei 25°C deutlich empfindlicher. Der Thresholdwert (Spannungsintensität der Mindestfehlergröße) hat sich offenbar merklich verkleinert (Rissfortschritt bereits von kleineren Fehlern). Die Rissfortschrittsgeschwindigkeit liegt bei gleicher zyklischer Belastung um ein Mehrfaches höher (log. Auftragung!) als bei Raumtemperatur.*

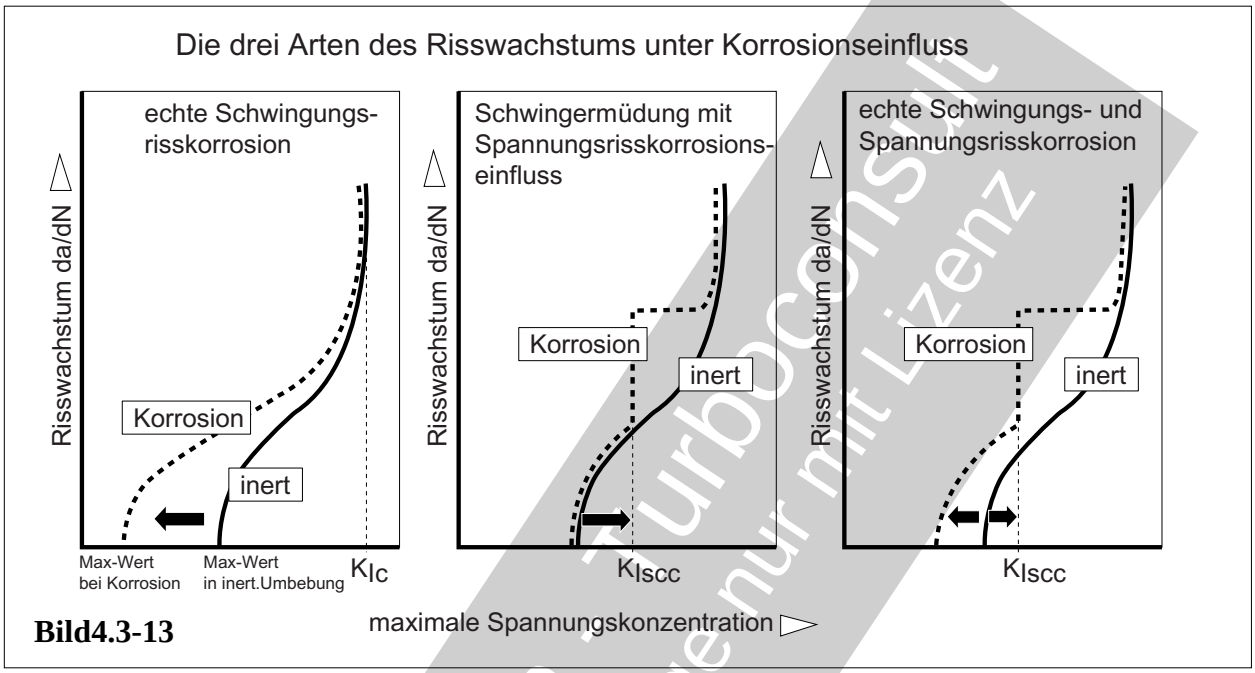


Bild4.3-13

*Der **Gusswerkstoff** IN 738LC (Diagramm oben rechts) kommt in den Turbinenrädern von Turboladern zum Einsatz. Er lässt bei niedrigerer Frequenz ein schnelleres Risswachstum pro Lastwechsel erkennen (Lit. 4.3-21 und Lit.4.3-22). Der Threshold scheint durch die Frequenz kaum beeinflusst. Der Frequenzeinfluss auf das Risswachstum dürfte als Folge der relativ hohen Temperatur von 850°C auf Kriechen zurückzuführen sein (siehe auch Bild 5.3.2-4).*

***Temperatureinfluss:** Der sehr verbreitete, aushärtbare Fe-Basis-Schmiedewerkstoff A286 (Diagramm unten links) zeigt einen deutlichen Anstieg der Rissfortschrittsgeschwindigkeit mit der Temperatur bei nahezu gleichbleibendem **Threshold**. Ein ähnliches Verhalten ist im Diagramm unten rechts für den Ni-Basis-Schmiedewerkstoff U700 zu erkennen. Die Prüftemperatur von 850°C erscheint jedoch oberhalb der üblichen Einsatztemperatur dieses Werkstoffs. Diese liegt eher bei 700°C. Der Knick in den Kurven zu einem langsameren Anstieg der Wachstumsgeschwindigkeit ist offenbar im Zusammenhang mit der Änderung des Fortschrittstadiums (Bild 4.3-6.1) zu sehen.*

***Bild 4.3-13** (Lit. 4.3-12): Die Diagramme zeigen den **Rissfortschritt** bei dynamischer und statischer Belastung **unter Korrosionseinfluss**. In allen Fällen erkennt man, dass in einer inerten Atmosphäre (kein Korrosionseinfluss) der Fortschritt kurzer Risse (niedrige Spannungskonzentration) langsamer als in Umgebungsatmosphäre sein kann (Bild 4.3-12, Lit. 4.3-16). Der Unterschied in der Rissfortschrittsgeschwindigkeit ist von der **Kombination aus Korrosionsart und Belastung** (dynamisch, statisch) abhängig. Bei Luftdrücken unter ca. 0,01 mbar scheinen atmosphärische Einflüsse zu verschwinden (Lit4.3-20). Die **Effekte verstärken sich mit niedrigerer Frequenz**. Welche Bestandteile der Atmosphäre wirksam sind scheint noch umstritten. Es verdichten sich aber die Hinweise, dass es nicht unbedingt der **Sauerstoff** ist, sondern **Wasserstoff der sich aus Wasserdampf** bildet. Ni-Legierungen dürften auf Sauerstoff (siehe auch Bild 5.3.1-0), Ti-Legierungen, Stähle und Al-Legierungen auf H_2O bzw. H_2 reagieren. Dies bedeutet:*

Die Ermittlung von Auslegungsdaten oder Lebensdauernachweise unter Schutzgas oder in zyklischen Schleuderständen** (Vakuum) **sind für korrosionsbeanspruchte Bauteile auf ihre Relevanz zu prüfen. Es besteht die Gefahr,

© A. Rossmann - Turboconsult
Lehrunterlage nur mit Lizenz

Kleine Risse können sich anders verhalten als große Risse. Sie sind bereits bei deutlich niedrigeren Spannungskonzentrationen wachstumsfähig.

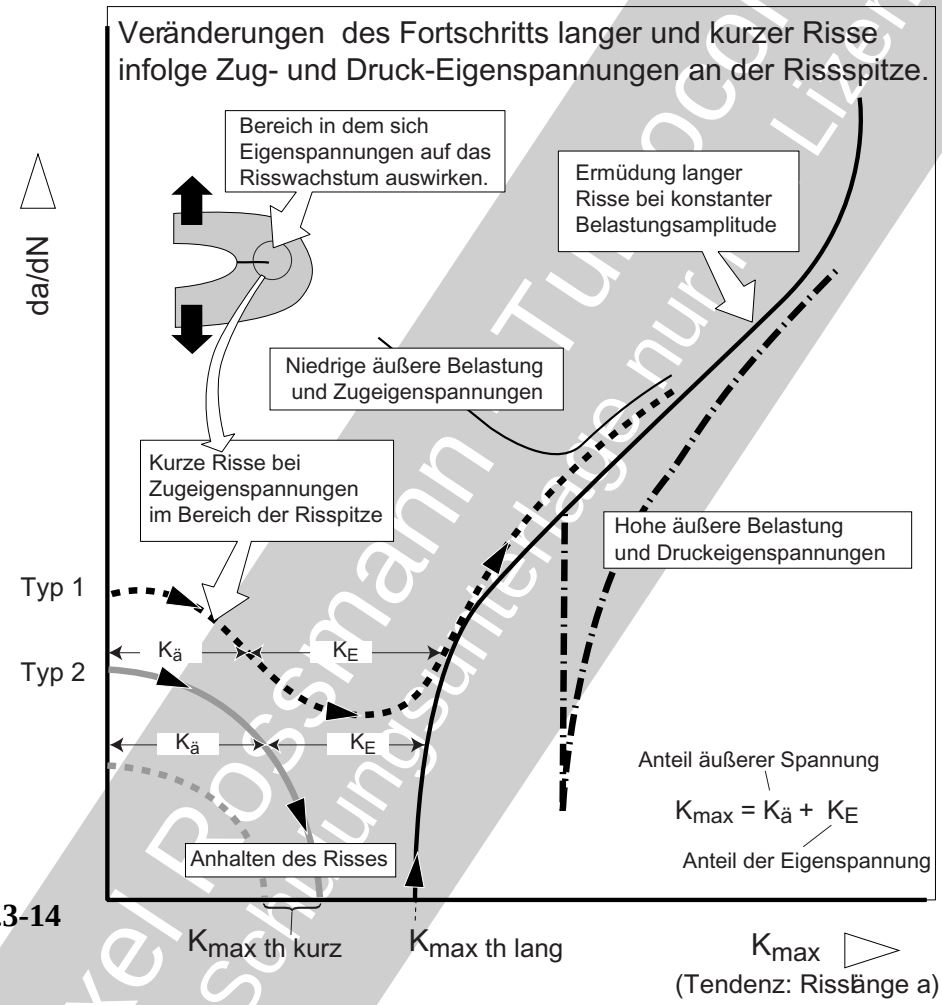


Bild 4.3-14

dass sich sonst zu lange Lebensdauern bzw. zu hohe Sicherheiten ergeben.

Bei Spannungsrisskorrosionseinfluss erkennt man einen Grenzwert $K_{ISCC,}$, ab dem die Rissfortschrittsgeschwindigkeit plötzlich sehr stark ansteigt. Dieser Effekt ist nur mit geeignet angerissenen Proben feststellbar.

Bild 4.3-14 *(Lit 4.3-12): Nicht nur die Amplitude der Spannungsintensität* $\Delta \boldsymbol{K}$ *beeinflusst den Rissfortschritt und begrenzt ihn mit* $\Delta \boldsymbol{K_{th}}$*. Bei Korrosionseinfluss sind* $\boldsymbol{K_{max}}$ *bzw.* $\boldsymbol{K_{max\ th}}$ *weitere Kriterien.* K_{max} *ergibt sich aus der Überlagerung der* ***Eigenspannungen*** *(II. Art, Bild 4.3-15) vor der Rissspitze und der äußeren Belastung. Im Bereich von* ***Kerben*** *wirkt die äußere Belastung über den* ***Spannungsgradienten****.*

Eigenspannungseinflüsse können unterschiedliche Ursachen haben wie:

- örtliche plastische Verformungen durch die äußere Belastung (Bild 4.3-6.2).

- Bearbeitung bzw. Behandlung der Oberfläche - Temperaturgradienten.

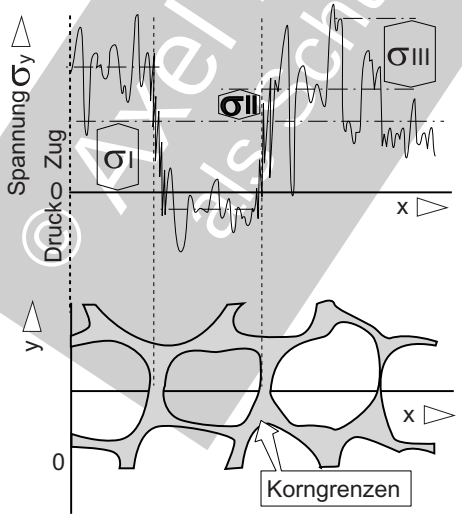
Auf ***„kurze Risse“*** *wirken sich verstärkt Effekte im Mikrobereich wie* ***Eigenspannungen***

© Axel Rossmann, TU Dortmund
als Schulungsunterlage nur für Lizenz

*und **Inhomogenitäten** (Bild 4.3-9) aus. Wegen der besonders an der Oberfläche vorhandenen Eigenspannungen spielt die **Risslänge** (bzw. Risstiefe) **eine wichtige** Rolle. Unter kurzen Rissen werden hier solche verstanden, deren **Größe der Gefügestruktur** (z.B. Korngröße, Bild 4.1-4 , Bild 4.3-9 und Bild 5.4.2.1-7), entspricht. **„Lange Risse“** dürften, entsprechend der definitionsgemäßen Sichtbarkeit, oberhalb des technischen Anrisses von 0,8 mm Länge an der Oberfläche liegen (Bild 3.2.1-1).*
Je nachdem, ob die Eigenspannungen das Risswachstum unterstützen oder behindern, wachsen die Mikrorisse zu Makrorissen wenn $K_{max\,th}$ überschritten wird. Bei Druckeigenspannungen können auch längere Risse nicht wachsen oder zeigen ein ungewöhnlich langsames Wachstum.
*Zusammengefasst **unterscheiden sich kurze und lange Risse** in folgenden Eigenschaften:*

- Bei kurzen Rissen gibt es keinen festen Grenzwert, ab dem das Risswachstum einsetzt (Bereich von $K_{max\,th\,kurz}$).

Definitionen die etwas Ordnung in die Eigenspannungen bringen.



(nach E.Macherauch et. al.)

Bild 4.3-15

- Kurze Risse wachsen bei Spannnungsintensitäten unterhalb des Grenzwerts langer Risse ($K_{max\,th\,lang}$).
- Das Wachstum kurzer Risse kann sich beschleunigen, verzögern oder ganz zum Stillstand kommen.
*- Bei großen Fortschrittsgeschwindigkeiten gehen kurze Risse kontinuierlich in lange Risse über. Dies ist dann der Fall **wenn Zugeigenspannungen vor der Rissspitze dazu führen, dass hier tatsächlich die Thresholdbedingungen langer Risse überschritten werden**.*
- Bei kleinen Rissen streuen die Fortschrittsdaten stark.
*- Lange Risse zeigen geringe Streuungen der Fortschrittsdaten und **einen einheitlichen Rissfortschritts-Grenzwert.***

***Bild 4.3-15** (Lit 4.3-15): Eigenspannungen lassen sich in drei Gruppen einteilen:*

***Eigenspannungen I. Art:** Sind über „größere flächige Werkstoffbereiche“ (mehrere Körner) nahezu homogen. Mit den Eigenspannungen in Zusammenhang stehende innere Kräfte und Momente befinden sich über dem ganzen Körper im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in dieses Gleichgewicht treten immer Maßänderungen (Verzug) auf.*

***Eigenspannungen II. Art:** Sind über kleine Werkstoffbereiche (ein Korn oder Kornbereiche) nahezu homogen. Die entsprechenden inneren Kräfte und Momente stehen über hinreichend viele Körner im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in dieses Gleichgewicht können makroskopische Maßänderungen auftreten.*

***Eigenspannungen III. Art:** Sind über kleine Werkstoffbereiche (mehrere Atomabstände) inhomogen. Die entsprechenden inneren Kräfte und Momente sind in kleinen Bereichen (Teile eines Korns) im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in das Gleichgewicht treten keine makroskopischen Maßänderungen auf.*

© Axel Hassmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Heißgaseinfluß auf den Fortschritt von Schwingermüdungsrissen bei typischen Turbinenschaufelwerkstoffen.

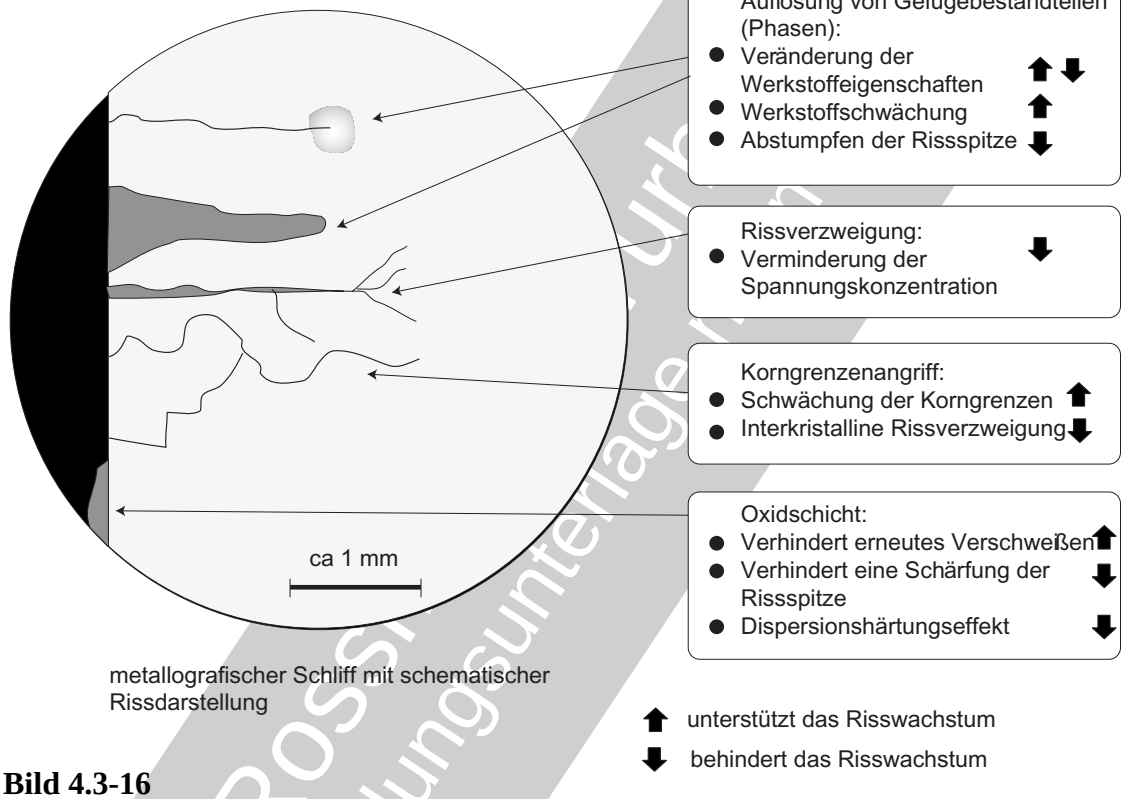


Bild 4.3-16

Bild 4.3-16: *Natürlich beeinflusst auch* ***Heißgas den Fortschritt von Rissen*** *die zur Atmosphäre hin offen sind (Bild 5.3.1-0 und Bild 5.3.2-5). Dies lässt gegebenenfalls der Rissverlauf im Gefüge erkennen (Lit 4.3-17). Eine Veränderung folgender Parameter wirkt sich besonders deutlich aus :*

- *Höhe und Dauer statischer Belastung*
- *Höhe und Zeit dynamischer Belastung*
- *Niveau und Gradient der Bauteiltemperatur*
- *Frequenz der Belastung*
- *Gefüge (Korngröße, Struktur)*
- *Schädigungen (z.B. Verarmung, Versprödung)*

Das Bild zeigt Tendenzen des ***Heißgas-Einflusses auf das Rissbild*** *nach der Einschätzung des Autors. Oxidation bzw. Heißgaskorrosion und* ***Rissfortschrittsgeschwindigkeit*** *beeinflussen sich gegenseitig. Eine langsame Rissfortschrittsgeschwindigkeit ermöglicht eine intensive Oxidation der Rissfläche, welche die* ***Rissspitze*** *ausrunden kann. Auf den Einfluss der Atmosphäre weist auch der deutliche Anstieg der Kriechdehnung unter Heißgaseinfluss im Vergleich zu ruhender Luft hin (Bild 5.3.2-5).*

Rissverlauf und Verzweigungen reagieren bei „Risskorrosionen“ unter niedrigen (wässrige Medien, Bild 5.6.3.1.1-6) und erhöhten Temperaturen (Titanlegierungen ab ca. 500 °C, Bild 5.6.3.1.1-7) ähnlich.

© Axel Rossmann Turbinenschaufelwerkstoffe als Schulungsunterlage

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten Anriss und Rissfortschritt

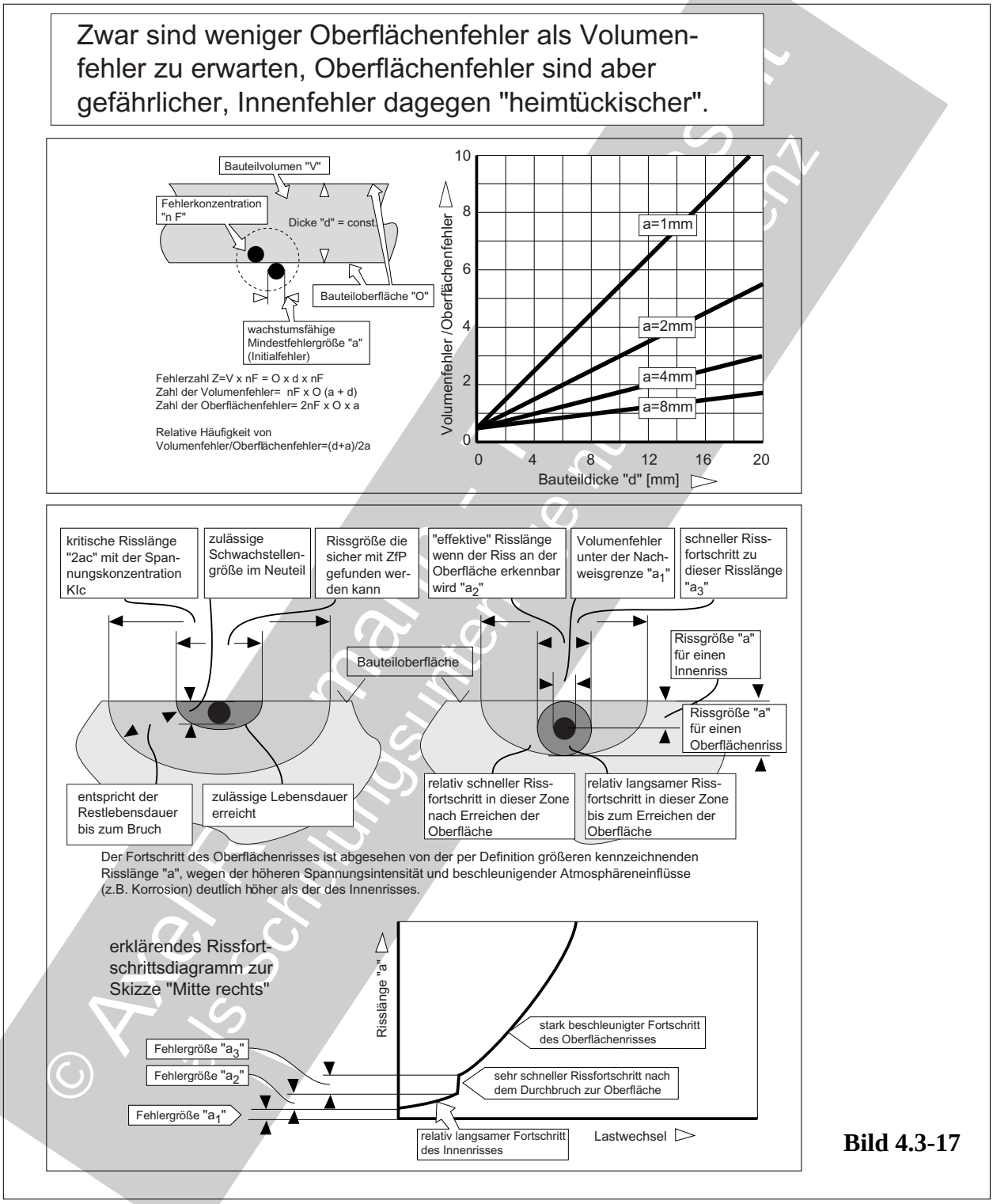


Bild 4.3-17

Bild 4.3-17: *Dicke* ***Querschnitte*** *haben bei gleicher* ***Fehlerverteilung*** *gegenüber dünnen Querschnitten, abhängig von der Fehlergröße, mehr* ***Volumenfehler*** *als* ***Oberflächenfehler*** *(Skizze oben). Oberflächenfehler sind jedoch bei gleichmäßiger Querschnittsbelastung (nicht nur bei Biegung) anrissgefährlicher als gleich große Volumenfehler. Dies liegt daran, dass die für den Rissfortschritt verantwortliche Spannungsintensität beim kreisförmigen, die Oberfläche berührenden Fehler, vom Durchmesser, beim Volumenfehler vom Radius, bestimmt wird (Skizze unten, Bild 4.3-4). Dadurch werden auch Fehlergrößen an*

der Oberfläche wachstumsfähig, die als Volumenfehler keine Rissbildung zeigen. Zusätzlich ist das Risswachstum, wie bereits beschrieben, am Oberflächenfehler von Beginn an höher als bei einem entsprechenden Volumenfehler.
Die untere Skizze rechts zeigt die kreisförmige Ausbreitung eines Volumenfehlers in einem gleichmäßig belasteten Querschnitt. Anfangs ist das Risswachstum des Volumenfehlers deutlich langsamer als das des Oberflächenfehlers. ***Ist der Volumenfehler bis zur Oberfläche gewachsen, nimmt die Spannungsintensität und damit das Risswachstum sprunghaft*** *(Diagramm unten)****, entsprechend der Quadratwurzel aus der wirksamen doppelten Risslänge, zu****. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Riss auf Grund seines bereits stattgefundenen Wachstums im Volumen deutlich größer als der Initialfehler ist. Wenn ein solcher Riss durch äußere Inspektionen erkennbar wird, ist er schon relativ groß und hat bereits eine entsprechend hohe Fortschrittsgeschwindigkeit. Dieses schnelle Risswachstum an der Oberfläche (Diagramm unten)* ***vermindert die Chance rechtzeitiger Erkennung und von Inspektionen.***

Bild 4.3-18 *(Lit. 4.3-21)****:*** *Ob sich Rissbildung und Rissfortschritt an der Oberfläche entwickeln oder im Volumen entstehen, kann von unterschiedlichen Bedingungen abhängen:*
- Oberflächenzustand: Unterschiede der Schwingfestigkeit von Oberfläche und Volumen, beispielsweise im Zusammenhang mit einer Verfestigung oder Beschichtung..
- Fehlerverteilung (Oberfläche, Volumen)
-Spannung/Belastung (z.B. Zug statt Biegung, Druck-Eigenspannungen an der Oberfläche, Bild 4.3-21).
- Dicker Querschnitt (flacher Spannungsgradient, Bild 4.3-19).

Oberfläche mit erhöhter Schwingfestigkeit *(Skizze oben): Diffusionsschichten (z.B. Nitrieren, Einsatzhärten) und/oder plastische Verfestigung (z.B. Kugelstrahlen, Rollen) kann die Festigkeit der Oberfläche deutlich steigern. Das kann dazu führen, dass unter dynamischer Biegeüberlastung ein Schwingbruch unter der Oberfläche startet und sich anfangs schneller in das Volumen ausbreitet (Bild 4.3-21), bis er nach außen durchbricht. Dann beschleunigt sich das Risswachstum an der Oberfläche abhängig von der Kerbempfindlichkeit der Oberflächenzone und entsprechend der Größe des bereits vorhandenen inneren Risses (Bild 4.3-17).*

Wärmespannungen *(Skizze unten links): Die Wand eines innen gekühlten, äußerlich aufgeheizten Bauteils wie z.B. von einer gekühlten Turbinenschaufel hat eine von außen abfallende Temperaturverteilung. Die hohe Außentemperatur sorgt außen für eine größere Wärmedehnung als innen. Die Verformungsbehinderung der Dehnung durch den kälteren innenliegenden Querschnitt führt außen zu Druckspannungen. Innen entstehen aus Gleichgewichtsgründen Zugspannungen. Dies begünstigt den Anriss im Bauteilinneren, z.B. an fertigungsbedingten Korngrenzenschädigungen im Bereich von Kühlluftbohrungen (Bild 5.4.2.1-9).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
Anriss und Rissfortschritt

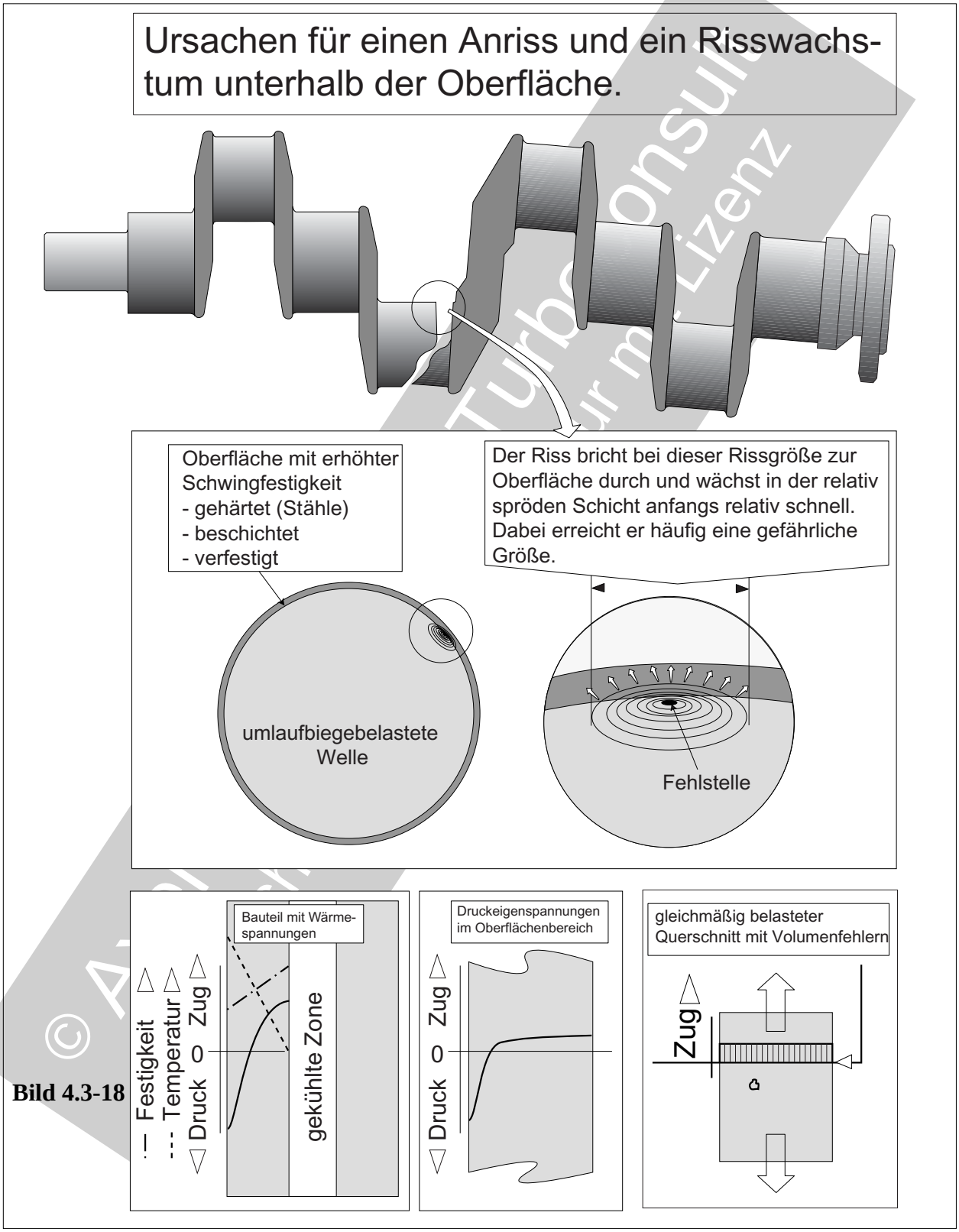


Bild 4.3-18

Druckeigenspannungen *(Skizze unten Mitte): Diese entstehen meist parallel mit einer Festigkeitssteigerung während eines Fertigungsverfahrens (z.B. bei der Zerspanung), gezielt durch einen Beschichtungs- (z.B. Einsatzhärten) oder Verfestigungsprozess (z.B. Kugelstrahlen). Diese Druckspannungen reduzieren durch Überlagerung mit den Spannun-*

Die Dicke eines biegebelasteten Querschnitts beeinflusst die Auswirkung von Oberflächen- und Volumenfehlern.

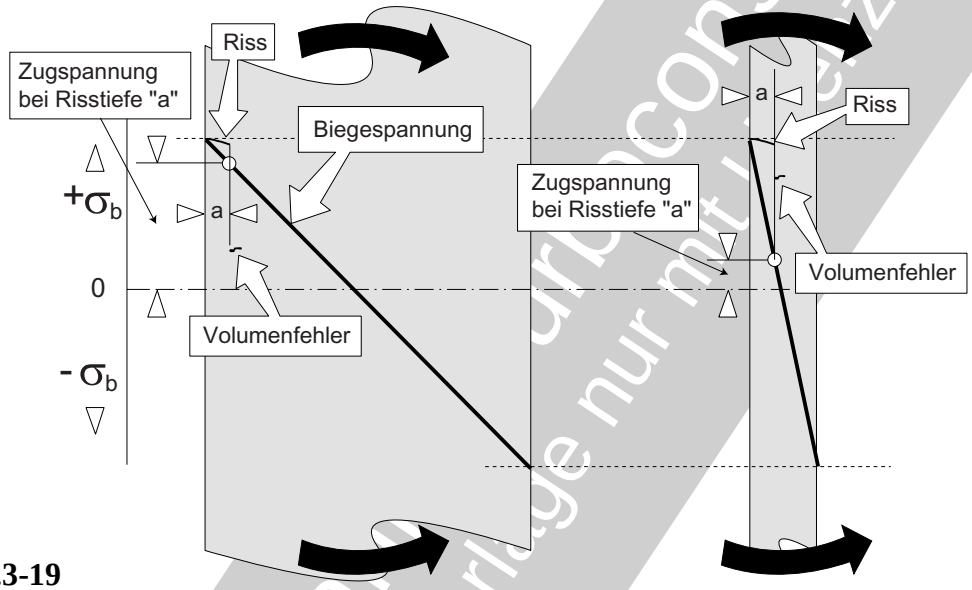


Bild 4.3-19

gen der äußeren Belastung gefährliche oberflächennahe Zugspannungsspitzen und senken hier die Mittelspannung ab. Weil dieser Effekt kaum in das Volumen hineinwirkt, werden nun nicht Oberflächenfehler sondern oberflächennahe Fehler im Volumen zu Anrissauslösern.

Volumenfehler *(Skizze unten rechts):Es gibt durchaus Fälle, bei denen nicht die Oberfläche fehleranfällig ist, sondern der (innere) Querschnitt. Typisches Beispiel sind Feingussteile mit einer dünnen feinkörnigen und lunkerfreien Oberflächenzone aber erstarrungsbedingten Lunkerfeldern in dickeren Querschnitten (fehlende Restschmelze). Wird ein solches Bauteil gleichmäßig oder mit einem ausreichend flachen Spannungsgradienten dynamisch belastet, können die Lunker als wahrscheinliche Anrissstelle gelten. Typisches Beispiel ist der dicke Nabenbereich eines gegossenen Turboladerrades.*

Bild 4.3-19: *Bei* ***Biegung*** *wird der Spannungsgradient mit abnehmendem Querschnitt flacher. Das beeinflusst die Reaktion auf Fehler deutlich.*

- ***Volumenfehler*** *gewinnen an Bedeutung gegenüber Oberflächenfehlern (siehe auch Bild 4.3-17). Dies bedeutet, dass bei einem dickeren Querschnitt mehr Volumenfehler noch hohen Spannungen unterworfen sind und zur Anrissbildung neigen. Bei einem dünnen Querschnitt ist die Spannung bereits dicht unter der Oberfläche stark abgefallen.*

- ***Risswachstum*** *im Querschnitt nimmt zu: Der flache Spannungsgradient des dickeren Querschnitts führt zu schneller beschleunigendem Fortschritt des wachsenden Risses (Bild 4.3-11).*

- Der vor Schwingermüdung schützende Einfluss oberflächennaher ***Verfestigung und Druckeigenspannungen*** *nimmt in dickeren Querschnitten mit der Tiefe schneller ab. Damit wird die Wirksamkeit von Verfahren wie Kugelstrahlen geschwächt. Es kommt leichter zu Anrissen unter der Oberfläche (engl. sub surface cracks, Bild 4.3-18 und 4.3-21).*

© Axel Rossmann Turbocons
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
Anriss und Rissfortschritt

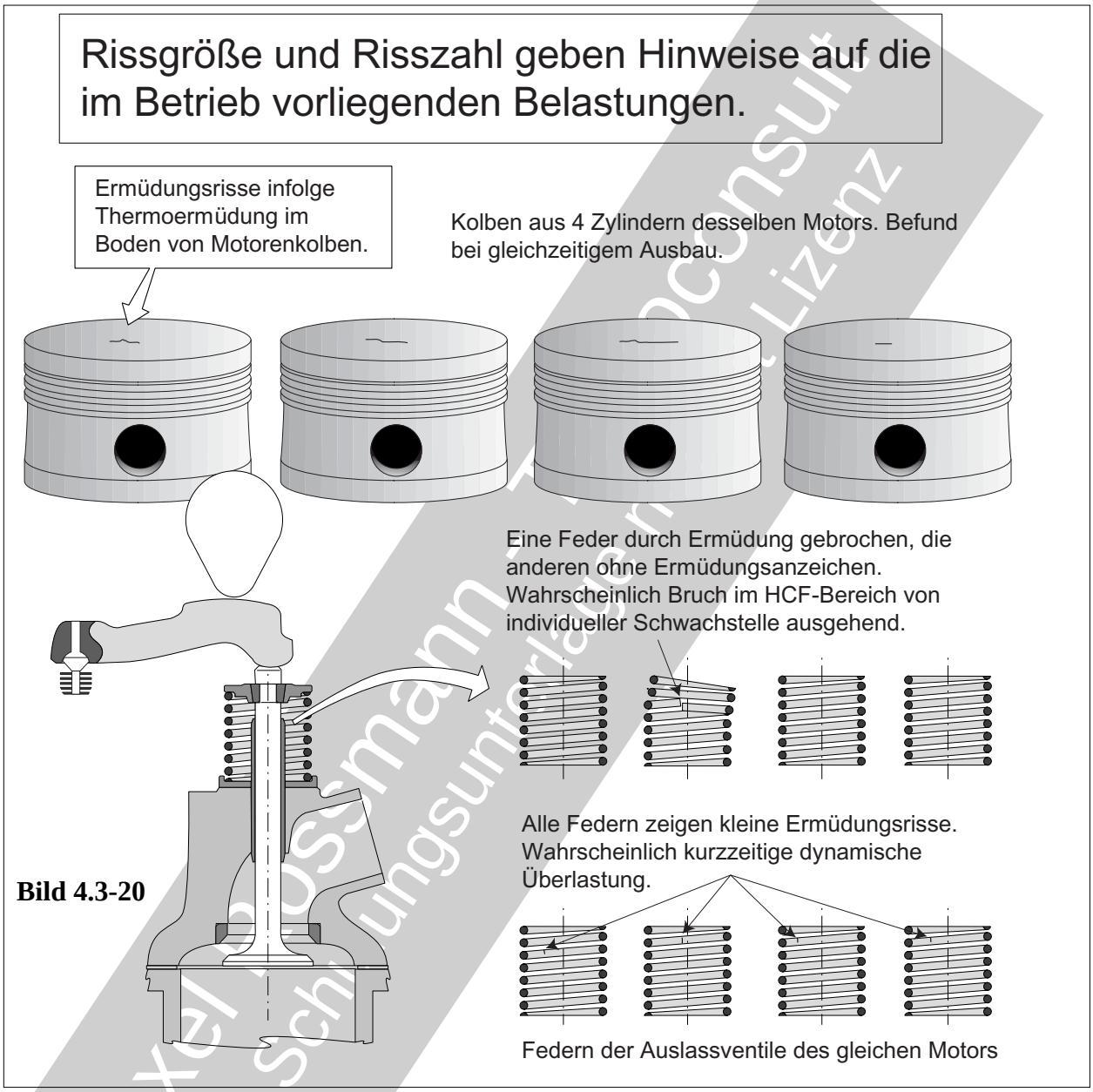


Bild 4.3-20

Bild 4.3-20: *Der makroskopische äußere Befund einer Rissbildung an mehreren verschiedenen, gleichen oder ähnlichen Bauteilen kann etwas über den* ***Zeitpunkt und die Höhe der schadensauslösenden dynamischen Beanspruchung*** *aussagen.*

Schwingermüdung im HCF-Bereich: *Ein typisches Beispiel sind Risse und/oder Brüche an Federn (Skizze unten rechts, Lit. 4.3-23).*

Wenn ***mehrere gleiche Bauteile*** *(z.B. Schaufeln einer Stufe einer Turbomaschine)* ***angerissen*** *sind, kann dies unterschiedliche Ursachen haben:*

Gewöhnlich ist dies ein deutliches Zeichen für eine derart hohe Beanspruchung, dass an allen Bauteilen nahezu gleichzeitig ein Anriss erfolgte (Bild 4.3-21). Diese Beanspruchung kann zum Zeitpunkt des Anrisses kurzzeitig im LCF-Bereich gelegen haben, der Rissfortschritt erfolgte jedoch unter HCF-Bedingungen bei deutlich niedrigerer Beanspruchung. Denkbar ist die kurzzeitige Fehlfunktion der Regelung als Folge einer Stoßbelastung oder eines Anstreifvorgangs..

Ist die Spannungsverteilung, z. B. die Schwingform (Knotenlinienverlauf) so, dass der Riss

© Axel Bossmann - Ingenieurconsult
Alle Schulungsunterlagen mit Lizenz

in ein dynamisch und statisch ausreichend niedriges Spannungsniveau verläuft, kann der Riss ebenfalls zum Stillstand kommen und mehrere Teile anreißen. Dies sollte aber mit einer mikroskopischen Bruchflächenanalyse erkennbar sein (Bild 2.2.2.4-3 und Bild 4.4-3).

Rissbildung und Risswachstum können zum ausreichenden Abbau der dynamischen Beanspruchung und einem Rissstillstand führen. Gründe sind die ***Dämpfung infolge Reibung der Rissufer*** *und/oder der* ***Frequenzabfall*** *(Querschnittsschwächung) mit dem* ***Austritt aus der Resonanz****.*

Ist die ***Risslage*** *überall ähnlich, unterstützt dies die Vermutung, dass als Hauptanrissursache ein* ***diskreter Fehler*** *(z.B. Riefe oder Festigkeitsabfall, z.B. durch einen Schweißspritzer)* ***ausscheidet****. Weisen die Risse eine systematische bzw.* ***periodische Verteilung, z.B. an Schaufeln am Umfang*** *eines Rotors auf, kann dies Hinweis auf den Schwingmodus sein (Bild 5.4.3.1-4 und Bild 5.4.3.1-6). Damit besteht die Möglichkeit, einen Resonanzfall zu erkennen und gezielte Maßnahmen einzuleiten.*

Falls Bauteile wie Schaufeln unterschiedlicher Stufen mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen Rissbildung zeigen, ist eine Resonanz weniger wahrscheinlich. In einem solchen Fall ist eher von einer gewaltsam angeregten Schwingung (z.B. von Pumpstößen „angestoßen“) auszugehen.

Schwingermüdung im LCF-Bereich: *Typisches Beispiel sind* ***Risse*** *in Kolbenböden (Skizzen oben). Zeigen ein oder mehrere Bauteile Risse in vergleichbarer Länge, ist zu vermuten, dass es sich um Thermoermüdungsrisse handelt. Deren Fortschritt hat sich mit der Risslänge deutlich verlangsamt oder ist zum Stillstand gekommen (Bild 4.3-11 und Bild 4.3-18). Eine derartige Rissbildung ermöglicht die* ***Überwachung und „Beherrschung“ der Rissbildung*** *(Bild 4.3-22). LCF Risse treten wegen der hohen Belastung (im plastischen Bereich) im Gegensatz zu HCF-Rissen oft an mehreren gleichen Teilen einer Maschine gleichzeitig auf (Bild 4.3-21).*

Bild 4.3-21: *Typisch für die hohe kurzzeitige dynamische Beanspruchung (in diesem Fall LCF und hochfrequent!) eines Zahnrads sind* ***mehrere angerissene Zähne*** *.*

Nicht nur das äußere Schadensbild sondern auch die ***Auswertung der Riss- bzw. Bruchfläche*** *(Bild 4.4-2 und Bild 4.4-3) lassen wichtige Rückschlüsse auf Schadensursachen und -ablauf zu. Hierfür ist eine makroskopische und elektronenmikroskopische (REM, Bild 2.2.2.4-3) Untersuchung anzuraten.*

Makroskopische Untersuchung *mit unbewaffnetem Auge und Binokular: Bruchflächen mit ähnlichen Schwingbruchgrößen bzw. Risslängen (Skizzen unten links) sprechen für eine, zu einem besonderen Zeitpunkt* ***hohe dynamische Überlastung*** *(wahrscheinlich im LCF-Belastungsbereich, Bild 5.4-1). Gehen die Risse von Schwachstellen aus, die innerhalb der Bauteilspezifikationen liegen (z.B. Bearbeitungsriefen oder Erosionskerben) und haben sie gleiche Anrisslagen am Bauteil, unterstützt dies die Annahme hoher dynamischer Überlastung (Bild 4.3-20).*

Vergleichbare ***Rastlinienmuster*** *erhärten den Verdacht eines gleichzeitigen Anrisses (Detail unten links). Unter Umständen lässt sich die Schadensentstehung mit einer Auswertung der Rastlinienabstände und -breiten am Schwingbruchende (letzter Verlauf der Schwingriss-Spitze) und einem Vergleich der Risse zeitlich zurückverfolgen. Eine übereinstimmende Rastlinienbildung lässt die Annahme zu, dass alle Bauteile zum gleichen Zeitpunkt dynamisch überlastet wurden. Zahl und Verteilung der Rastlinien lassen auf Zeitpunkt und Ursache des Anrisses schließen (z.B. Anstreifvorgang, Strömungsstörung, Unwuchten)*

Elektronenmikroskopische Untersuchung *(REM, Bild 2.2.2.4-3): Mit diesem Gerät ist gegebenenfalls eine Auswertung von Rissfortschrittslinien (engl. striations) möglich (Detail unten rechts). Jede dieser Linien entspricht einem Lastwechsel (Bild 4.3-6.2). Gelingt die Auswertung, sind sowohl die Lastwechselzahl für den gesamten Rissfortschritt, als auch die*

© Axel Rossmann - Turbo-Consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten Anriss und Rissfortschritt

Der Rissfortschritt kann viel über die schadensursächlichen Einflüsse aussagen.

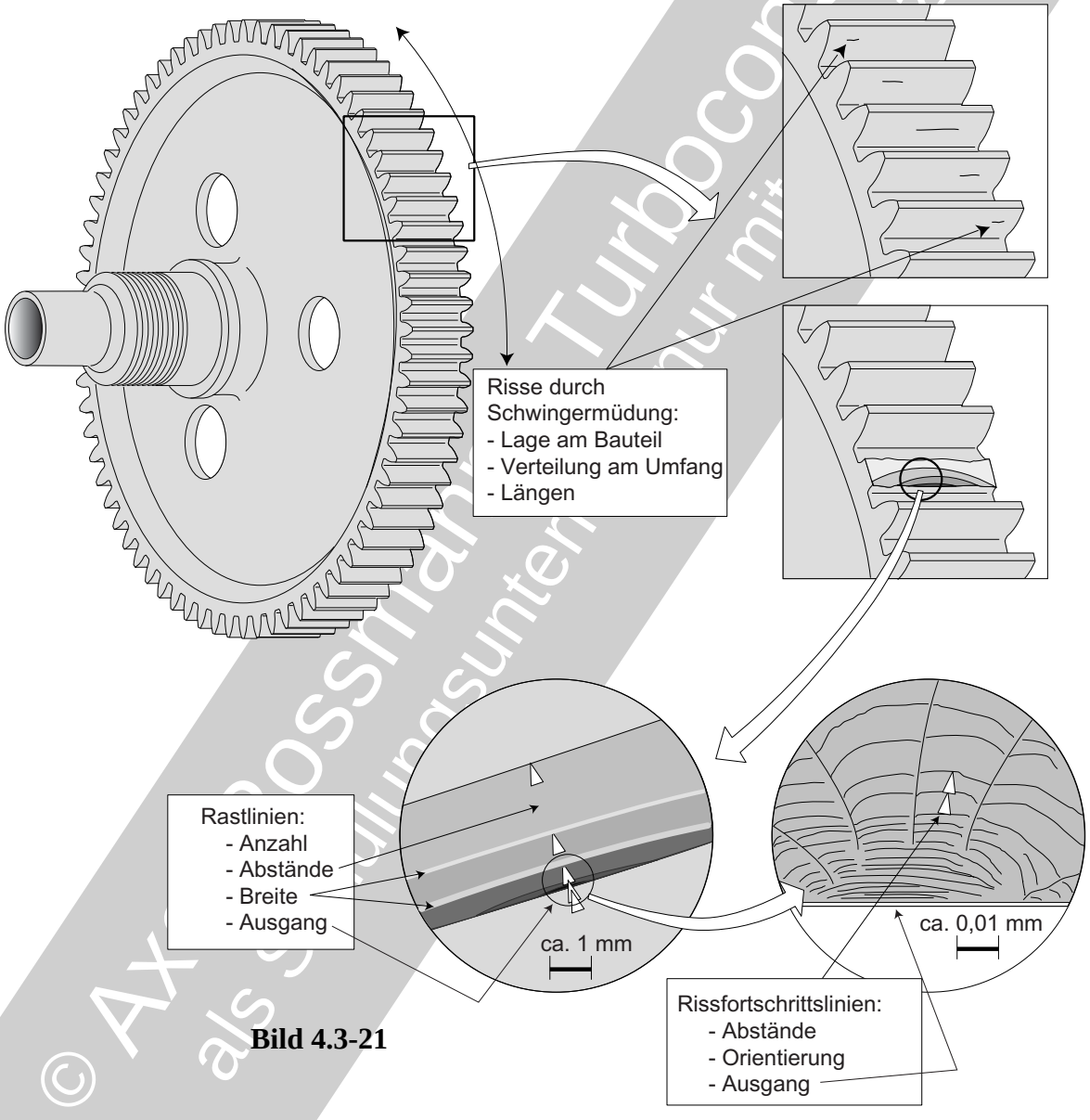


Bild 4.3-21

Lastwechselzahlen bei bestimmten, den Rastlinien zuordenbaren Ereignissen abschätzbar. Aus dem Striation-Abstand können direkt die zugehörigen Rissfortschrittsgeschwindigkeiten ($\Delta a/\Delta N$) bestimmt werden. Damit wird eine ***Abschätzung der dynamischen Beanspruchung während des Rissfortschritts*** *möglich, wenn für den fraglichen Werkstoff ein „Paris-Diagramm“ (Bild 4.3-3) vorliegt. Leider nicht möglich ist eine gesicherte* ***Aussage über die dynamische Beanspruchung während der Schädigungsphase*** *(Inkubation) bevor sich der Makroanriss bildete. Die Auswertung des Striation „Musters“ (Lit. 4.3-10) lässt den Anrissbereich eindeutig identifizieren und damit gewöhnlich auch die den Anriss auslösende Schwachstelle bzw. den Fehler.*

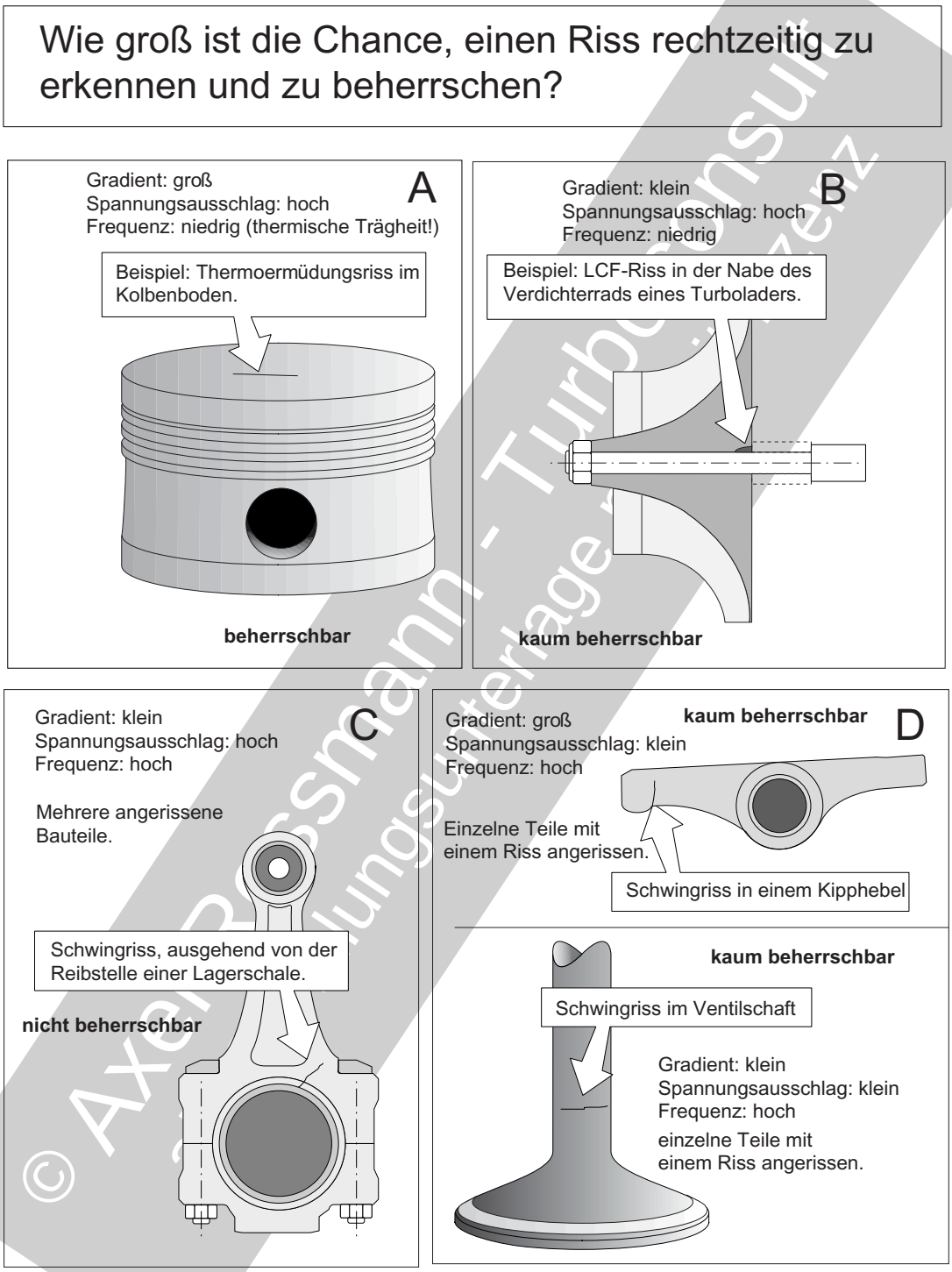


Bild 4.3-22

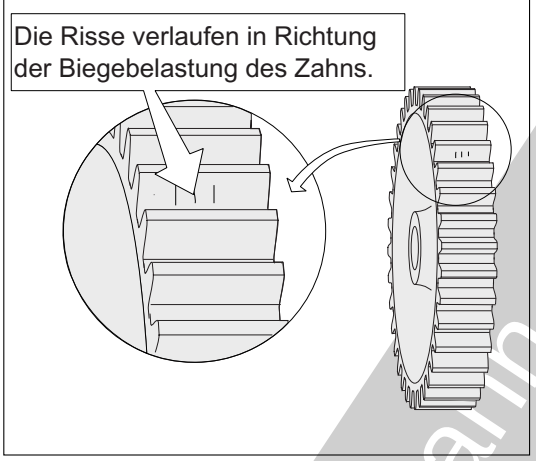
Bild 4.3-22 *(Lit. 4.3-21**:** Die* ***Abschätzung des Risikos*** *einer ganzen betroffenen Flotte gleicher Maschinen bei akuten Schadensfällen ist von großer Bedeutung für einzuleitende Maßnahmen bzw. zur Risikominimierung. Hierzu gehört die Identifikation betroffener Bauteile, die* ***Festlegung von Inspektionsintervallen****, die Definition der anzuwendenden Verfahren und die Erarbeitung bzw. Einleitung von Abhilfen. Für dieses Vorgehen muss die Chance abgeschätzt werden, den Anriss rechzeitig vor dem Versagen des Bauteils (meist dem Bruch)*

© Axel Rossmann - Turbosonsult
Bildungsunterlage Prüfzeitz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten
Anriss und Rissfortschritt

Die Risslage zur Beanspruchungsrichtung bestimmt entscheidend die Gefährlichkeit.

Schleifrisse in der Flanke eines Zahnrads



Warmrissbildung neben der Reibschweißung des Turbinenrads eines Turboladers aus einer Ni-Guss-Legierung.

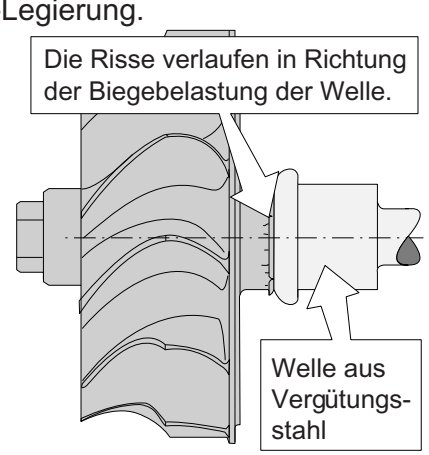


Bild 4.3-23

abzufangen *(Bild 4.3-24). Das ermöglicht den Austausch des schadhaften Bauteils. In den Skizzen* ***A,B,C*** *und* ***D*** *sind dem Risiko eines Bruchs, trotz einer Rissüberwachung typische Belastungsmerkmale, zugeordnet.*

Kriterien:

- ***Spannungsgradient*** *(siehe Bild 4.3-11)*
- ***Spannungsausschlag*** *(LCF, HCF, siehe Bild 5.4-1)*
- ***Mittelspannung***
- ***Spannungskonzentration*** *(Einfluss vorhandener Kerben und Anrisse).*
- ***Risszähigkeit*** *des Werkstoffs (Bild 4.3-4 und Bild 4.3-8)*
- ***Belastungsfrequenz****: Bei hohen Frequenzen wird in kürzester Zeit (z.B. Sekunden) infolge der vielen Lastwechsel sehr viel Schädigung akkumuliert und das zeitliche Risswachstum unkontrollierbar.*

*Im Fall des Kolbens eines Verbrennungsmotors („****A****“) ist für die Thermoermüdung nicht jede einzelne Zündung entscheidend. Auf Grund der thermischen Trägheit wirken sich lediglich Start-/Abstellzyklen und größere Leistungsänderungen aus. Damit ist die Belastungsfrequenz relativ niedrig (Bild 5.4.1.2-3)*

- ***Zahl der angerissenen Bauteile*** *(siehe Bild 4.3-20 und Bild 4.3-21).*
- ***Erfahrungen*** *mit schadensrelevanten Bauteilen.*

Bild 4.3-23: *Es ist leicht einzusehen, dass die Lage des Risses zur* ***schadensrelevanten Beanspruchungsrichtung*** *für ein Risswachstum von großer Bedeutung ist. Bei einer günstigen Risslage zur* ***Hauptbeanspruchungsrichtung*** *kann erfahrungsgemäß die Betriebssicherheit durchaus gegeben sein. Ein Beispiel ist ein quer zur Zahnflanke verlaufender Schleifriss (Skizze links). Ein solcher Riss verläuft parallel zur Spannung durch die Hauptbeanspruchung (Zahnbiegung).*

Die rechte Skizze zeigt Warmrisse in einer Reibschweißung. Diese laufen in Richtung der Wellenachse. Sie sind sowohl längs- (Biegung) als auch querbelastet (Fliehkraft, Wärmespannungen, Torsion). Die Erfahrung zeigt, dass

© Axel Rossmann Ingenieurbüro für Schulungsinhalte

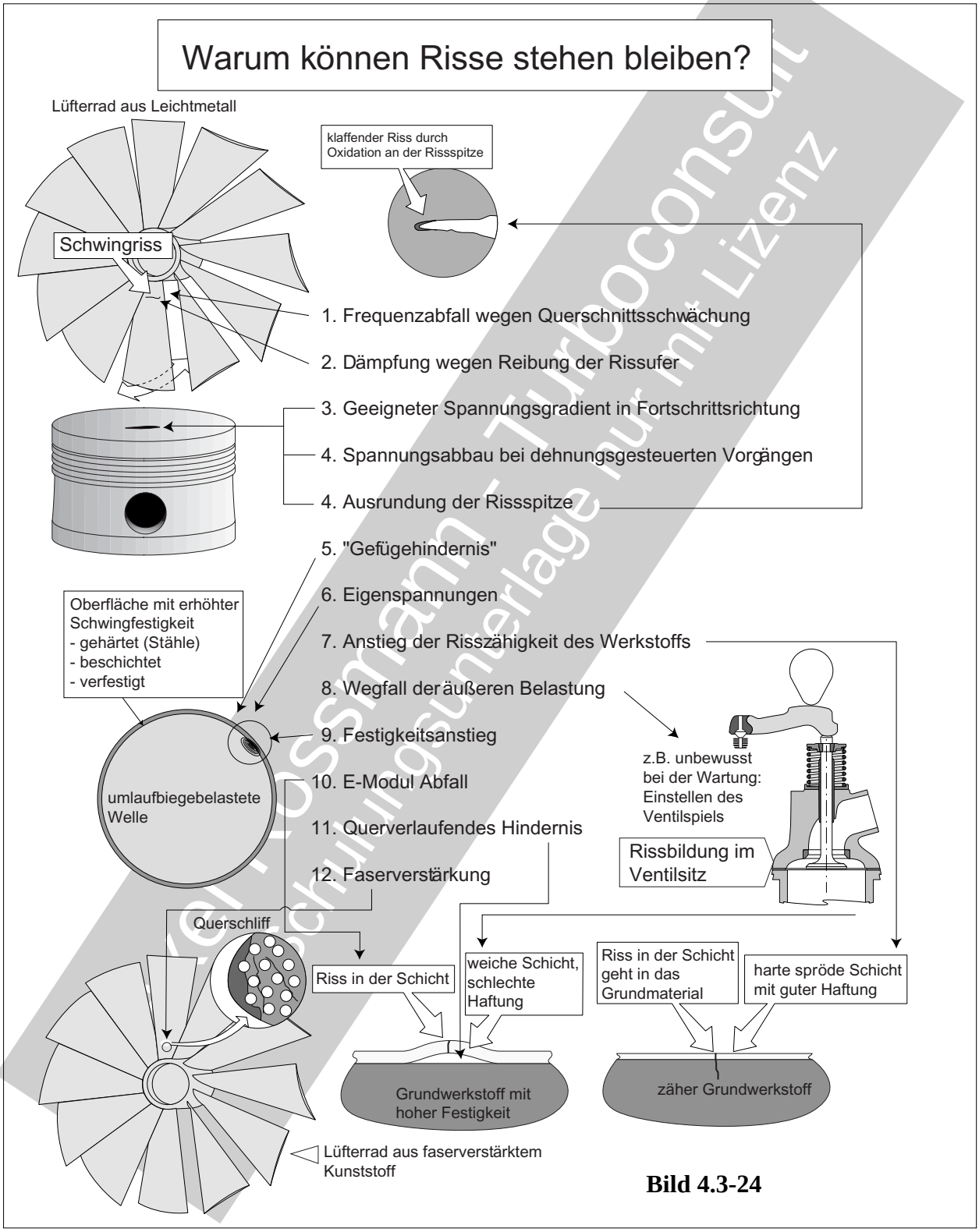


Bild 4.3-24

Kei Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

unter den Betriebsbedingungen mit ausreichender Sicherheit ***kein Risswachstum*** *auftritt. Damit sind die Risse als* ***bauteiltypische Schwachstelle*** *einzustufen und entsprechend in die Vorschriften aufzunehmen.*

Bild 4.3-24: *Gewöhnlich führt die Schwächung des tragenden Querschnitts und die Kerbwirkung eines Risses zum beschleunigten Risswachstum. Es gibt jedoch einige Ausnahmen bei denen der* ***Rissfortschritt sich verzögert***

*oder der **Riss ganz zum Stehen** kommt. Einige dieser Ausnahmen sollen im Folgenden dargestellt werden:*

***„1“**: Die Querschnittsschwächung führt zu einem Anstieg der elastischen Nachgiebigkeit des Bauteils. Dadurch fällt die **Eigenfrequenz** der Schwingform, die den Riss ursächlich bedingt, ab. Ist der Frequenzunterschied zwischen Anregung und Schwingfrequenz ausreichend groß, kommt das Bauteil gegebenfalls aus einer **Resonanz** und die Schwingbelastung fällt deutlich ab.*

***„2“**: Bei der Schwingung bewegen sich die zumindest im Mikrobereich gezackten Rissufer gegeneinander. Entsteht dabei ausreichend Reibung, wirkt diese auf die Schwingung **dämpfend,** wobei die Schwingbelastung absinkt.*

***„3“**: Liegt ein steil abfallender **Zugspannungsgradient** (Spannungsgradient, siehe Bild 4.3-11) in Rissfortschrittsrichtung vor oder wird eine Druckspannungszone erreicht, fällt die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ab (Bild 4.3-3). Unterhalb des sog. Threshold der Spannungskonzentration kommt der Riss zum Stehen. Solche Spannungsgradienten bilden sich unter dem Einfluss von Wärmespannungen (Bild 5.4.2.1-2). Auch Druckeigenspannungen können auf einen Riss abbremsend wirken.*

***„4“**: Hat ein Riss bereits eine sehr niedrige Fortschrittsgeschwindigkeit (z.B. bei Thermoermüdung), kann die **Oxidation** zur Ausrundung der Rissspitze führen (Bild 4.3-16) und damit die Spannungskonzentration so weit absenken, dass der Riss zum Stehen kommt.*

***„5“**: **Gefügeinhomogenitäten** können das Risswachstum verzögern. Ein typischer Fall sind faserverstärkte Werkstoffe (FVK, KFK, Bild 3-11). Für einen **Rissstopper-Effekt** darf die Faser nicht zu fest mit der Matrix verbunden sein, um ein Durchlaufen der Risse von der Matrix in die Faser zu verhindern.*

***„6“**: Wie bereits in „4“ erwähnt, können **Druckeigenspannungen** die Spannungskonzentration beim Rissfortschritt so weit absenken, dass es zumindest zeitweilig zum Rissstillstand kommt. Solche Eigenspannungen sind in oberflächengehärteten (Einsatzhärten, Nitrieren) Stahlteilen (Bild 4.3-18) zu erwarten. Dabei kann sich ein Riss im **Querschnittsinneren** bilden und nach außen hin sehr viel langsamer wachsen als in den Querschnitt.*

***„7“**: Steigt die **Risszähigkeit** des Werkstoffs vor der Rissspitze deutlich an, dass sie über der herrschenden Spannungskonzentration liegt, kommt der Riss zum Stillstand. Ein solcher Fall ist z.B. bei sehr **dünnen spröden Schichten** auf einem zähen Werkstoff gegeben. Die kurzen Risse in der dünnen Schicht weisen eine relativ niedrige Spannungskonzentration auf. Typisches Beispiel sind Diffusionsschichten auf Nickellegierungen. Hierzu gehören auch **hartverchromte Bauteile** deren Chromschicht gewöhnlich Risse aufweist, die jedoch bei ausreichend niedriger Schwingbeanspruchung nicht in den Grundwerkstoff wachsen. Ein zusätzlicher Effekt wird mit dem Einbringen von Druckspannungen durch Kugelstrahlen erreicht.*

***„8“**: Ist die für das Risswachstum notwendige Beanspruchung ausreichend kurz und der Riss noch nicht so weit gewachsen, dass er unter den normalen Betriebsspannungen weiter wächst, kommt es zum Rissstillstand. Solche Bedingungen können bei Anstreifvorgängen und Pumpstößen auftreten.*

***„9“**: Steigt die **Festigkeit eines zähen Werkstoffs** vor der Rissspitze stark an, wie dies z.B. bei Wärmedämmschichten auf Nickellegierungen der Fall ist, bleiben Risse in der Wärmedämmschicht und verlaufen nicht in den Grundwerkstoff (Segmentierungsrisse). Dieses Verhalten ist eine Voraussetzung für die Funktion **keramischer Wärmedämmschichten**.*

© Ayelt Komanns Turbomaschinen
Unterlagen nicht zitierfähig

***„10“**: Wächst der Riss von einem Werkstoff mit hohem **E-Modul** in einen mit deutlich niedrigerem E-Modul so ist bei konstanter Dehnung über den Querschnitt mit einem entsprechenden Spannungsabbau und mit einer Rissverzögerung zu rechnen.*

***„11“**: Quer zur Rissfortschrittsrichtung verlaufende Inhomogenitäten wie Risse oder **Zonen geringer Haftfestigkeit** können den Riss ablenken oder zum Stillstand bringen. Solche Schwachstellen sind bei schlecht haftenden Schichten oder weichen Lötungen zu erwarten.*

***„12“:** Faserverstärkte Werkstoffe können durch **Delamination die Dämpfung** deutlich erhöhen und so die Schwingbeanspruchung entscheidend vermindern (Bild 3-11). In vielen Fällen kommt es dabei nicht zum Bruch der Fasern, sodass eine **hohe Restfestigkeit erhalten bleibt**.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur 4.3

4.3-1 K. Heckel, „Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik“, Carl Hanser Verlag, München 1970.

4.3-2 W. Schmidt, „Die Beurteilung des Bruchverhaltens von Stählen höherer Festigkeit mit Hilfe der Bruchmechanik“, TEW-Technische Berichte, 1.Band 1975, Heft 1 Seite 39-55.

4.3-3 H.Leis, W. Schütz, „Bewertung neuer Flugzeugbauwerkstoffe mit den Methoden der Bruchmechanik“, Zeitschrift „LRT 16“ Nr. 10, Oktober1970, Seite 247-251.

4.3-4 D. Schütz, „Derzeitiger Stand der Lebensdauervorhersage für Bauteile“, „Zeitschrift für Werkstofftechnik“ Nr. 9, 1978 3, Seite 77-85.

4.3-5 W. Schütz, „Lebensdauer-Berechnung bei Beanspruchungen mit beliebigen Last-Zeit-Funktionen“, VDI-Berichte Nr. 268, 1976, Seite 113-125.

4.3-6 H. Zenner, „Niedrig-Lastwechsel-Ermüdung (low cycle fatigue)“, VDI-Berichte Nr. 268, 1976, Seite 101-111.

4.3-7 J.P. Gallagher, „Estimating Fatigue-crack Lives for Aircraft: Techniques“, Proceedings Paper des „SESA Spring Meeting“, Chicago IL., May 11-16, 1975, Seite 113-125.

4.3-8.1 E. Macherauch, „Grundprinzipien der Bruchmechanik“, Paper der Werkstoffprüftagung, „Gefüge und Bruch“, Leoben 25/28 November, 1976, Seite 3-36.

4.3-8.2 E. Macherauch, P. Mayr, „Strukturmechanische Grundlagen der Ermüdung metallischer Werkstoffe“, VDI-Berichte 268, 1976, Seite 5-18.

4.3-8.3 E. Macherauch, O. Vöhringer, „Das Verhalten metallischer Werkstoffe unter mechanischer Beanspruchung“, Zeitschrift „Werkstofftechnik“, 9, 1978, Seite 370-391.

4.3-9 L.Engel, H. Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, ISBN 3-446-13416-6, 2. Auflage, Gerling Institut für Schadensforschung und Schadensverhütung GmbH, Köln, 1982, Seite 62, 63, 73-75, 81- 95.

4.3-10 D.W. Hoeppner, P.E. Cockburn, „Parameters that Input to Application of Damage Tolerance Concepts to Critical Engine Components“, Proceedings Paper AGARD-CP-393, der Konferenz „Damage Tolerance Concepts for Critical Engine Components“ Seite 4-1bis 4-16.

4.3-11 J.K. Gregory, Beitrag zum DGM-Workshop „Titan“, München, 30.-31.3.2000.

4.3-12 A.K. Vasudevan, K Sadananda, „Environmental Effects on Fatigue Crack Initiation and Growth“, RTO Meeting Proceedings 18, „Fatigue in the Presence of Corrosion“, AGARD Structures and Materials Panel, Corfu, Greece, 7-9. October 1998, Seite 17-1 bis 17-12.

4.3-13 M.Beck, K.H. Lang, „Zulässigkeit von Fehlstellen in Feingussbauteilen bei thermisch-mechanischer Wechselbeanspruchung“, Abschlussbericht der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Heft 723 . 2001, 30. Juni 2001, Seite 1-138.

4.3-14 A.K. Koul, „Hot Section Materials for Small Turbines“, Proceedings Paper AGARD-CP-537 der Konferenz „Technology Requirements for Small Gas Turbines“, Montreal Canada, 4-8 October 1993, Seite 40-1 bis 40-9.

4.3-15 E. Macherauch, H. Wohlfart, U. Wolfstieg, „Zur zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen“,Zeitschrift „HTM 28“, Heft 3, 1973, Seite 201-211.

4.3-16 H.E. Boyer, „Atlas of Fatigue Curves“, American Society for Metals“, Metals Park, Ohio 44073, Seite 274-314.

4.3-17 R. Wiswanathan, „Damage Mechanics and Life Assessment of High-Temperature Components“, ASM International, Seite 443.

4.3-18 U. Hesseler, „LCF-Failure Analysis of an Aero-Engine Turbine Wheel“, Proceedings Paper der „Third International Conference on Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials “, Berlin, FRG, 7-11. September 1992, Seite 664-670.

4.3-19 H. Spähn, H.W. Lenz, „Die Bruchmechanik und ihre Anwendung auf Fragen der Bauteilzähigkeit- Anwendungsbeispiele“, “Zeitschrift für Werkstofftechnik“, 4. Jahrgang, 1973, Nr. 7, Seite 351-362.

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

4.3-20 W.J. Evans, J.P. Jones, M.R. Bache, „High-Temperature Fatigue/Creep/Environment Interactions in Compressor Alloys“, Paper 2001-GT-477 der „Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition“, New Orleans, LA, June 4-9, 2001 und Zeitschrift „Transactions of the ASME“, Vol 125, January 2003, Seite 246-251.

4.3-21 M.R. Bache, W.J. Evans, „Dwell Sensitive Fatigue Response of Titanium Alloys for Power Plant Applications“, Paper 2001-GT-424 der „Int. Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition“, New Orleans, LA, June 4-9, 2001 und Zeitschrift „Transactions of the ASME“, Vol 125, January 2003, Seite 241-245.

4.3-19 A.A. Shaniavski, A.I. Losev, „The effects of loading waveform and microstructure on the fatigue response of titanium aero-engine compressor disk alloys“,Blackwell Publishing, Zeitschrift: „Fatigue Fracture Engineering Material Structures, 26, Seite 329-342.

4.3-20 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 3“, Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-017733-7, 2000, Seite 12.2-1 bis Seite 12.2-32.

4.3-21 G..Lange, „Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle“, 5. Edition, April 2001, ISBN 3-527-30417-7, Verlag Wiley-VCH, Weinheim, Seite 132, 133, 135, 136.

4.3-22 Ernst Greuter, „Motorschäden- Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen“, 1. Auflage, 1994, ISBN 3-80231515-4, Würzburg: Vogel Buchverlag, Seite 73-78, 83, 183.

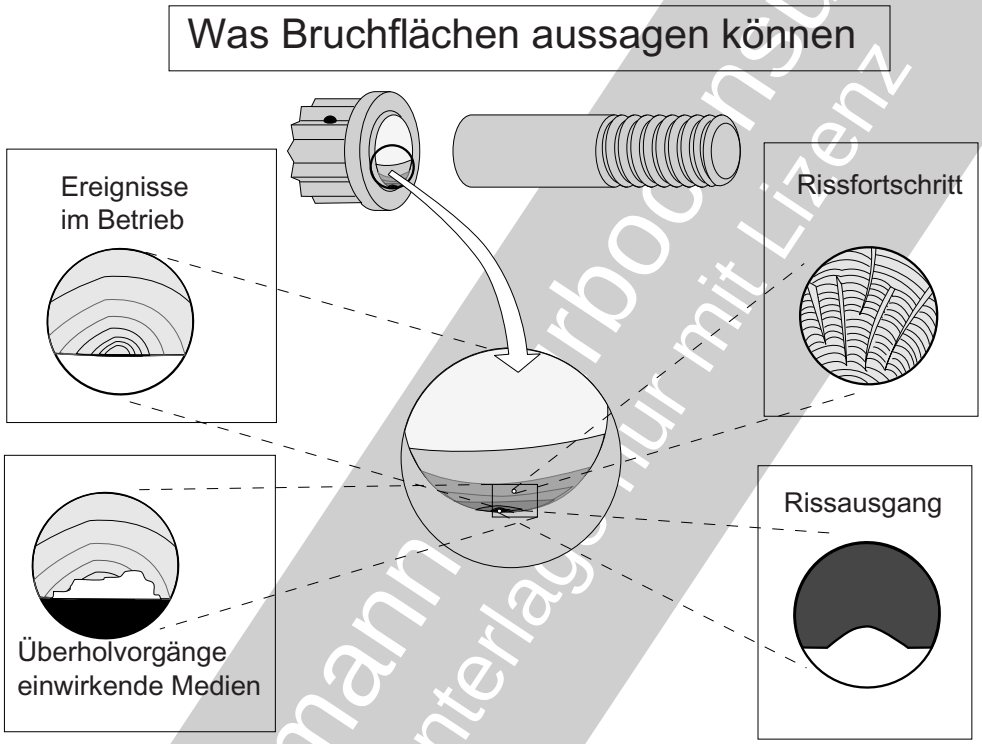
4.3-23 „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11 Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-017-4 Verlag American Society For Metals (ASM), Metals Park, Ohio, 1986, Seite 553-556.

4.3-24 „Aluminium Eigenschaftsvergleiche“, aluMatter>Werkstoffkunde>Mechanische Eigenschaften>Eigenschaftsvergleiche, http://aluminium.matter.org.uk, 2010, Seite 1-11.

4.3-25 H. Huff, A. Rossmann, „Zur Kurzzeitermüdung von Turbinenrädern“ , Allianz „Bruchuntersuchungen und Schadenklärung“, 1976, Seite 98-103.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

4.4 Bruchflächen und Rissbilder



Besonders der Konstrukteur muss sich in mittelständischen Firmen als **Schadens-/Problemanalytiker** verstehen. Er ist auf die Auswertung und Beurteilung 'seiner' Bauteile aus **Versuch** und **Betrieb** angewiesen. Nur so sind erfolgreiche, gezielte Maßnahmen zu erarbeiten. Von besonderer Bedeutung ist dabei das Sammeln von **Erfahrung** bzw. **Know Why** für die Evolution zu neuen Produkten. Voraussetzung ist, dass der Konstrukteur über ausreichend Grundwissen zur Bruchauswertung verfügt . Dabei sollte er selbst zu einer ersten makroskopischen Untersuchung (Bild 4.4-2) in der Lage sein. Auf dieser Basis sollte er in der Lage sein, gegebenenfalls Detailuntersuchungen, insbesondere mikroskopische Untersuchungen zu initiieren. Dazu bieten sich spezialisierte Fremdfirmen/Labors an. In jedem Fall sollte der Konstrukteur jedoch diesen Untersuchungen beiwohnen. So kann er seine Auslegung und (oft ihm nicht bewusstes) Hintergrundwissen einbringen. Dies ist für einen Erfolg der Schadensklärung erfahrungsgemäß entscheidend.

Bruchflächen und **Rissverläufe** können wichtige Aussagen über Schadensursache und -ablauf ermöglichen (Bild 4.4-1, Bild 4.4-3 und Bild 4.4-4). Aus folgenden Merkmalen lassen sich **Rückschlüsse** ziehen:

- **Anrissort**
  - Anrissursache: Einflüsse (z.B. Korrosion, Überlastung).
  - Schwachstelle: Ursache (z.B. Konstruktion), Werkstoff, Fertigung, Betrieb (Handling) und Art (z.B. Kerbe, Inhomogenität, Anriss).
  - Einfluss der Schwachstelle auf die Ermüdungsfestigkeit bzw. das Risswachstum.

© Axel Rossmann Verbodensult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

- Anrisszeitpunkt (z.B. an Oxidation, Überhitzungs- oder Korrosionsmerkmalen und Ablagerungen).

- **Rissfortschritt**:
  - Richtung: Belastungsrichtung, Belastungsart (z.B. Torsion, Zug, Biegung)
  - Geschwindigkeit: Größe, Richtung, zeitliche Änderung.
  - Belastungsart (z.B. statisch, dynamisch)
  - Werkstoffeigenschaften (z.B. gerichtetes Gefüge, Inhomogenitäten)
  - Belastungshöhe (z.B. Spannungsamplitude)
  - Belastungszeit (z.B. aus Rissfortschritt)
  - Zeitlicher Belastungsablauf (z.B. Rissfortschritt), Identifikation zeitlich zuordenbarer Besonderheiten, Zahl relevanter Ereignisse.
  - Anrisszeitpunkt (z.B. Rückrechnung)
  - Konstruktion (z.B. Formkerbe)
  - Oberflächeneinfluss (z.B. spröde Schicht, Rissbildung)

- **Betriebsbruch-/Restbruchgröße**:
  - Belastung beim Restbruch
  - Werkstoffeigenschaften (z.B. Sprödigkeit bzw. duktiles Verhalten).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

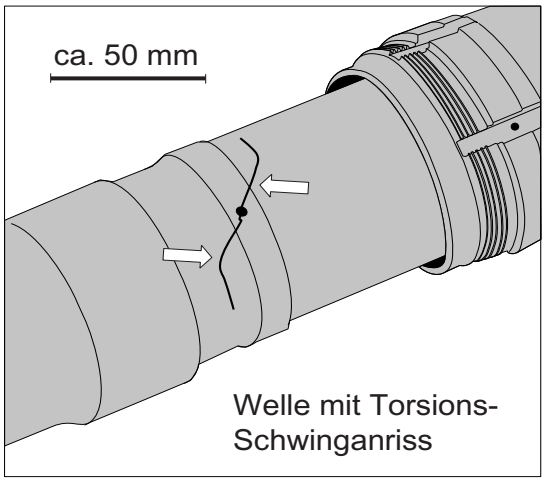
Bild 4.4-1 *(Lit. 4.4-1): Gerade die* ***makroskopische Bewertung*** *(Bild 4.4-3, Bild 4.4-5 und Bild 4.4-6) von Rissen und Brüchen kann wichtige Hinweise auf den* ***Rissbeginn*** *und die ursächliche Beanspruchung ermöglichen. Wenn eine mikroskopische Untersuchung (z.B. REM, Bild 4.4-3) als Folge einer Beschädigung der Bruchfläche (z.B. Korrosion oder Oxidation) nicht mehr möglich ist, kann dies die einzige Möglichkeit einer* ***Bruchflächenanalyse*** *sein. Eine sinnvolle* ***Probenentnahme*** *(Bild 4.4-4) für eine mikroskopische Untersuchung mit der Probenbetrachtung in* ***Fortschrittsrichtung*** *und der Untersuchung der Anrisszone erfordert eine makroskopische Bewertung der Bruchflächen. Dazu ist neben dem Augenschein ein Binokular ausreichend. Hier können Fachbücher (Lit 4.4-6) aus einer Zeit sehr hilfreich sein, in der eine mikroskopische Bruchflächenanalyse noch nicht möglich oder üblich war (bis ca. 1970).*

Beispiel 1: *In einer* ***Hohlwelle*** *(Skizze oben links) wurde ein unter 45° zur Wellenachse verlaufender, verformungsloser Riss gefunden (Lit 4.4-2). Es handelt sich bei dem Wellenwerkstoff um einen zähen Vergütungsstahl. Aus diesen Merkmalen kann geschlossen werden, dass ein* ***Schwingbruch*** *vorliegt. Ein solcher Rissverlauf ist typisch für einen Bruch infolge dynamischer* ***Torsionsbeanspruchung*** *(siehe auch Bild 4.4-6 und Lit. 4.4-9).*

Beispiel 2*: Es handelt sich um Schwingrisse im Flansch einer Hohlwelle zu einer Turbinenscheibe (Skizze unten links). Die vorzugsweise umfangsorientierten Risse haben bereits den größten Teil des Flanschquerschnitts durchtrennt. Trotzdem kam es auch nach längeren Betriebszeiten zu keinem Wellenbruch. Das typische Bruchbild zeigt das Detail unten rechts. Die deutlich makroskopisch erkennbaren Rastlinien lassen sich einzelnen Läufen bzw. Start-/Abstellzyklen zuordnen. Der Riss startet von der Fase einer Schraubenbohrung. Der* ***kleiner werdende Rastlinienabstand*** *zeigt, dass der* ***Riss langsamer*** *wurde. Er kam zum Rissende nahezu zum Stillstand. Eine plausible Er-*

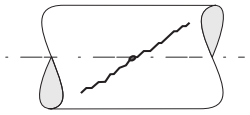
Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

Aus dem Rissbild lässt sich auf Beanspruchungsart und -verlauf schließen.



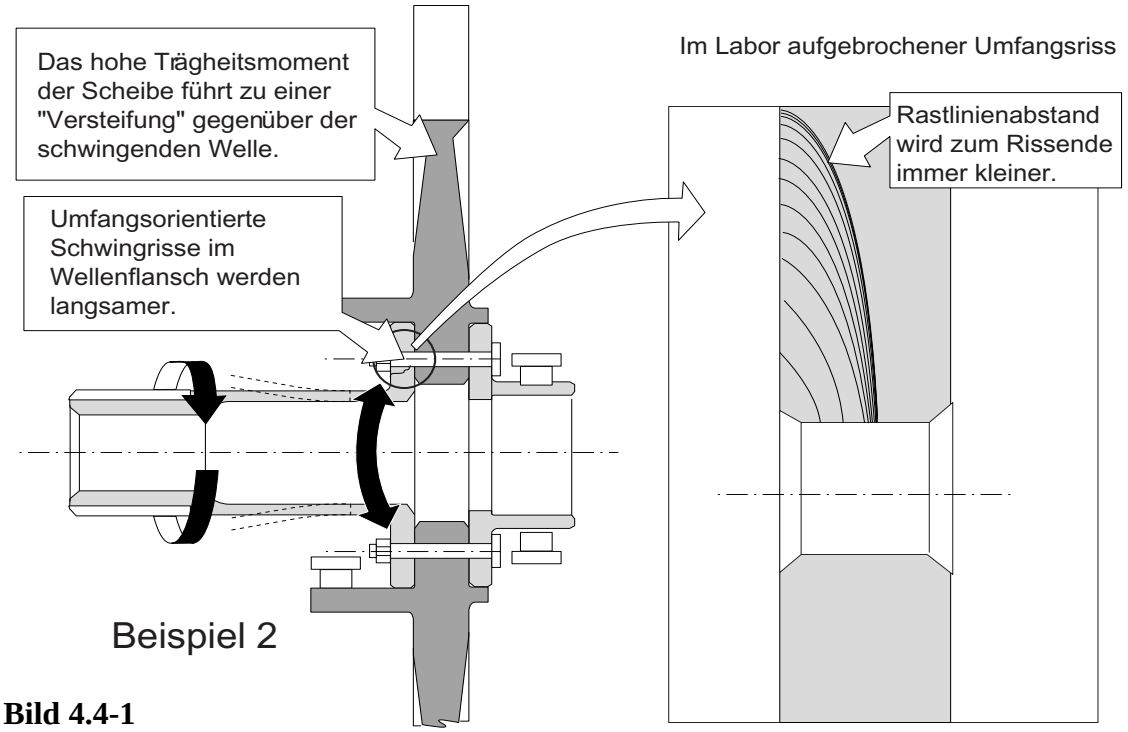
Beispiel 1

Der Rissverlauf weist auf Torsionsbeanspruchung hin



Rissbeginn an Bohrung zeigt Ursache.

Bruchflächenmerkmale lassen auf den zeitlichen Beanspruchungsverlauf schließen.



Beispiel 2

Bild 4.4-1

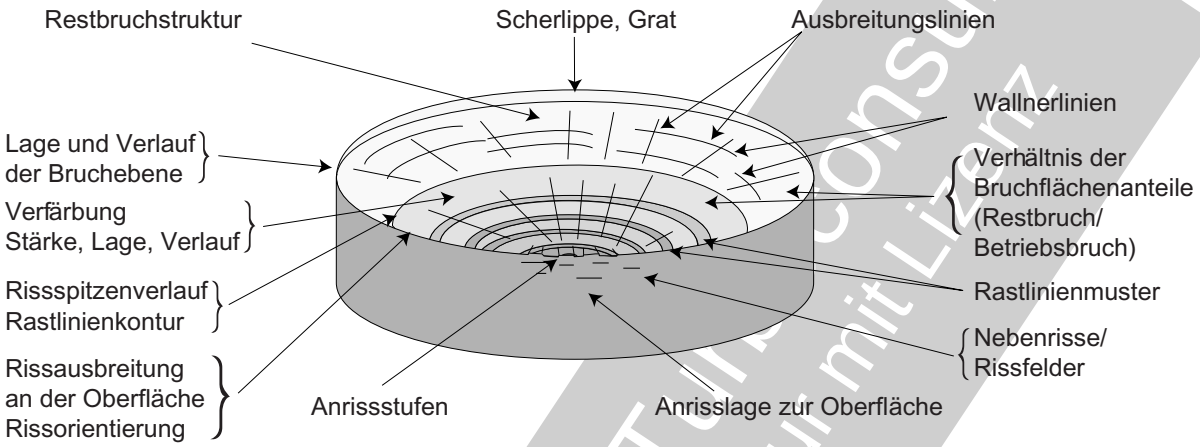
klärung ist die dynamische Belastung durch ***Kreiselkräfte*** *bei einer Auslenkung der Rotorachse. Die so wachsende Nachgiebigkeit des Verbands dürfte die Belastung gesenkt und das Risswachstum verlangsamt haben.*

Bild 4.4-2 *(Lit.4.4-4):* ***Die makroskopische Bruchflächenanalyse ist Voraussetzung und Fundament der Schadensklärung*** *gerissener oder gebrochener Bauteile. So sollte jeder Konstrukteur in der Lage sein, mit Grundlagenkenntnissen das Betriebsverhalten 'seiner' Bauteile auszuwerten und zu bewerten. Dies wird oft durch die Dominanz mikroskopischer*

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

(z.B. Oxidation

Makroskopische Bruchflächenauswertung.



Verfärbungen:
Merkmale: Intensität, Verlauf
Art (z.B. Oxidation, Ablagerungen)

- Zeitangaben: Entstehung
- Betriebstemperatur
- Betriebseinflüsse (z.B. Korrosion)
- Anrissursache (z.B. Fertigungsprozess)

Rissausbreitung:
Merkmale: Rastlinien Ausbreitungslinien, Wallnerlinien.
Orientierung (z.B. an Kerben)

- Belastungsart: Schwingbruch, Gewaltbruch
- Geometrieeinfluss (z.B. Kerben)
- Beanspruchungsart Biegewechsel, Umlaufbiegung, Torsion

Bruchausgang:
Merkmale: Zahl und Anordnung der Anrisse, Lage am Bauteil, Lage zur Oberfläche (z.B. darunter), Nebenrisse, Anrissstufen (Schießscharten), Verfärbungen, Konstruktive Kerben, Beschädigungen, Werkstoffveränderungen.

- Identifizieren
  - Anrissursache: Fertigung, Reparatur, Betrieb, Montage
- Betriebsbelastung (Höhe, Art)
- Zeitliche Abläufe: Fertigung(Oxidation, Anätzung) Rückstände (z.B. Rissprüfmittel)
- Belastungsart des Anrisses:
  - Schwingungen
  - Gewalt (z.B. spröde Anrisse)
  - Umlaufbiegung, Biegewechsel, Zug-Druck,
  - Beschichtungen, Reaktionszonen
  - Verfestigung oder Festigkeitsabfall

Bruchlage / Bruchebene:
Merkmale: Lage / Verlauf (z.B. am Bauteil), Geometrie/Auslenkung

- Betriebsbelastung
  - Lage/Orientierung
  - Einflüsse (z.B. Riefen)
  - Art (Torsion, Biegung)
- Konstruktion
  - Geometrieeinfluss,
  - Spannungs-konzentrationen

Restbruch:
Merkmale: Größe, Grate/Scherflächen,
Struktur (z.B. Wallnerlinien)

Richtung
Betriebsbelastung
Zähigkeit/Sprödigkeit

Rastlinien:
Merkmale: Verlauf, Abstände, Orientierung

- Rissfortschritt
- Sich wiederholende Ereignisse (z.B. Starts)
- zeitlicher Beanspruchungsverlauf
- Beanspruchungsart: Biegung, Zug/Druck,
- Ursächliche Belastungen

Bild 4.4-2

Verfahren, besonders der Raster-Elektronenmikroskopie (REM = engl. SEM, Bild 2.2.2.4-3) unterschätzt. Für eine mikroskopische Bruchflächenanalyse ist dagegen auch ein beratender (Operator), möglichst erfahrener Fachmann erforderlich, der zumindest mit den

Methoden und der Bewertung des Befunds vertraut ist. Um eine aussagekräftige mikroskopische Bruchflächenanalyse durchzuführen ist es jedoch erforderlich, die geeignete ***Probe dem Bauteil zu entnehmen****. Dazu ist makroskopisch zu klären:*

- ***Bruchausgang****/-gänge (Bild 4.4-6),*
- ***Bruchrichtung****/Rissfortschrittsrichtung (Bild 4.4-8)*
- ***Bruchart*** */Rissart (Schwingbruch, Gewaltbruch, Bild 4.4-7))*
- ***Bruchfolge*** *(Primäranriss, Restbruch, Bild 4.4-4 und Bild 4.4-9).*

Weitere ***Hinweise einer Makrobeurteilung*** *:*

- Auf die ***Art der Beanspruchung*** *(Biegewechsel, Umlaufbiegung, Zug-Druck, Bild 4.4-6) lässt sich aus Anordnung/Verteilung und Zahl der Anrisse schließen.*

- Erkennen wahrscheinlicher, schadensursächlicher, ***konstruktionsbedingter Kerben*** *(Bild 5.4.4-1) wie Bohrungen, Steifigkeitssprünge / Absätze aus der* ***Lage des Bruchs bzw. der Bruchebene****.*

- Verteilung und Art von Verfärbungen. Anlauffarben und Oxidation können zur Abschätzung der ***Temperaturverteilung im Betrieb*** *dienen. Hohe Temperaturen, die im Betrieb selbst ausgeschlossen werden können, weisen auf* ***Herstellung*** */ Reparatur hin (z.B. Wärmebehandlung/Härten, Schweißen, Richten mit der Flamme).*

Verfärbungen können auch von ***Prozessbädern*** *aus Fertigung oder Reparatur stammen. Dazu gehören Ätzbäder. Typisch ist die* ***dunkle Farbe*** *von SpRK-Rissflächen. Sie entstehen in* ***Brünierbädern****.*

- ***Rastlinien*** *sind in strengem Sinn meist keine Linie sondern haben eine gewisse Breite. Sie entstehen* ***nicht nur im Stllstand*** *durch Oxidation (Rost). Sie bilden sich auch* ***während des Rissfortschritts****, wenn sich dieser signifikant verändert. Die dabei veränderte Oberfläche reflektiert das Licht anders. Ein sich wiederholendes* ***Rastlinienmuster*** *lässt auf entsprechend* ***wiederholte Belastungsbesonderheiten*** *wie Starts und Abstellvorgänge oder Leistungsänderungen schließen. Die* ***Breite der 'Rastlinie'*** *(oft handelt es sich um einen bogenförmigen Bereich) entspricht dem Rissfortschritt (Zeit bzw. Zyklenzahl) während des fraglichen Betriebszustands.*

Gewöhnlich*, d.h. bei gleichbleibender äußerer Last, nimmt der* ***Rastlinienabstand*** *bei gleichen Laufzeiten mit der Rissgröße zu. Das ist der Fall wenn die Spannung im im Restquerschnitt ansteigt. damit erhöht sich die* ***Rissfortschrittsgeschwindigkeit****. Es gibt jedoch Fälle, in denen* ***mit wachsendem Riss die Fortschrittsgeschwindigkeit sinkt****. Es handelt sich gewöhnlich um* ***verformungsbehinderte (dehnungsgesteuerte)*** *Systeme (Beispiel 2 in Bild 4.4-1, Bild 5.4.2.1-2).*

- Die ***Richtung eines Gewaltbruchs*** *bzw. des* ***Restbruchs*** *kann dessen Struktur zeigen (Bild 4.4-6). Sprödes Verhalten hat typische Erscheinungsformen (Bild 4.4-9).*

- Findet man an einem ***zweiten, gleichen Bauteil*** *(z.B. Pleuel, Ventil, Verdichterschaufel) derselben Maschine ein* ***vergleichbares Rastlinienmuster,*** *empfiehlt sich ein Vergleich. Gleiche Zahl und Folge der Rastlinien weist auf eine* ***gleichzeitige hohe Überlastung*** *hin (Bild 4.3-20 und Bild 4.3-21). Es handelt sich oft um einen* ***Folgeschaden*** *mit ungewöhnlich hoher Betriebslast.*

- Die Beurteilung von ***Ablagerungen*** *aus Struktur, Farbe und Verteilung gibt Hinweise auf die Entstehung bzw. Ursache. So lässt sich ein auffälliger Verlauf der Begrenzung an der Bauteiloberfläche mit dem Tauchen in ein Bad (Badspiegel) erklären.*

- Wertung von ***Geometrie*** *bzw.* ***Verlauf der Bruchebene****. Ändert die Bruchebene ihre Richtung, lässt dies auf* ***veränderte Spannungen beim Rissfortschritt*** *bzw. deren Umlagerung schließen. Bei spröden Werkstoffen kann der Riss auf der Gegenseite durch Reflexion elastischer Wellen* ***bogenförmig abgelenkt*** *werden (Bild 4.4-9).*

- Makroskopische ***plastische Verformungen*** *sind im Ausgangsbereich ausgeprägter Schwingbrüche (HCF) auszuschließen. Sie*

© Axel Rossmann - Turbocon sult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

*können als Anzeichen.einer **Gewaltüberlastung** gelten.Typisch sind **Faserkrümmungen** in Bruchnähe (Bild 4.4-7) bei Torsionsgewaltbrüchen. Hierbei kann es sich um den Restbruch, aber auch um einen Gewaltbruch des Gesamtquerschnitts handeln. Dies muss eine Untersuchung des gesamten Umfangs klären.*
*- Kleine **örtliche Kerben und Fehler,** die am Schadensteil häufiger an unterschiedlichen Stellen auftreten, können auf Ursachen wie **Montagebeschädigungen** oder **Werkzeugeindrücke** hindeuten.*
*- Aus den **Flächenanteilen von Betriebs- und Gewaltbruch** lässt sich auf die **Beanspruchung**, zumindest bei Restbruch, schließen.*
*- Die Anordnung **mehrerer Anrisse** unterhalb der Bruchebene (Bild 5.4.4-4.3) ergibt **Art** und **Richtung** der Belastung. Zu unterscheiden sind Zug-Druck, einseitige Biegung und Umlaufbiegung.*
*- Der **Verlauf der Rastlinien** und die **Trennlinie zum Restbruch** zeigt **Kerbwirkungen im Oberflächenbereich**. Läuft der Primärbruch an der Oberfläche vor, ist die Kerbwirkung ausgeprägt (Bild 5.4.4-4.1). Sie ist umso größer, je spitzer der Winkel zur Oberfläche ist.*
*- Schmale **Ringzonen entlang der Oberfläche** lassen hier auf eine Besonderheit schließen. Die Festigkeit kann erhöht (Bild 4.3-18) oder abgefallen sein. Trennt die Ringzone den **Anriss von der Oberfläche** (Bild 4.3-18) dürfte es sich um eine Oberflächenhärtung handeln (z.B. Einsatzhärtung, Nitrierung).*
*- Über die **Zähigkeit/Sprödigkeit** kann Aussehen bzw. **Struktur des Restbruchs** (Gewaltbruchs) Auskunft geben. Auf Zähigkeit weist eine ausgeprägte **Scherlippe** an der Oberfläche zum Rissende hin (Bild 5.2.1-4 und Bild 5.2.1-5).*

***Bild 4.4-3** (Lit. 4.4-4): Im Gegensatz zur makroskopischen Bruchflächenanalyse sollte ein erfahrener Fachmann (**Operator**) zumindest für eine REM-Untersuchung (Bild 2.2.2.4-3) zur Verfügung stehen. Trotzdem ist es unerlässlich, dass der Auftraggeber (z.B. Konstrukteur) mit seinen latenten **Hintergrundinformationen** (z.B. Auslegung und Betriebsbesonderheiten) bei der gesamten Untersuchung zugegen ist. Lichtoptische mikroskopische Untersuchungen (Binokular) sind ein wichtiger Zwischenschritt vom Makro- zum Mikrobefund und sollten vom Konstrukteur durchgeführt werden können. Dazu gehört auch die photografische Dokumentation. **Erfolgreiche mikroskopische Bruchflächenanalysen setzen eine makroskopische Auswertung voraus** (Bild 4.4-2). Diese dient der*
*- **Probenentnahme** am richtigen Ort, gewöhnlich dem Primäranriss (Bild 4.4-2).*
*- Geeignete **Probenorientierung** zum Lichteinfall bzw. Elektronenstrahl/Detektor. Die optimale 'Blickrichtung' im REM geht gewöhnlich in Rissfortschrittsrichtung*
*- Geeignete **Präparation**. Dies gilt besonders bei Verschmutzung, Belägen und Oxidation.*

***REM Befunde** (Identifikation von Besonderheiten und deren Wertung sollten vom Operator vorausgesetzt werden):*

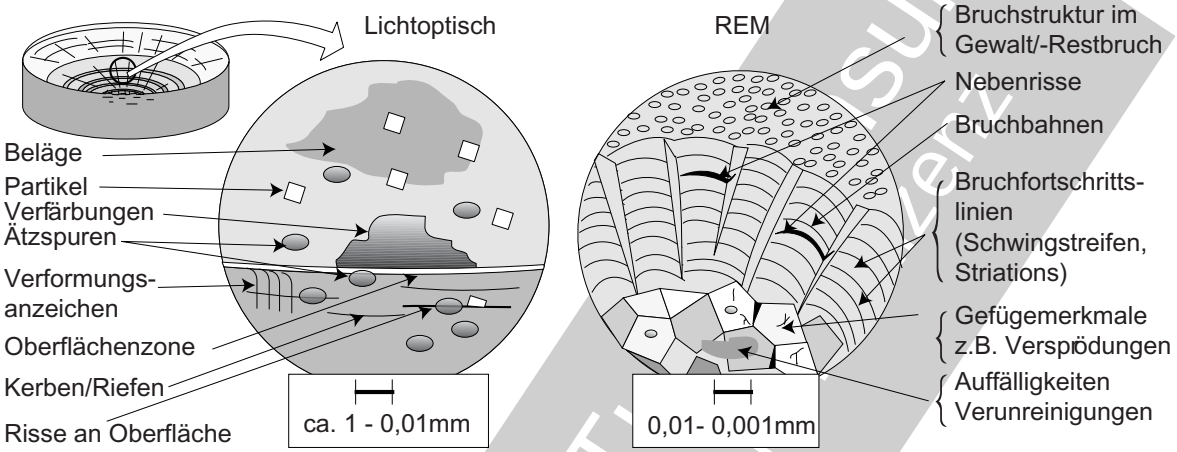
*- **Bruchfortschrittslinien** (Schwingstreifen, Striations, Bild 4.3-6.2) haben eine hohe Aussagekraft. Sie sind ein Nachweis für Schwingermüdung. Ihr Abstand lässt auf die **Betriebsbeanspruchung** (Bild 4.3-21 und Bild 4.4-10) beim Rissfortschritt schließen.*
*- **Beläge, Partikel und Verunreinigungen** können wichtige Aussagen, insbesondere auch für **Zeitzuordnung** (Entstehungszeit) ermöglichen. Hier ist besonders die Möglichkeit einer Mikroanalyse, die jedes REM bieten sollte, von hoher Aussagekraft.*
*- **Bruchstrukturen von Gewaltbrüchen** ermöglichen Rückschlüsse auf **Verformungs-/Kraftrichtung** (Bild 4.4-7) und **Werkstoffverhalten** (**spröd**, **zäh**).*
*- **„Auffälligkeiten"** sind meist unerwartete Befunde. Dazu gehören Bereiche hoher Aufladung (leuchten auf dem Bildschirm auf) die auf Verunreinigungen hinweisen. Dazu gehören auch*

Fortsetzung Seite 4.4-8

© Uni Rostock - Tribologie
Diese Unterlage darf nur mit Lizenz verwendet werden

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

Mikroskopische Bruchflächenauswertung.



Lichtoptisch (Binokular, Mikroskop)

Beläge, Partikel, Ätzspuren:
Merkmale: Farbe, Struktur, Ort, Überdeckung

- Art, Herkunft
- Entstehungszeit,
- Einfluss auf Riss

Verformungen:
Merkmale: Extrusions, Intrusions, Gefügedeformation

- Belastung/Überlastung
- Zeit, Ursache

Risse:
Merkmale: Eingedrungene Partikel, geätzt, verformt (gestrahlt), überarbeitet

- Belastung/Überlastung
- Zeit, Ursache

Verfärbungen/Oxidation:
Merkmale: Farbe, Struktur, Ort, Überdeckung

- Temperatur
- Entstehungszeit,
- Ursache

Kerben, Riefen:
Merkmale: Form, Tiefe, Orientierung, Länge, Ort, Deformation, Fremdstoffe, Mikrorisse

- Entstehungszeit
- Ursache

Oberflächenzone:
Merkmale: Schmale Randzone erkennbar.

- Oberflächenhärtung
- Beschichtung
- Reaktionszone
- Diffusionszone
- Interkristalline Korrosion
- Versprödung

REM

Auffälligkeiten:
Merkmale: Aufladung ungewöhnliche Mikroanalyse Ätzspuren

- Einflüsse
- Entstehung
- Schadensmechanismen z.B. durch Metallschmelzen
- Entstehungszeit (z.B. Fertigungsprozess)
- Hinweise auf Betriebs-besonderheiten, z.B. Fremdkörper

Bruchbahnen:
Merkmale: Orientierung

- Bruchart: Schwingbruch
- Rissfortschrittsrichtung

Gefüge:
Merkmale: Poren, Rest-zähigkeitsmerkmale (Krähenfüße), klaffende Korngrenzen

- Beanspruchungsart: Gewaltbruch Biegung, Zug/Druck,
- Ursächliche Belastungen

Nebenrisse:
Merkmale: Aufgerissene Striations.

- Belastungsrichtung
- Belastungsniveau hoch

Rissfortschrittslinien (Schwingstreifen, Striations)
Merkmale: Orientierung Abstand/Dichte,

- Belastungsart
  - Schwingungen
- Betriebsbelastung
  Höhe (LCF, HCF)

Bruchstruktur im Gewalt-/Restbruch
Merkmale: Waben oder spröde Merkmale im Restbruch oder Anriss

- Betriebsbelastung
  Richtung
  Überlastung
- Werkstoffverhalten
  (spröd, zäh)

Bild 4.4-3

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

Fortsetzung von Seite 4.4-6

- ***unerwartete Analysenergebnisse***, *z.B. der Grundwerkstoffzusammensetzung oder örtliche Aufschmierungen.*
- *Merkmale* ***äußerer Einflüsse*** *wie Ätzangriff oder abrasive Strahlbehandlungen.*
- *Diskrete* ***Oberflächenzonen****. Sie können auf Einflüsse wie Verfestigungen, Härtungen, Wärme, Diffusionsvorgänge und Schädigungen (z.B. Versprödung) hinweisen.*
- ***Nebenrisse*** *findet man entlang von Striations. Sie klaffen gewöhnlich auf und sind ein Zeichen* ***hoher Schwingbelastung*** *mit mikroskopischer plastischer Verformung (LCF-Bereich).*
- ***Gefügemerkmale*** *sind oft spezifisch für bestimmte Schadensmechanismen. Dazu gehört wasserstoffinduzierte* ***Spannungsrisskorrosion*** *(Bild 5.7.1-4) und* ***Wasserstoffversprödung*** *(Bild 5.7.1-2).*
- ***Bruchbahnen*** *der Schwingrisse verlaufen in Ausbreitungsrichtung, d.h. quer zu den Striations. Es handelt sich um mikroskopische Rissfortschrittsebenen. Durch Gefügeeinfluss kann der Rissfortschritt sehr unterschiedlich sein. Das beeinflusst jedoch den schadensrelevanten* ***mittleren Rissfortschritt*** *nicht. Werden Rissfortschrittsgeschwindigkeiten anhand der Striations ermittelt, sind deshalb mehrere Messungen erforderlich und ein Mittelwert zu bilden.*

Bild 4.4-4: *Bei* ***Schwingbrüchen*** *kann es als Folgeschaden zu Einschlagskerben an den* ***Kanten im Bruchausgangsbereich*** *des primär gebrochenen Bauteils kommen. Andererseits entstehen Schwingbrüche nicht selten an* ***schadensursächlichen mechanischen Beschädigungen*** *(z.B. bei der Montage). Es stellt sich nun die Frage, ob eine solche Kerbe den Schwingbruch ursächlich auslöste oder als* ***Folgeschaden*** *zu werten ist. Ist die Bruchfläche im Einschlagbereich auswertbar, besteht eine Chance diese Frage zu klären.*
Dazu muss man sich vor Augen halten: Ein ***Schwingbruch im HCF-Bereich läuft ohne merkliche plastische Verformung*** *ab (Bild 5.4-1). Deshalb ist eine* ***Verformung der Bruchfläche*** *an der Kerbe, d.h. eine* ***Deformation von Rastlinien****, ein Zeichen, dass diese Kerbe erst nach dem Entstehen der Bruchfläche entstand.*

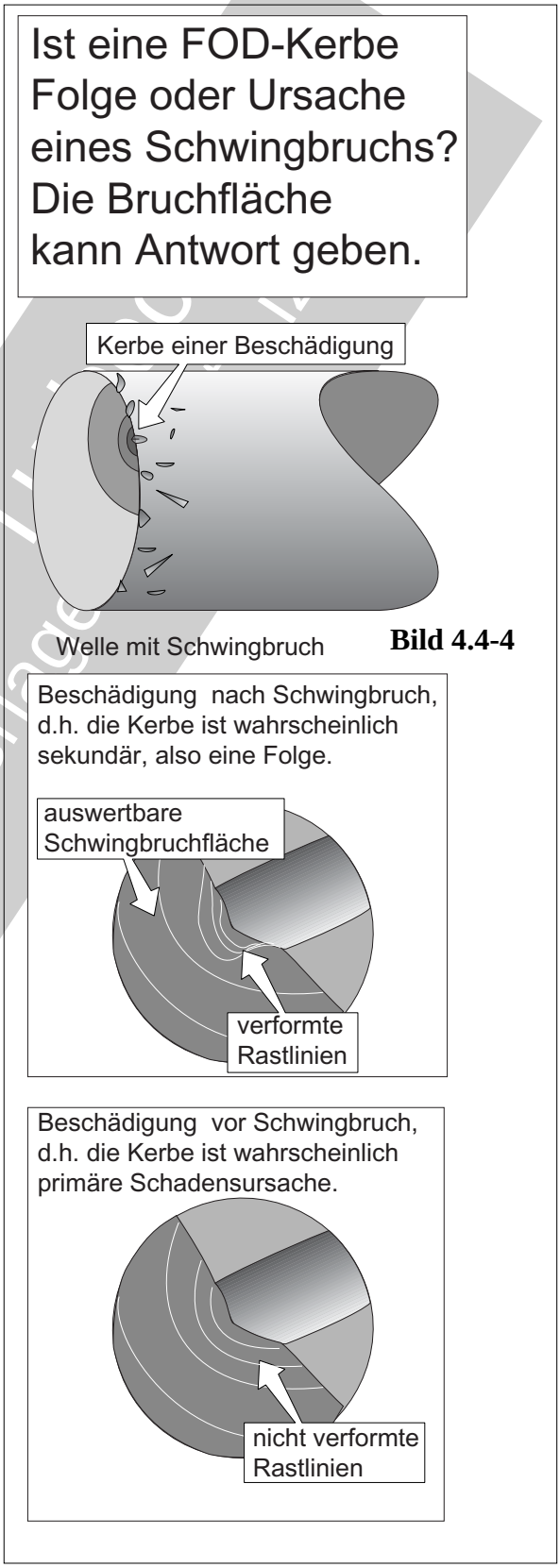


Bild 4.4-4

© Axel Rossmann - Thüringen als Schulungsunterlage

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

Es handelt sich also wahrscheinlich um einen Folgeschaden (mittlere Skizze). Ist die Schwingbruchfläche (Rastlinien, Bruchfortschrittslinien) an der Kerbe am Bruchausgang nicht plastisch verformt, darf umgekehrt davon ausgegangen werden, dass es sich bei der ***Kerbe um einen primären Schaden handelt*** *(Skizze unten).*

Bild 4.4-5 *(Lit. 4.4-6 und Lit 4.4-7):* ***Kraftrichtung*** *und Spannungsverlauf sind wichtige Größen. Sie bestimmen* ***Rissverlauf und Bruchausbildung bei statischer Beanspruchung****. Weitere Einflüsse sind die Zähigkeit bzw. die plastische Verformbarkeit des Werkstoffs und die* ***Geometrie*** *(z.B. Kerben) des Bauteils. Das Aussehen von* ***Gewaltbrüchen*** *ist nicht zuletzt von bruchmechanisch relevanten Größen wie Querschnittsdicke (Bild 5.2.1-4 und Bild 5.2.1-5), Rissgröße und Umwelteinflüssen (z.B. Korrosion/Oxidation) bestimmt (Bild 5.3.1-2).*
Der schädigenden Belastung (linker Rahmen) zugeordnete ***Gewaltbrucherscheinungen*** *sind* ***Trennbrüche*** *(quer zur Normalspannung) und* ***Scherbrüche*** *unter Schubspannungen. Trennbrüche treten unter Druckspannungen nicht auf, bei allen anderen Kraftrichtungen sind sie jedoch möglich (rechter Rahmen). Sie sind von Bauteilform und Werkstoffverhalten abhängig. Häufig findet man Kombinationen beider Bruchformen, beeinflusst von* ***bruchmechanisch relevanten Bedingungen****. So ist bei Brüchen ausreichend dünner Querschnitte unter Zugbeanspruchung in Oberflächennähe mit Scherbrüchen (Scherlippen) zu rechnen. Ein Trennbruch tritt im* ***Querschnittsinneren*** *auf (siehe auch Bild 4.4-8, Bild 5.2.1-4 und Bild 5.2.1-5).*

Bild 4.4-6 *(Lit 4.4-3, Lit. 4.4.1-4 und Lit. 4.4-6): Die sehr unterschiedlichen Formen der Riss- und Brucherscheinungen bei* ***dynamischer Beanspruchung*** *können dem Fachmann entscheidende Hinweise auf Schadensursachen und Schadensverlauf geben. Die Schadensbilder werden auf vielfältige Weise beeinflusst:*

- ***Belastung****:*
  - *-Richtung*
  - *-Größe*
  - *-Art (dynamisch, statisch)*
  - *-Verteilung im Querschnitt (z.B. Eigenspannungen).*

- ***Werkstoff:***
  - *- Zähigkeit bzw. Sprödigkeit (Lit. 4.4-12)*
  - *- Gefügeorientierung (Verformung bei der Halbzeugherstellung, z.B. Schmieden, Walzen)*
  - *- gerichtete Fehler und Verunreinigunggen (z.B. Automatenmaterial)*
  - *- Oberflächenveränderungen (z.B. Entkohlung, Aufhärtung)*
  - *- Beschichtungen (Kapitel 4.2)*
  - *- Fehler und Schwachstellen*
  - *- Fehlerlage (Oberfläche, Volumen, Bild 4.3-19)*
  - *- Versprödung (z.B. Wasserstoff, Kapitel 5.7, Alterung)*

- ***Umwelteinflüsse:***
  - *- Korrosion (z.B. Schwingungsrisskorrosion, siehe Kapitel 5.6.3.2)*
  - *- Oxidation*

- ***Bauteilgeometrie:***
  - *- Kerben (Form, Steifigkeit, Werkstoff, Kapitel 5.4.4).*
  - *- Querschnittsdicke (Bild 5.2.1-4 und Bild 5.2.1-5)*

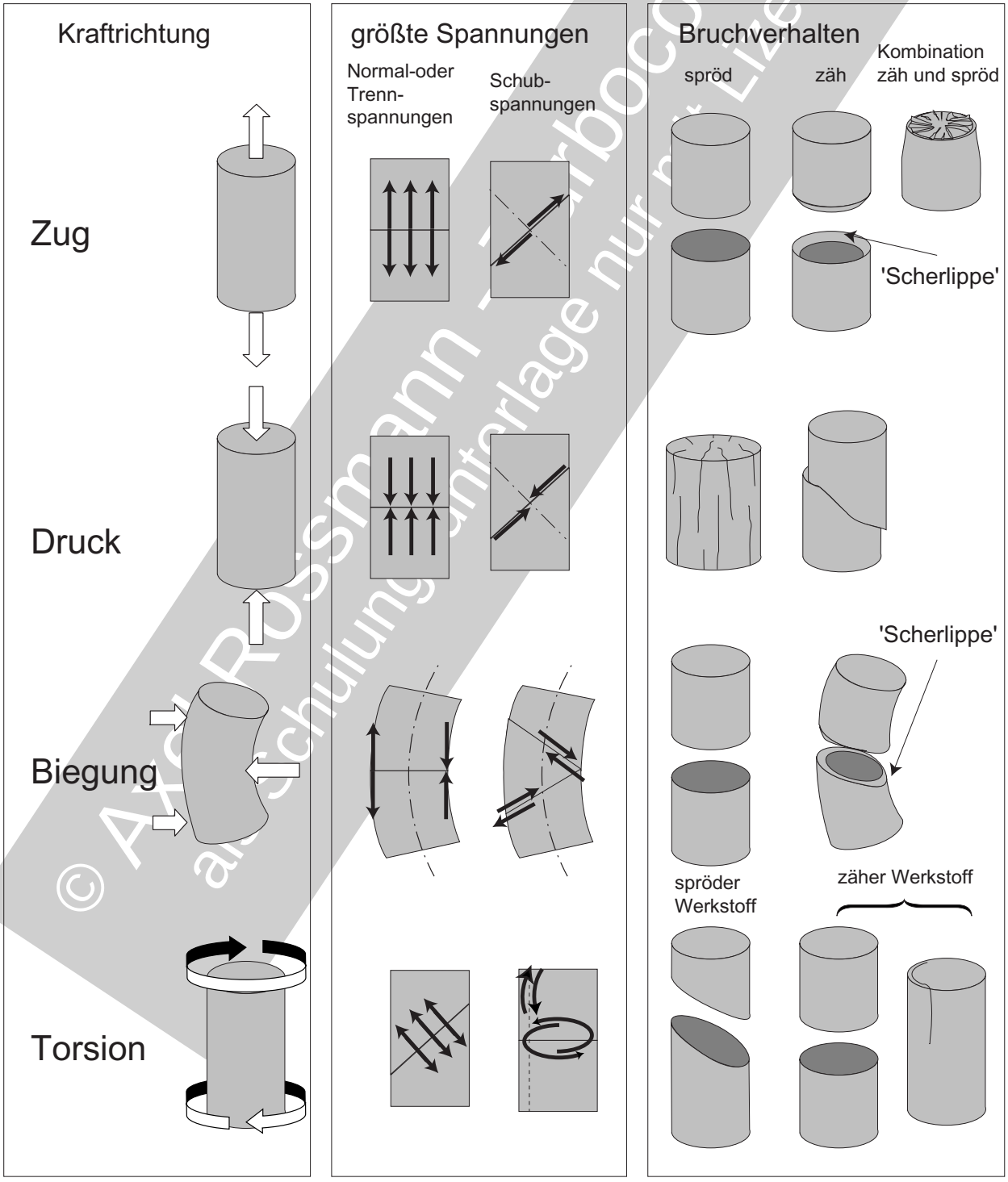
- ***Rissbildung:***
  - *- Risslage*
  - *- Rissgröße*

In den Darstellungen wird nicht nur das typische ***Bruchbild*** *gezeigt, sondern auch in Schrägansicht die zu erwartende* ***Rissbildung*** *mit Lage und Verlauf an der Bauteiloberfläche.*

© Alf Pfannmann - Turbo Consult
Lizenz mit Lizenzunterlage

Brüche lassen auf die erzeugenden Kräfte rückschließen.

(statische Belastungen)



© Axel Rossmann - Herboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 4.4-5

Beschreibung vorherige Seite

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

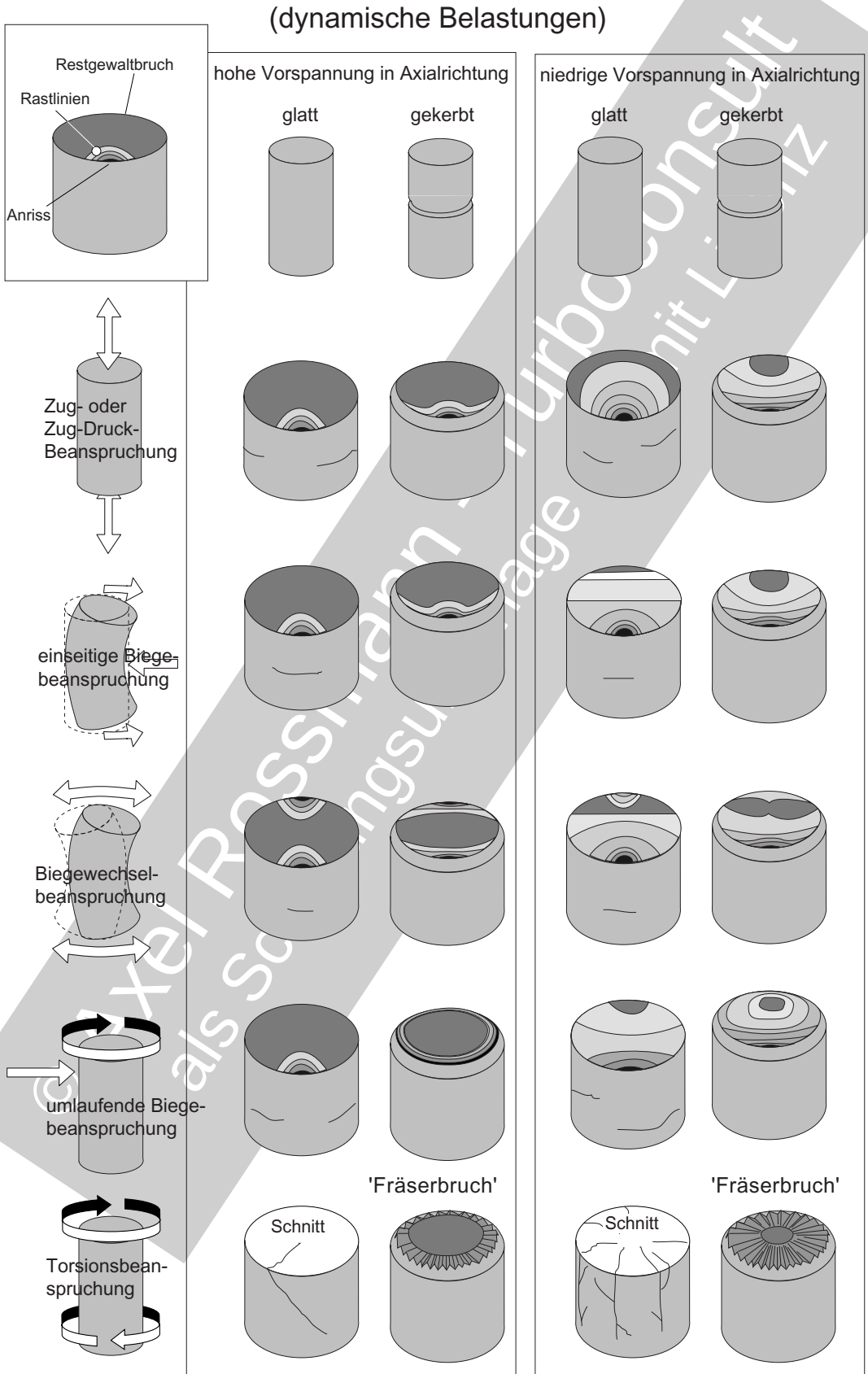


Bild 4.4-6

© Axel Rossmann - TurboConsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Beschreibung vorherige Seite

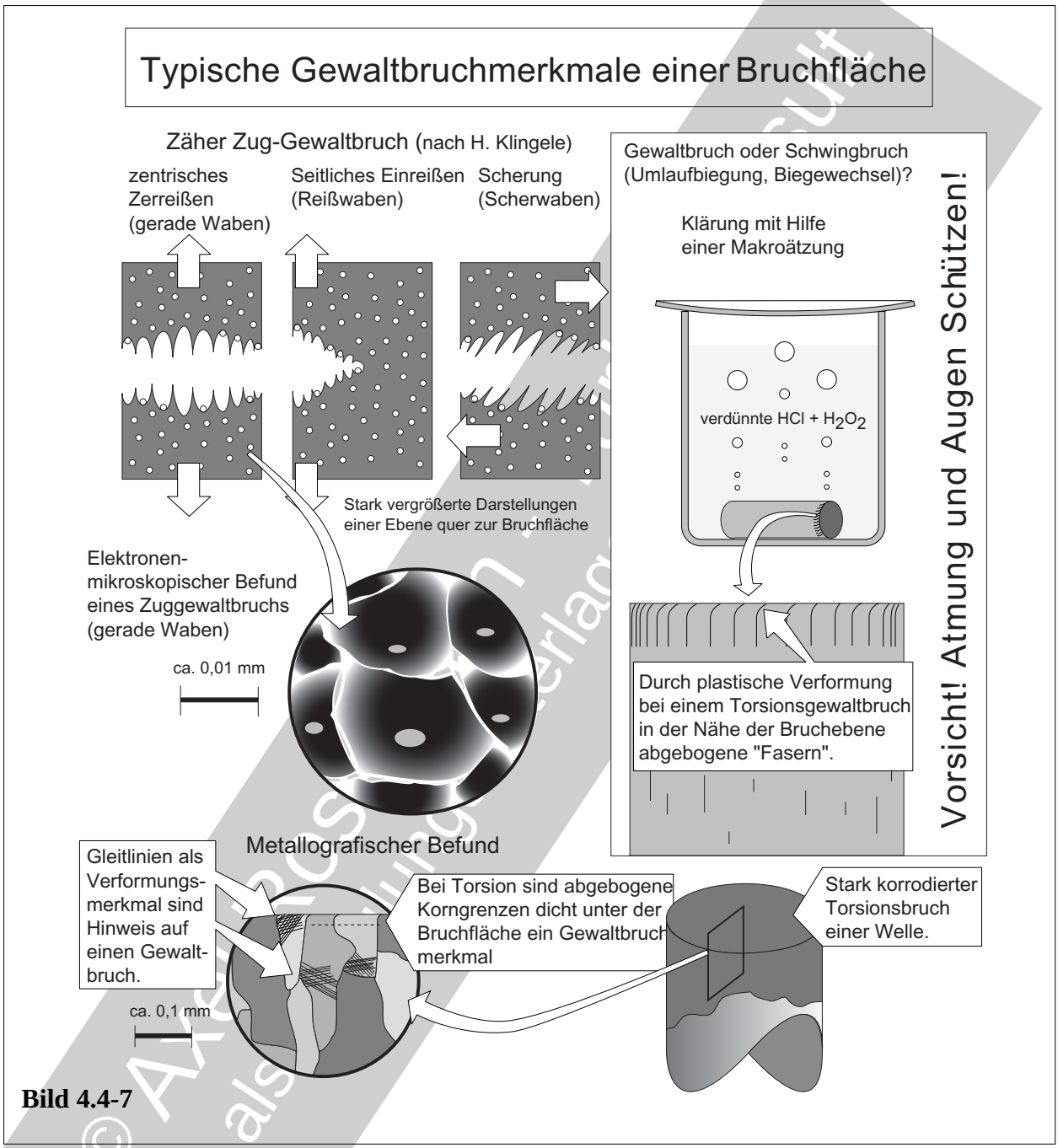


Bild 4.4-7

Bild 4.4-7 *(Lit. 4.4-10): Bei beschädigten bzw. veränderten und daher nicht mehr visuell und mikroskopisch auswertbaren Brüchen kann es äußerst schwer sein, die Bruchart sicher nachzuweisen. Die* ***Identifikation von Restgewaltbrüchen*** *und deren Abgrenzung zum primären Bruch (z.B. Schwingbruch) ist für die Ermittlung der Bruchursache und/oder für eine Einschätzung des* ***statischen Lastanteils*** *(Mittelspannung, Restbruchgröße im Verhältnis zum Primärriss) von großer Bedeutung.*

Ist die Bruchfläche noch mikroskopisch auswertbar, lässt sich mit einer REM-Untersuchung, an charakteristischen Gewaltbruchmerkmalen (meist Reißwaben, engl. Dimples, Detail oben), der Gewaltbruch identifizieren. Aus der Verformungsrichtung der Reißwaben kann auf die ***Beanspruchungsrichtung*** *bei der Bruchbildung geschlossen werden.*

Ist eine Auswertung der Bruchfläche nicht mehr möglich (deformiert, oxidiert, korrodiert), besteht immer noch die Möglichkeit die

schadensursächliche Belastung zu identifizieren:
Im metallografischen Schliff (Bild 2.2.2.4-2) können sich plastische Verformungen, die einen Schwingbruch örtlich ausschließen lassen, als Gleitlinien abzeichnen (Detail unten links). Typisch ***abgebogene Korngrenzen*** *unterhalb der Bruchfläche (Pfeile) sind als Merkmal eines Schergewaltbruchs deutbar. Auch Bauteile mit stark beschädigten Bruchflächen, wie sie beim Aufeinanderreiben an Wellen auftreten, lassen sich mit einer* ***Makroätzung*** *auf den schadensursächlichen Bruchmechanismus untersuchen. Sind die sog. „****Fasern****“, werkstofftypische, zulässige, durch den Verformungsprozess der Halbzeugherstellung gerichtete Inhomogenitäten im Bruchbereich in typischer Weise verbogen, ist in diesem Bereich von einem zähen Gewaltbruch auszugehen. Ein ausgeprägter Schwingbruch erscheint verformungslos. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bruchfläche nicht derart in der Folge des Schadens verformt wurde, dass ein verwechselbares Merkmal zu erwarten ist. Dies ist jedoch erfahrungsgemäß auch bei stärker beschädigten Bruchflächen nicht zu erwarten. Die Verformungsrichtung von Korngrenzen und „Fasern“ gibt einen Hinweis auf die* ***Belastungsrichtung während der Bruchentstehung****.*

Bild 4.4-8: *Die* ***Fortschrittsrichtung von Gewaltbrüchen*** *lässt sich meist an makroskopischen und mikroskopischen Merkmalen erkennen. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn die* ***Lage eines schadensursächlichen Anrisses*** *eingegrenzt werden soll oder ein Schadensablauf zu klären ist. Im innen liegenden* ***Trennbruchanteil*** *(Detail) verläuft die Rissfortschrittsrichtung in Richtung der sich öffnenden fiedrigen Struktur. Haben sich bei spröden Werkstoffen „****Wallnerlinien****“ auf der Bruchfläche gebildet (Bild 4.4-9), weisen diese, (ähnlich wie Rastlinien) durch ihren konzentrischen Verlauf zum Bruchausgang, auf diesen hin.*

Bild 4.4-9 *(Lit.4.4-2 und 4.4-5): Gerade* ***Sprödbruchflächen*** *wie in* ***Keramik*** *und* ***Glas****, lassen sich erstaunlich gut auf die Rissfortschrittsrichtung auswerten. Dies zeigt sich in typischer Weise bei Bruchflächen keramischer Werkstoffe anhand der sog. „****Wallnerlinien****“. Obwohl sie Rastlinien von Schwingbrüchen ähneln, ist ihr Entstehungsmechanismus vollkommen verschieden. Sie bilden sich durch die Reflexion und Interaktion elastischer Wellen im Werkstoff vor der Rissspitze. Aus dem Linienmuster lässt sich auf den* ***Anrissort*** *rückschließen (Modell der Wellenbildung eines ins Wasser geworfenen Steins, Skizzen oben). Das Bruchbild ermöglicht im günstigen Fall auch die* ***Spannungsverteilung*** *zu erkennen. Die Druckspannungsseite kann durch einen feinstrukturierten „fiedrigen“ Bruch gekennzeichnet sein (Skizze oben rechts).*
Auch der Rissverlauf kann zu Spannungsverteilung und ***Spannungshöhe*** *Aussagen machen. Als Folge einer Reflexion der elastischen*

Fortsetzung auf Seite 4.4-15

Aus welcher Richtung kommt der Gewaltbruch?

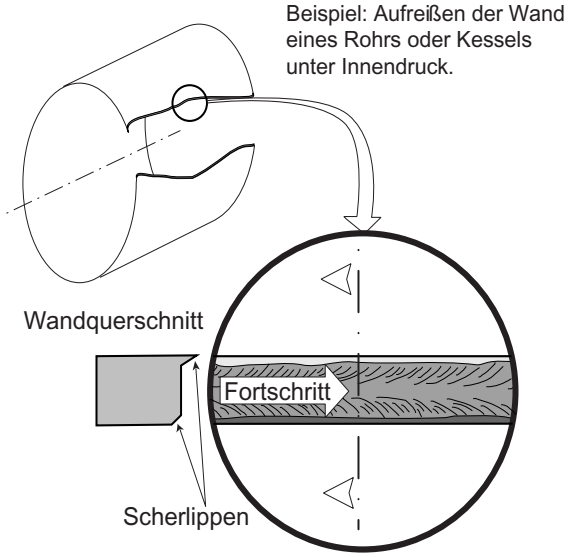
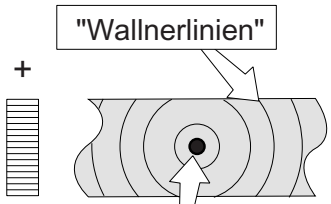


Bild 4.4-8

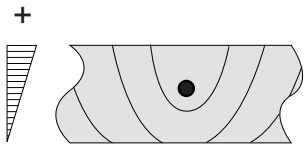
© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Typische Bruchmerkmale spröder Werkstoffe

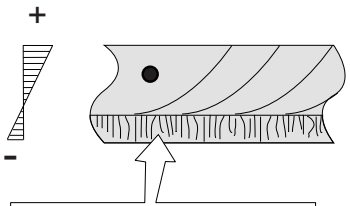
ebene Zug-beanspruchung

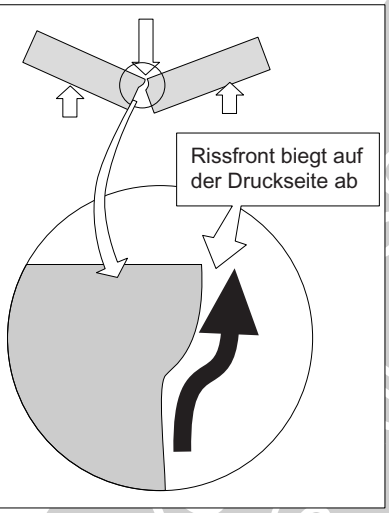


ungleichmäßige Zugbeanspruchung

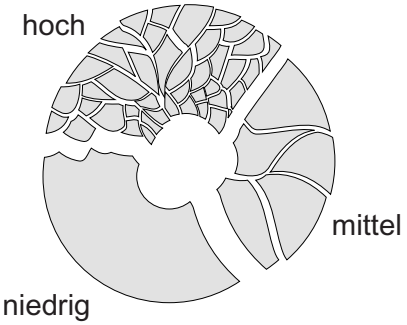


Biegebeanspruchung

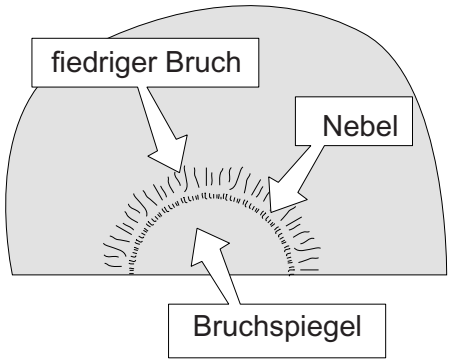




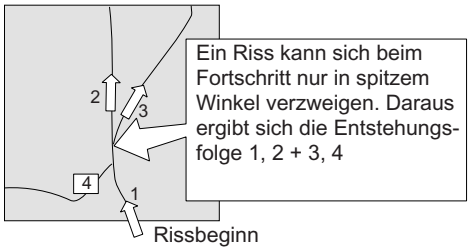
Je kleiner die Primärbruchstücke, umso höher war das Spannungsniveau. Damit lässt sich auf die Spannungsverteilung und das **Spannungsniveau** schließen.



Bruchflächenmerkmale am Anriss eines spröden Werkstoffs.



Entstehungsfolge von Rissen



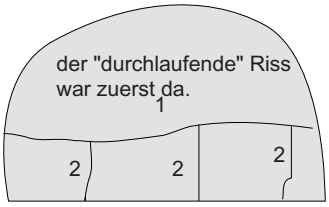


Bild 4.4-9

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

Fortsetzung von Seite 4.4-13

Welle vor der Rissspitze eines biegebeanspruchten Querschnitts (Skizze Mitte links) wird die Rissebene vor der Druckseite bogenförmig ausgelenkt.
Lassen sich die ***Bruchstücke puzzleartig zusammenfügen*** *(Skizze unten rechts), ist der Rissverlauf ein deutliches Indiz für den Rissfortschritt und die* ***Reihenfolge der Rissentstehung****. Ein Riss kann sich beim Fortschritt nur im spitzen Winkel verzweigen. Daraus folgt, dass die Reihenfolge der Risse in dem dargestellten Beispiel 1,2,3,4 (Skizze unten rechts) gewesen sein muss (Lit.4.4-4).*
Begrenzt ein durchlaufender Riss mehrere Risse und so einzelne Bruchstücke, ist davon auszugehen, dass der ***durchgehende Riss primär*** *entstand.*
Bei spröden Werkstücken kann die ***Bruchstückgröße*** *(Skizze Mitte rechts), soweit diese nicht vom nachfolgenden Aufschlag und der Zersplitterung der Primärbruchstücke dominiert wird, auch Aussagen über das* ***Spannungsniveau*** *zum Schadenszeitpunkt ermöglichen. Dies erklärt sich wie folgt:*
Erreicht die Rissfortschrittsgeschwindigkeit die werkstoffspezifische Schallgeschwindigkeit, verzweigt sich der Riss. Um auf diese kritische Geschwindigkeit zu beschleunigen, benötigt der Riss einen umso kürzeren Weg, je höher das ihn vorantreibende Zugspannungsniveau im Querschnitt ist. Dies bedeutet, dass mit ***ansteigendem Spannungsniveau die Primärbruchstücke kleiner*** *werden.*
Bei ausreichender Erfahrung lässt sich auch aus der Bruchfläche im ***Bruchausgang auf das Spannungsniveau beim Schadenseintritt*** *rückschließen (Skizze unten links und Bild 4.4-11). Konzentrisch um den Anriss bildet sich bei spröden Werkstoffen ein bogenförmig begrenzter sog.* ***Bruchspiegel.*** *Dieser wird von einer fiedrigen Bruchzone und dem sog. „Nebel" (engl. Haze) begrenzt. Aus dem Radius des Bruchspiegels lässt sich das Spannungsniveau abschätzen (Lit. 4.4-8). Voraussetzung ist, dass für den betroffenen Werkstoff die notwendigen Zusammenhänge experimentell ermittelt wurden. Das* ***Spannungsniveau zum Anrisszeitpunkt*** *kann Aufschluss über eventuell kurzzeitig aufgetretene Spannungsspitzen wie Wärmespannungen, Überdrehzahlen oder Stoßbeanspruchung geben. Bei verzögerten Brüchen äußerlich unbelasteter Bauteile (z.B. Spannungsrisskorrosion an* ***Gläsern in feuchter Luft****, Bild 5.6.3.1.1-8) sind Rückschlüsse auf* ***Eigenspannungen*** *denkbar.*

Bild 4.4-10: *Nicht selten stellt sich für die Klärung eines Schadens die Frage nach der* ***Beanspruchung beim Rissfortschritt****. Dies ist besonders dann der Fall, wenn der Verdacht auf ungewöhnlich hohe Betriebsbeanspruchungen vorliegt. Ist eine Auswertung der Fortschrittslinien (engl. Striations, Lit. 4.4-4) möglich, lässt sich eine Abschätzung der Beanspruchung während des Rissfortschritts versuchen. Mit Hilfe der Bruchmechanik lässt sich in manchen Fällen aus der mikroskopischen Auswertung des* ***Abstands von Bruchfortschrittslinien*** *(Bild 4.3-3) einer Ermüdungsbruchfläche auf die* ***Höhe der Beanspruchung*** *(Spannungsamplitude* $\Delta\sigma$*)* ***während des Rissfortschritts*** *rückschließen. Voraussetzung ist, dass sich der Rissfortschritt im Stadium II befindet (Bild 4.3-6.1) und nicht merklich durch zusätzliche Effekte wie Umgebungseinfluss (z.B. Korrosion) oder Kriechen (z.B. Haltezeiten) beeinflusst ist. Die kritische Bruchflächenauswertung und die Einschätzung verfälschender Effekte setzt für eine sinnvolle Anwendung dieser Vorgehensweise einige Erfahrung voraus.*
Es wird der Abstand "Δa*" der Rissfortschrittslinien (engl. Striations, Detail oben rechts, Lit 4.4-4) eines Ermüdungsbruchs bei einer bestimmten Risstiefe entsprechend der Rissgröße „a" ermittelt. "*Δa*" entspricht einem Lastzyklus und damit dem Rissfortschritt da/dN (Bild 4.3-6.2). Ist das* ***Paris-Diagramm*** *(Bild 4.3-3) für den betroffenen Werkstoff bekannt (Diagramm), lässt sich die zugehörige Amplitude der Spannungskonzentration „*ΔK*" able-*

© Alle Rechte bei TU Clausthal - Turbomaschinen
Dieses Dokument ist nur zum Studium und für Lehrzwecke bestimmt. Jede darüberhinausgehende Nutzung, insbesondere die Weitergabe an Dritte, bedarf der schriftlichen Genehmigung.

Besser als "gar nichts", die Abschätzung der dynamischen Belastung während des Riss-fortschritts durch Auswertung der Bruchfläche.

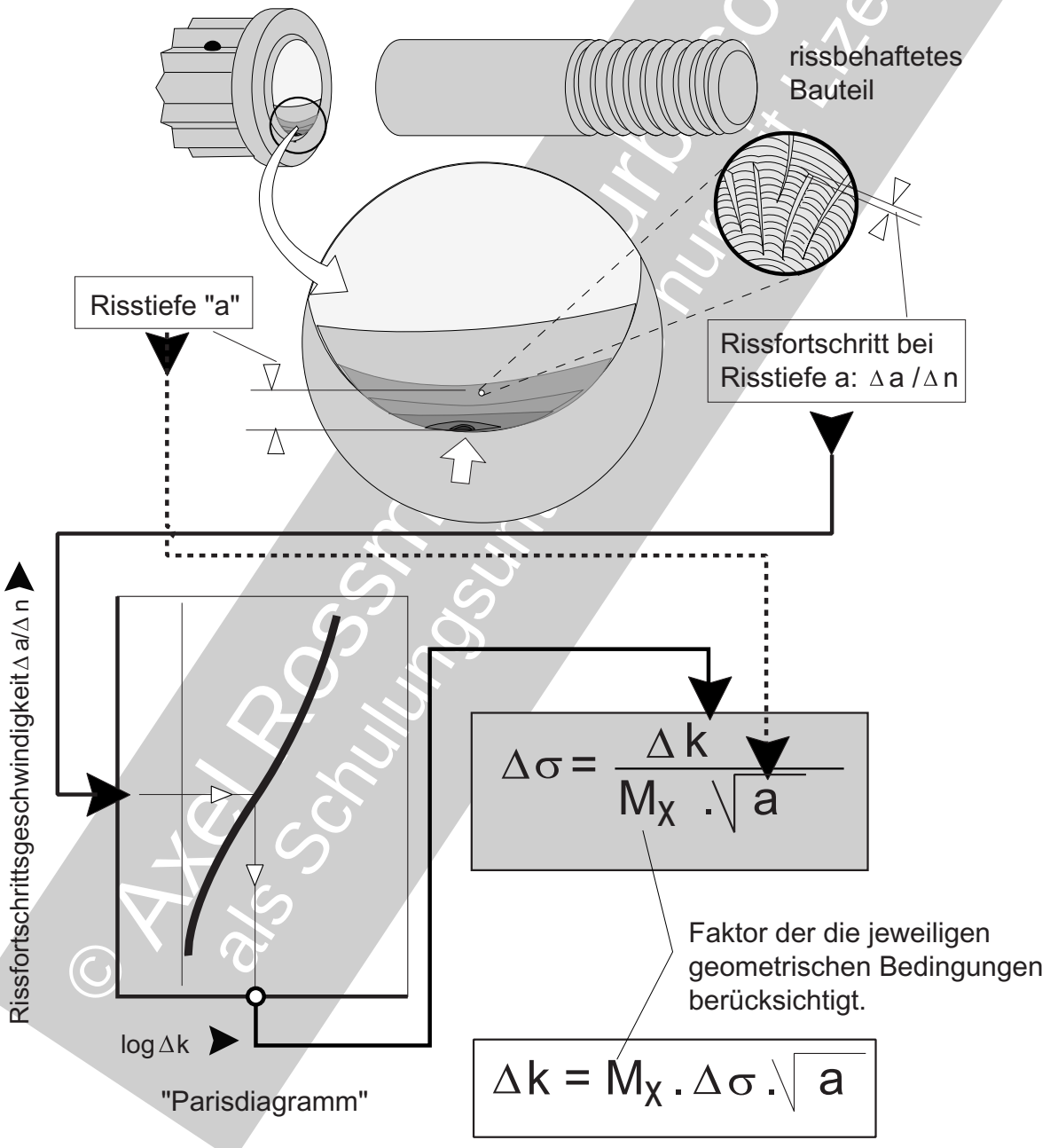


Bild 4.4-10

sen. Aus der angegebenen Formel ergibt sich in grober Annäherung die zugehörige Spannungsamplitude „Δσ“.

© Axel Rossmann
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

Die Bruchfläche eines Sprödbruchs lässt wichtige Rückschlüsse auf die Schadensursache zu.

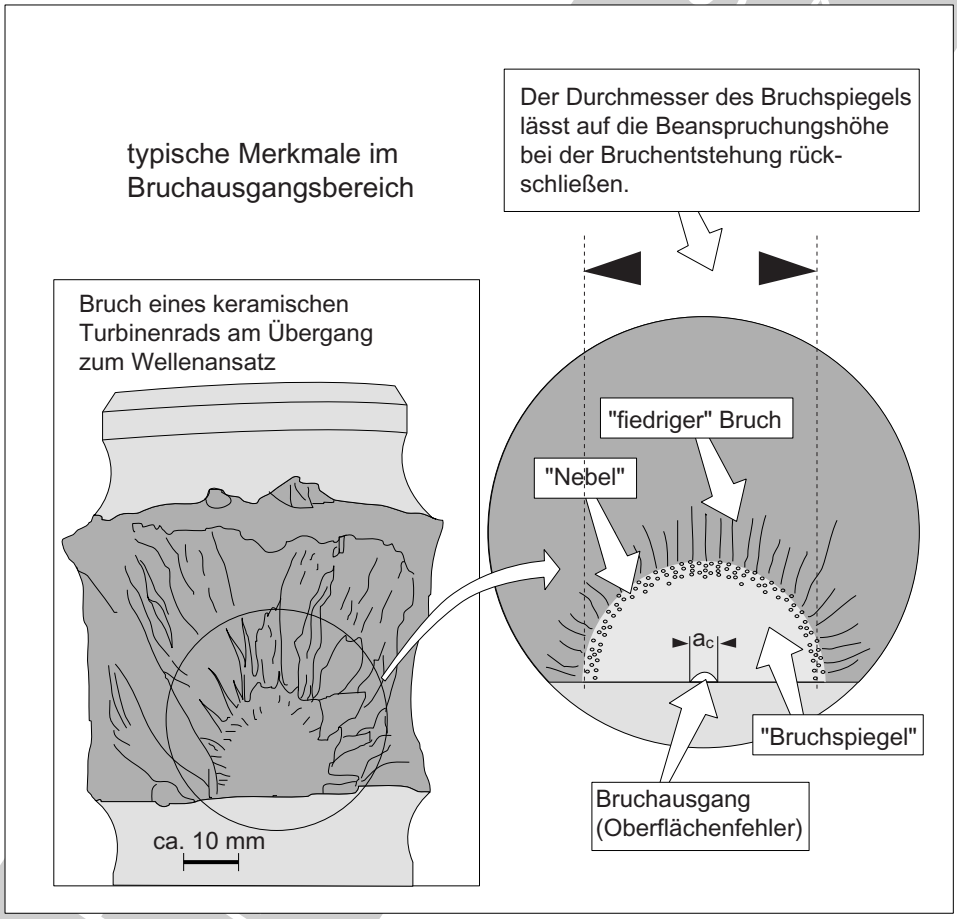


Bild 4.4-11

Bild 4.4-11: *Mit der Einführung spröder Werkstoffe wie* ***Keramiken, Gläser und Intermetallischer Phasen*** *im Maschinenbau, gewinnt die Auswertung der Bruchflächen solcher Werkstoffe an Bedeutung. Bei etwas Glück lässt sich die Bruchfläche eines spröden Werkstoffs zur* ***Abschätzung des Spannungsniveaus*** *bei der* ***Sprödbruchentstehung*** *(Bild 4.4-9, Lit. 4.4-2) und des* ***anrissursächlichen Fehlers*** *auswerten. Die Kenntnis der* ***Anrisslage*** *(Oberfläche, Volumen) ist bei spröden Werkstoffen besonders wichtig. Häufig ist sie wegen geringer Größe nicht direkt makroskopisch identifizierbar. Erst die richtige Probenentnahme im Bereich des Bruchanfangs macht die notwendige REM-Untersuchung Erfolg versprechend.*

Die linke Skizze zeigt Nabe und Wellenansatz eines monolithischen keramischen Turbinenrades aus SiC nach einem ***Berstschleuderversuch*** *(engl. Proof Test, Lit. 4.4-5). Das Detail stellt den Bereich des* ***Bruchspiegels*** *(Bild 4.4-9) mit dem deutlich erkennbaren bruchursächlichen Oberflächenfehler dar.*

Auch aus der ***kritischen Fehlergröße*** *„a_c“ (Bild 4.3-1 und Bild 4.3-3) die zum spontanen Bruch führt, lässt sich nach der Beziehung $K_{Ic} = \sigma (\pi \cdot a_c)^{1/2}$ die Bruchspannung σ bestimmen. Die Bruchzähigkeit K_{Ic} beträgt für das angewendete SiC ca. 3,5 MN/m$^{3/2}$. Zum Vergleich, für Vergütungsstähle liegt K_{Ic} bei ca. 100 MN/m$^{3/2}$ (siehe Bild 4.3-8).*

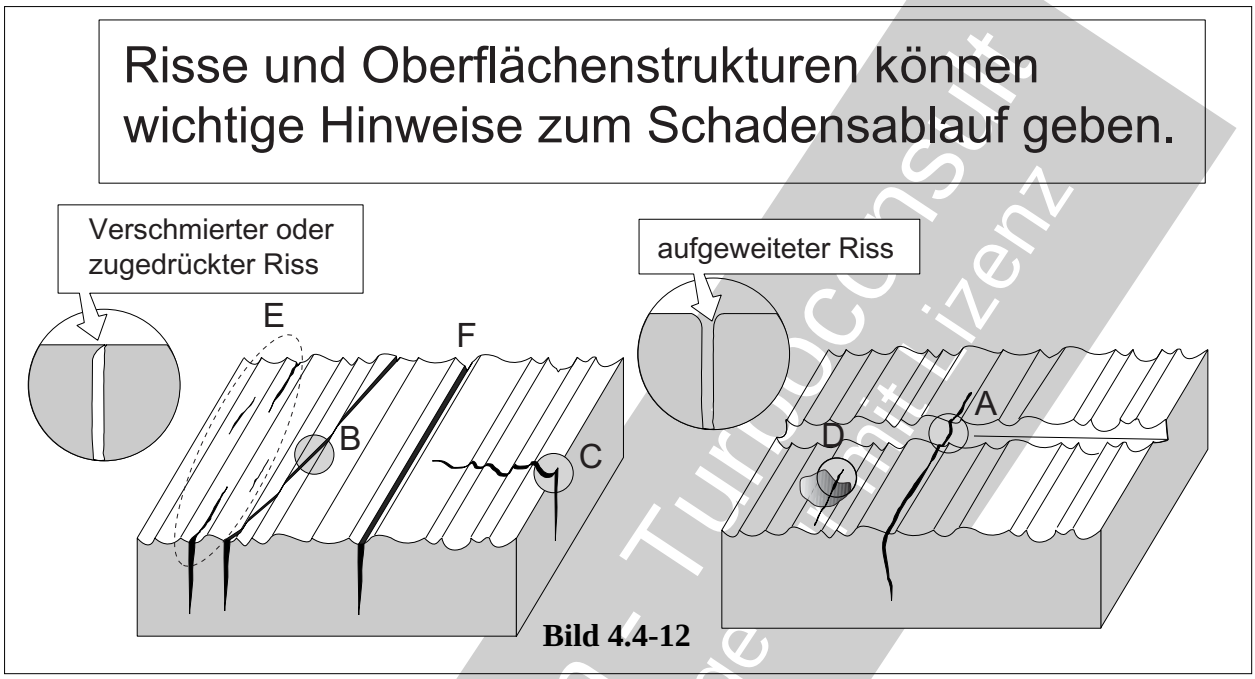


Bild 4.4-12

Bild 4.4-12: *Wie ein* ***Riss von der Topografie der Oberfläche beeinflusst*** *wird oder diese beeinflusst, kann ein Indiz für* ***zeitliche Abläufe*** *und ursächliche* ***Einflüsse auf die Rissbildung*** *sein. Gewöhnlich weist eine Bauteiloberfläche typische Merkmale aus Fertigung und Reparatur auf:*

- ***Bearbeitungsriefen*** *(Drehen, Schleifen, Fräsen). Rissverlauf relativ zu den Riefen.*
- ***Ätzspuren*** *an der Oberfläche und im Riss*
- ***Kugelstrahlmerkmale*** *(Kalotten), Deformation der Rissufer*
- ***Erosionsmerkmale*** *abrasiver Behandlung (z.B. Oxidstrahlen)*
- ***Ablagerungen*** *im Riss (z.B. von Beschichtungen oder Strahlgut)*

Je nachdem ob der Riss von den Fertigungsmerkmalen beeinflusst, z.B. ***zugedrückt*** *(siehe Detail links) oder* ***aufgeweitet*** *(z.B.angeätzt, Detail Mitte) wurde, ist er* ***vor oder nach dem Bearbeitungsprozess entstanden****.*

„A“*: Der Riss läuft* ***in einer Bearbeitungsriefe*** *(spricht für eine spätere Rissentstehung im Betrieb) und ist von einer querlaufenden, der Montage zuordenbaren Querriefe beeinflusst. Je nachdem, in welche Richtung eine Deformation des Risses an der Oberfläche weist, war der Riss bereits beim Einbau als Neuteil oder bei einer Überholung vorhanden.*

„B“*:* ***Schräg zu den Bearbeitungsriefen*** *verlaufende Risse können bereits vor dem spanenden Bearbeitungsprozess vorhanden gewesen sein. Dieser Rissverlauf spricht daher eher gegen einen von der Bearbeitung ursächlich beeinflussten Schaden.*

„C“*: Ein solcher Rissverlauf weist auf einen von der Kerbwirkung der Bearbeitungsriefen unabhängigen Einfluss hin. Denkbar wären Halbzeugfehler, Schleifrisse (typischerweise quer zu den Riefen orientiert) oder LCF-Risse (z.B. in der Nabenbohrung einer Rotorscheibe) bzw. Thermoermüdungsrisse.*

„D“*: Von einem* ***Eindruck*** *(z.B. Fremdkörper, Handhabung)* ***deformierter Riss*** *(siehe Detail links). Die Entstehungszeit des Eindrucks lässt Rückschlüsse auf die Rissbildung zu. Aufschmierungen können mit Hilfe einer Mikroanalyse (REM) eine Identifizierung des Kontaktkörpers und damit der Entstehung ermöglichen.*

© Axel Rossmann - Turbuconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Werkstoffbeeinflusstes Bauteilverhalten: Bruchflächen und Rissbilder

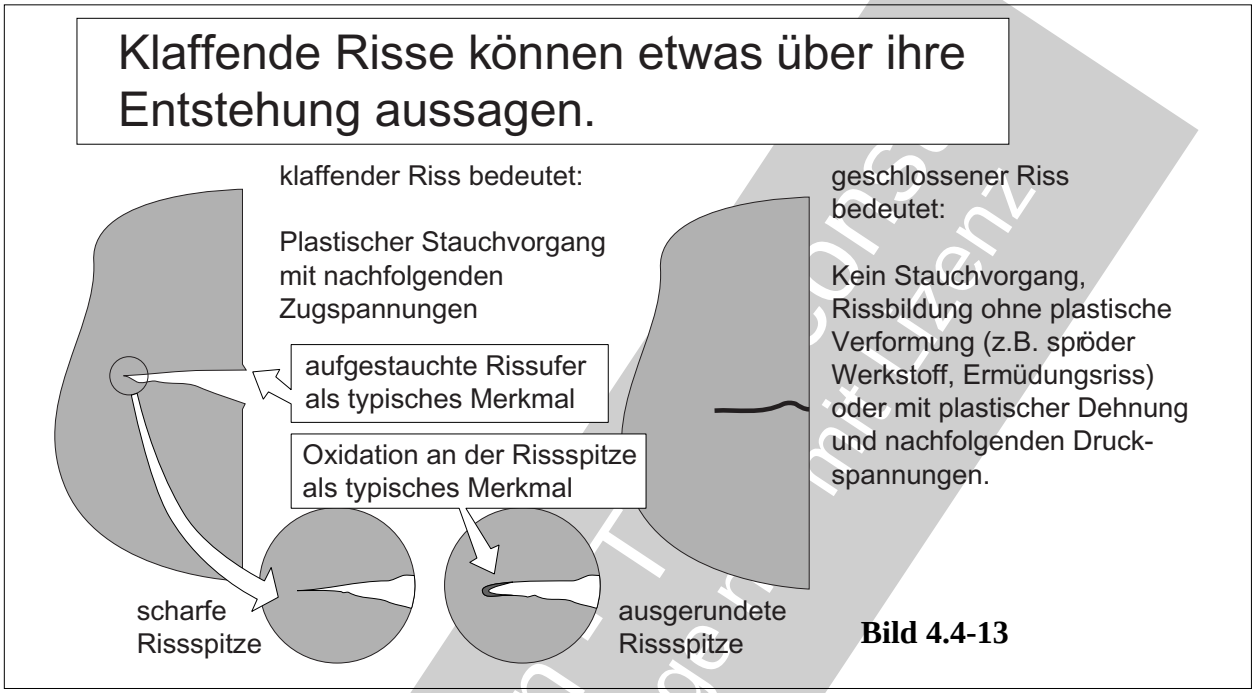


Bild 4.4-13

„E“*: Mehrere kurze Risse in benachbarten, parallel laufenden Riefen zeigen, dass die Riefen nicht als hauptschadensursächlich zu werten sind. Es ist eher davon auszugehen, dass eine hohe dynamische Beanspruchung vorlag, die zu gleichzeitigen Anrissen führte.*

„F“*: Dieser durchgehend in einer markanten Riefe verlaufende Riss weist auf die Riefe als einen schadensursächlichen Einfluss hin.*

Bild 4.4-13: *Das* ***Klaffen eines Risses*** *kann auf unterschiedliche Weise entstehen und so ein Hinweis auf* ***schadensrelevante Einflüsse*** *sein.*

Die folgenden typischen Mechanismen können zum Klaffen eines Risses führen:

- ***Zugeigenspannungen*** *nach der Rissbildung,*
- ***plastische Verformungen*** *durch Druckspannungen bei der Rissbildung (z.B. Thermoermüdung),*
- *plastische Verformung nach der Rissbildung (z.B. Folgeschaden),*
- ***Abtragende Einflüsse*** *(Ätzen, Erosion, Korrosion),*
- ***Oxidation*** *(z.B. Heißgaseinfluss).*

Hilfe in der Beurteilung der Ursache für das Klaffen können ***Rissgrund*** *und* ***Risskanten*** *bieten (Bild 4.4-14).*

Ein ***aufgeweiteter, abgerundeter Rissgrund****, insbesondere wenn eine* ***starke Oxidbelegung*** *vorhanden ist (Detail rechts), deutet auf ein langsames, verzögertes Risswachstum hin. Dies ist für Thermoermüdungsrisse typisch (Bild 4.4-14 und Bild 5.4.2.1-10).*

Aufgestauchte Risskanten *weisen auf Druckspannungen im Belastungszyklus hin. Auch dieses Merkmal wird bei Thermoermüdung beobachtet (Skizze oben links, Bild 5.4.2.1-10).*

Klafft ein Riss durch plastische Verformung, ist dies nur möglich, wenn der Werkstoff sich duktil (zäh) verhielt. Werkstoffe die erst bei höheren Temperaturen duktil werden, lassen so auf das Temperaturniveau bei der Rissbildung und damit auf den schadensrelevanten Betriebszustand rückschließen.

*Umgekehrt sind geschlossene Risse mit Sprödbruchmerkmalen ein Hinweis auf Temperaturbereiche mit sprödem Bruchverhalten. Es kann sich um niedrige Temperaturen (z.B. bei Intermetallischen Phasen) oder sehr hohe Temperaturen handeln. Sprödbrüche werden bei hohen Temperaturen beobachtet, wenn sich der Riss im Bereich der Solidustemperatur (****Warm-***

© AVL Rossmann - Tribologie
als Schulungsunterlage nicht freigegeben

Rissbilder können etwas über den Entstehungsmechanismus verraten.

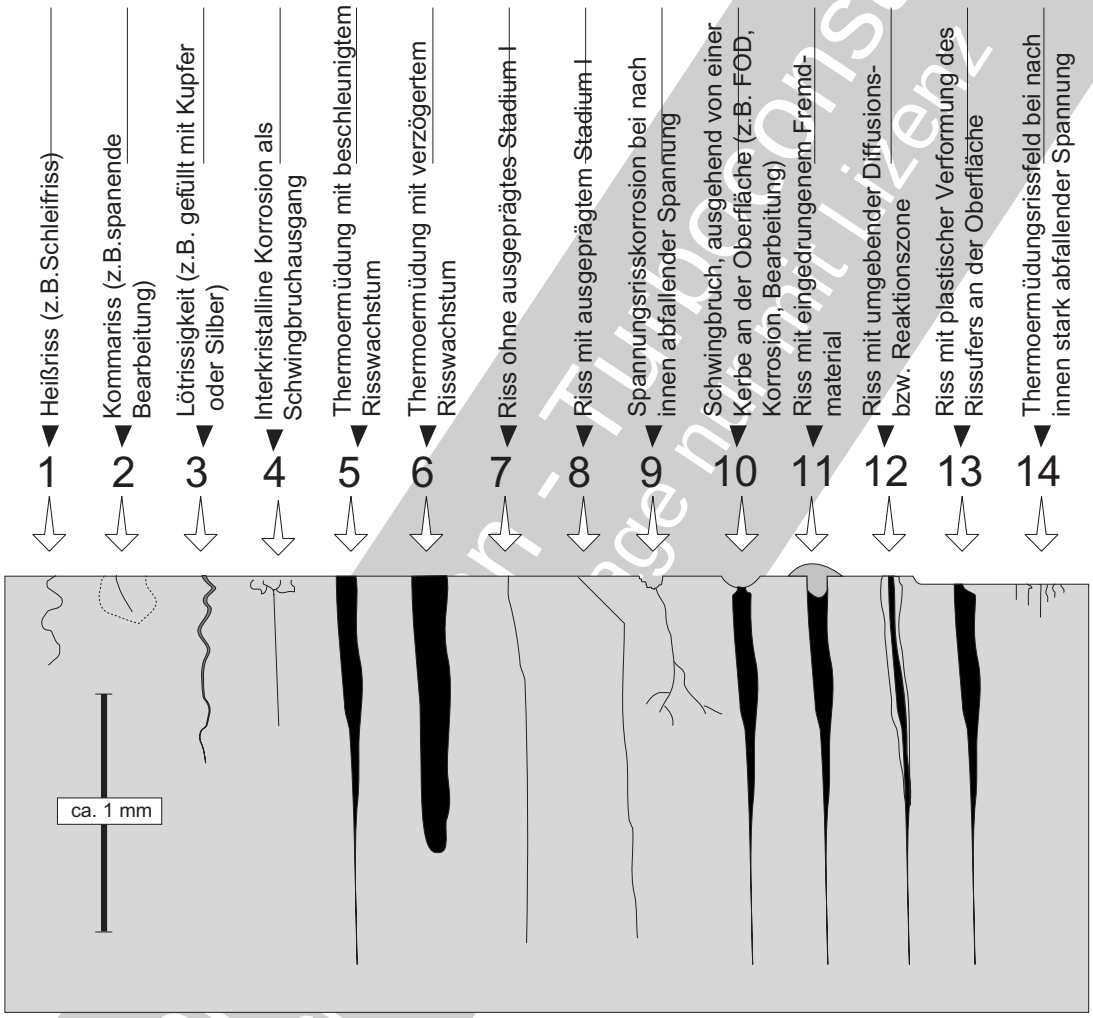


Bild 4.4-14

riss, ***Heißriss***, *Lit. 4.4-12, Bild 4.4-15) bildete. Auch bei Schwingrissen im HCF-Bereich sind keine merklichen plastischen Verformungen und damit kein Klaffen zu erwarten. LCF-Risse, insbesondere in der Nabenbohrung von Scheiben, neigen wegen der vom zyklischen Verformungsvorgang induzierten plastischen Verformung zu Druckeigenspannungen und einem* ***Zuklemmen der Risse****. Das Zusammenpressen der Rissufer kann erfahrungsgemäß sogar die Eindringprüfung behindern.*

Bild 4.4-14: *Risse zeigen in Querschliffen terschiedliche Erscheinungsbilder. Dabei kann der* ***Verlauf ein charakteristisches Merkmal*** *(z.B. Oxidation) darstellen und* ***Rückschlüsse auf den Schadensmechanismus sowie das Risswachstum*** *zulassen. Typischen Rissbildern sind hier Schadensmechanismen zugeordnet. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Rissverlauf keine allgemeingültige und sichere Zuordnung erlaubt und die Sicherheit der Beurteilung mit der Erfahrung des Auswerters in entscheidendem Zusammenhang steht.*

Typische Merkmale des Rissverlaufs sind:

- Rissverlauf relativ zu Gefüge (Bild 4.3-9) und dessen Orientierung. Relativ zu den Körnern findet man interkristallinen, transkristallinen Verlauf und Mischformen (Bild 5.6.1-2, Bild 5.6.3.1.1-6 und Bild 5.6.3.2-2) Dazu gehören

- *Geradlinig und/oder gezackt*
- *Schräg oder/und quer zur Nennspannung*
- *Durchgehend und/oder verästelt*
- *Einzelriss oder Rissfeld*
- *Risslänge*
- *Rissaufweitung*
- *Form des Rissgrunds (Bild 4.4-13)*
- *Rissanfang (Bild 4.4-13)*
- *Füllung des Risses: z.B. Fremdmetall, (Bild 5.3-6 und Bild 5.3-7), wiedererstarrte werkstoffeigene Schmelze, Oxide.*
- *Belegung der Rissufer: z.B. mit Medien aus dem Fertigungsprozess (z.B. Brünierbad = $NaOH + NaO_3$, Bild 5.6.3.1.1-10)*
- *Reaktionszonen entlang der Rissufer: Verarmung an Legierungsbestandteilen,, angereicherte Diffusionszonen*

Heiß-/Warmrisse sind eine sehr häufige Schadensart. Man findet sie bei hohen Reibtemperaturen in Betrieb und Fertigung.

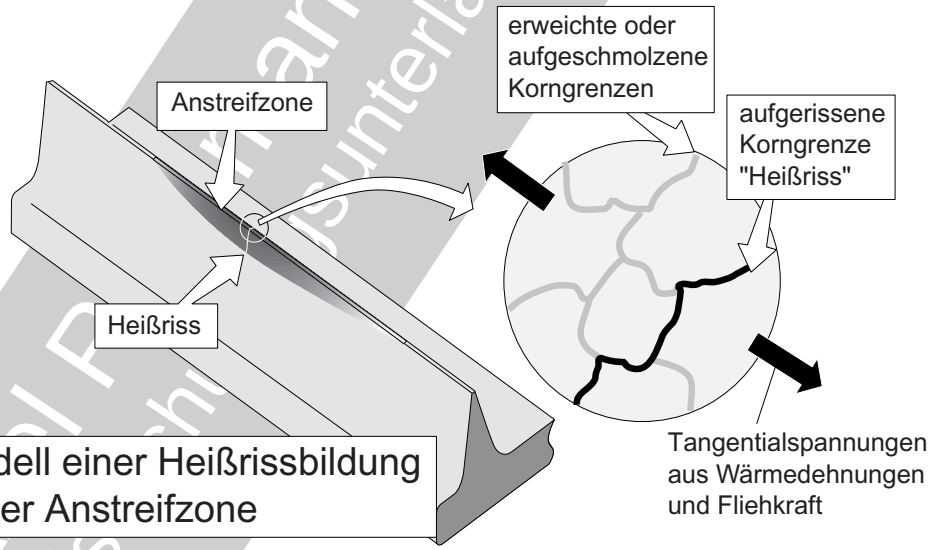


Bild 4.4-15

Modell einer Heißrissbildung in der Anstreifzone

***Bild 4.4-15: Korngrenzen** haben gewöhnlich einen niedrigeren Schmelzpunkt als das Korninnere. Deshalb reißen sie bevorzugt bei hohen Temperaturen, wie sie für Reibvorgänge typisch sind, auf (Lit. 4.4-12). Diese **Heißrisse** (auch als Warmrisse bezeichnet) entstehen bevorzugt bei der Abkühlung wegen der hohen Zugspannungen im Bereich einer vorher plastisch gestauchten Aufheizzone.*

Heißrisse entstehen bei unterschiedlichsten Vorgängen wie

- *Gießen und Schmieden,*
- *Zerspanung (Schleifen),*
- *Schweißen,*
- *Anstreifen rotierender Bauteile.*

*Sie lassen sich mit einer **mikroskopischen Bruchflächenuntersuchung** an **typischen Merkmalen** wie **Schmelzstrukturen und 'kaugummiähnlichen' örtlichen Verformungen** identifizieren (Lit. 4.4-4).*

Literatur zu Kapitel 4.4

4.4-1 W.H. Parker, „Engine Life Assessment Test Case TF41 LP Compressor Shaft Torsional Fatigue“, Agard Advisory Report 308 (AGARD-AR-308) der „Propulsion and Energetics Panel Working Group 20 on Test Cases for Engine Life Assessment Technology“, 1991, Chapter 6, Seite 95-137.

4.4-2 „Metals Handbook Ninth Edition Volume 12 Fractography“, ASM, Metals Park Ohio“, 1987, Seite 118, 119, 112, 113, 744.

4.4-3 „Metals Handbook Ninth Edition Volume11 Failure Analysis and Prevention“, ASM, Metals Park Ohio“, 1986, Seite 111.

4.4-4 L. Engel, H. Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, Carl Hanser Verlag München, Wien, 2. Auflage 1982, ISBN 3-446-13416-6, Seite 15, 36, 42-46, 80, 81-97.

4.4-5 A. Rossmann, „Schadenuntersuchung und Schadenverhütung an Bauteilen der Ingenieurkeramik“, aus J. Grosch „Schadenskunde im Maschinenbau“, Expert Verlag, 1. Auflage 1980, ISBN 3-8169-1202-8, Seite 76-96.

4.4-6 E.J. Pohl, „Das Gesicht des Bruches metallischer Werkstoffe“, Allianz Versicherungs AG und Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft,1956, Band 1 und 2.

4.4-7 E.J. J. Broichhausen, „Schadenskunde, Analyse und Vermeidung von Schäden in Konstruktion, Fertigung und Betrieb“. Hanser Verlag München,Wien, 1985, ISBN 3-446-13409-3, Seite 110.

4.4-8 D.W. Richerson, „Modern Ceramic Engineering“. Verlag, Marcel Dekker Inc., New York und Basel, Seite 325-375.

4.4-9 D.J. Wulpi, „Torsional Fractures of Shafts“. Zeitschrift „Metal Progress“, August 1981, Seite 25-31.

4.4-10 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 3, ISBN 3-00-017733-7. 2000, Eigenverlag ‘Turboconsult’, Kapitel 13 und 14.

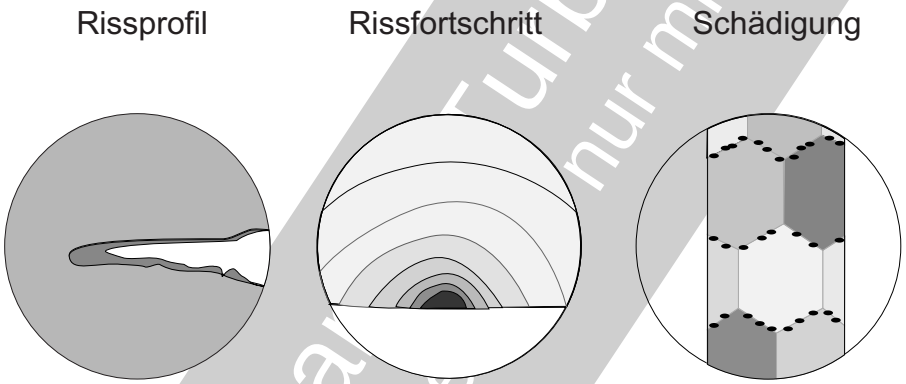
4.4-11 J.Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau, Charakteristische Schadensursachen-Analyse und Aussage von Schadensfällen“, ISBN 3 - 8169 - 1202 - 8 TAE Kontakt&Studium Band 308, Expert Verlag, Seite 33, 34.

4.4-12 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken“, Band 2, ISBN 3-00-008429-0. 2001, Eigenverlag ‘Turboconsult’, Kapitel 7.2.2.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

4.5 Lebensdauerabschätzung, Restlebensdauer

Es gibt viele Indizien die für die Abschätzung einer Restlebensdauer nutzbar sind.



Die **Lebensdauer eines Maschinenelements** wird von der **Veränderung seiner Betriebseigenschaften** bestimmt. Überholungs- und Reparaturkosten lassen sich nennenswert senken, wenn es gelänge, **vor Ort, möglichst im eingebauten Zustand, den Bauteilzustand ausreichend zuverlässig zu ermitteln**. Eine so gewonnene Aussage über die **noch zu erwartende Lebensdauer** wäre der Schlüssel zur Restlebensdauer. Das käme besonders der **Logistik** zugute. Beispielsweise mit einer Optimierung von Überholintervallen, Einsparung von Ersatzteilkosten, Verkleinerung der Ersatzteilhaltung und Eingrenzung von Reparaturarbeiten. Nicht zuletzt wird das Vertrauensverhältnis zwischen Hersteller bzw. Reparaturshop und Betreiber weiter verbessert. Grundsätzlich ist eine Voraussetzung für die erfolgreiche, d.h. praktisch einsetzbare Abschätzung der Restlebensdauer, dass die Schädigung ausreichend langsam bzw. kontrollierbar fortschreitet (Bild 4.3-1). Ein Beispiel ist die Kriechporenbildung (Bild 5.3.2-6 und Bild 5.3.2-7). Die Abwchätzung der Restlebensdauer wird bei einer beschleunigten Schädigung, z.B. einem Risswachstum in einer Rotorscheibe , besonders problematisch (Bild 4.3-3 und Bild 4.3-11).

Steht die Frage nach dem **Heißteilzustand** (z.B. Erhitzerrohre) wegen deren hoher Belastung und begrenzter Lebensdauer im Vordergrund, sind zur Beurteilung des Zustands, neben den **maßlichen Veränderungen** durch Kriechverformung (Bild 5.3.2-4), folgende (potenzielle) Schädigungen relevant:

· Rissbildung außen und innen (Bild 5.3.2-7 und Bild 5.4.2.1-9).

. Verformungen (Bild 5.3.2-3 und Bild 5.3.2-10).

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

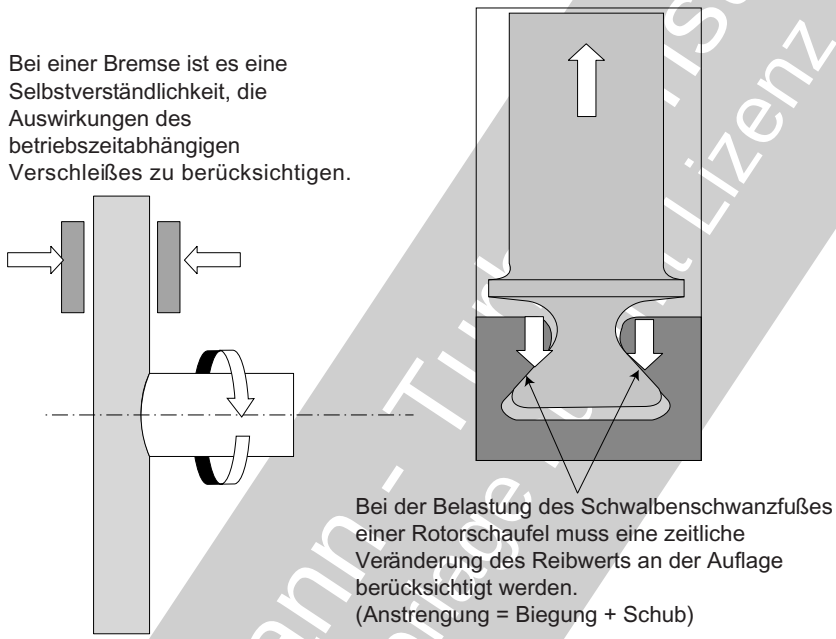
- Gefügeveränderungen (Bild 5.3-3, Bild 5.3-4 und Bild 5.3.2-8).
- Kriechschädigungen (Bild 5.3.2-6, Bild 5.3.2-7 und Bild 5.3.2-9).
- Oxidation und Heißgaskorrosion (Bild 4.4-14, Bild 5.3-3, Bild 5.3.1-0, Bild 5.3.1-4 und Bild 5.3.2-5).
- Beeinträchtigung der Kühlung, z.B. Verstopfung der Zuführung .
- Schädigung von Schutzschichten (Bild 4.2-1 und Bild 5.6.1.2-3).

Heute gibt es zur Abschätzung der Restlebensdauer zwar eine Vielzahl neuer sowie entscheidend verbesserter konventioneller Verfahren im Labormaßstab. Dies reicht jedoch nicht für eine Anwendung unter den typischen Überholungsbedingungen einer Gasturbine vor Ort aus. Solche Verfahren sind:

- **Thermografie,** hat sich für Aussagen über **Struktur und Haftung von Auflageschichten** (z.B. Thermobarrieren/Wärmedämmschichten) bereits im Serieneinsatz bewährt.
- **Räumliche Vermessung** komplexer Geometrien mit einem Laser. Damit rückt die Möglichkeit näher, **lebensdauerbestimmende Kriechverformungen** an der Beschaufelung oder die Beeinträchtigungen der **Schaufelkühlung** (z.B. Zusetzen, innere Oxidation) festzustellen.
- **Mikrofokusröntgen** ist inzwischen ein Standardverfahren der Neuteil-Qualitätssicherung. Ihre Funktion könnte als ein Röntgen-Vergrößerungsglas beschrieben werden. Für die Anwendung vor Ort, um innere Risse in der Beschaufelung festzustellen, sind jedoch leicht transportable Geräte erforderlich, die eine sofortige Bildauswertung ermöglichen.
- **Luftdurchsatzmessungen** an Einzelschaufeln könnten ebenfalls wichtige Hinweise auf die Kühlstruktur und damit auf die thermische Schaufelbelastung geben. Eine verlässliche Anwendung vor Ort würde aber zumindest einige Entwicklungsarbeit erfordern.
- Besonders wichtig wären zuverlässige Verfahren, die eine Aussage über den **Zustand von Schichten**, insbesondere von **Oxidationsschutzschichten** und **Wärmedämmschichten**, erlauben. Inwieweit hier angepasste Wirbelstrom- und Ultraschallverfahren eine Chance bieten, wäre zu prüfen. Mit Sicherheit ist die Entwicklung der Prüftechnologien eine interdisziplinäre Aufgabe, in die der Hersteller, der Betreiber und fachkundige Institute einzubeziehen sind.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Leihgabe mit Lizenz

4.5.1 Veränderung der Werkstoffeigenschaften im Betrieb.



Das Bewusstsein,**Werkstoffeigenschaften sind in vielen Fällen über den Betriebszeitraum nicht als gleichbleibend** anzusehen, ist nicht selbstverständlich. Im Gegenteil, merklich oder unmerklich ist mit einer Verschlechterung gegenüber den Auslegungsdaten zu rechnen. Dies gilt natürlich auch für Werkstoffeigenschaften die nicht in der Auslegung berücksichtigt wurden bzw. werden konnten.

Dies ist nicht nur für die Neuteilauslegung und das Schadensrisiko von Bedeutung. Es bestimmt auch den Umfang von **Reparaturen** bzw. die **Reparierbarkeit**. Die Tabelle in Bild 4.5.1-1 zeigt typische Werkstoffveränderungen, deren Ursachen und Auswirkungen.

Ein weiterer Aspekt ist das unberücksichtigte Verhalten bei einer bestimmten Betriebsbeanspruchung. Typisches Beispiel ist die Versprödung bei einer Hochgeschwindigkeits-/Stoßbeanspruchung (Kapitel 5.2.2, Bild 5.2.2-1). Hierfür sind besonders niedrig legierte Stähle (Baustähle, Bild 5.2.2-8) und Kunstharze (Duromere und Thermoplaste) empfindlich. Dies ist bei der Auslegung von **Berstschutzeinrichtungen** (z.B. an Werkzeugmaschinen (Bild 3-15) und Bauteilen, deren Funktion die **Aufnahme von Aufschlagenergien** (z. B. Flugzeugzellen, Nasenconus von Triebwerken) umfasst.

Bild 4.5.1-1: *Natürlich wird das* ***Werkstoffverhalten*** *und damit Eigenschaften und Lebensdauer vom* ***Betrieb*** *beeinflusst. Trotzdem besteht die Gefahr, dass insbesondere der unerfahrene Konstrukteur sich lediglich auf die* ***Funktion*** *des neuen Bauteils/Maschinenelements bei der Auslegung konzentriert. Diese Funktion muss jedoch über die gesamte vorgesehene Lebensdauer sicher gewährleistet sein, obwohl sich funktionsrelevante Eigenschaften schadensauslösend verändern können. Das lässt sich übergeordnet als* ***Betriebstauglichkeit*** *bezeichnen. Zu erwartende Eigenschaftsveränderungen müssen also berücksichtigt werden. Das erfordert* ***Erfahrung****, insbesondere wenn sich die Effekte gegenseitig beeinflussen. Fehlt sie, werden* ***bauteil-***

© Axel Rossmann - Turbo Consult als Schulungsunterlage mit Lizenz

spezifische, repräsentative/realitätsnahe Versuche *unausweichlich. Nachfolgend werden typische, betriebsbedingte Werkstoffveränderungen näher betrachtet.*

Festigkeit*:*
Bruchfestigkeit *(Kurzzeitbelastung). Bei ausreichender Betriebstemperatur kann sich werkstoffabhängig das Gefüge eines Metalls bleibend verändern. Die Aushärtungsphase von aushärtbaren Legierungen (z.B. Aluminium, Nickel, hochlegierte Stähle) kann sich vergröbern und/oder beeinflusst von Temperaturgradient und Belastungsrichtung orientieren.*
Kriechfestigkeit *(Langzeitbelastung oberhalb einer werkstoffspezifischen Temperatur, Bild 5.3.2-1): Zunächst kann die Zeit- und Temperaturabhängige Kriechdehnung (Bild 5.3.2-3) als Indiz für eine Schädigung dienen und lässt sich mit Hilfe einer geeigneten Zeitstandkurve des betroffenen Werkstoffs bewerten. Das Problem ist jedoch, dass die Kriechverformung nicht immer mit befriedigender Genauigkeit messbar ist. Das ist der Fall, wenn es bei einer komplexen Bauteilgeometrie zum Verzug und nicht zu einer gleichmäßigen Längendehnung kommt.*
Im ***Gefüge*** *treten auch Schädigungen auf (Bild 5.3.2-6 und Bild 5.3.2-8). Häufig beobachtet man eine Porenbildung die zu Mikrorissen wächst. Sie ist bei ausreichender Erfahrung zur Abschätzung der Restlebensdauer bzw. Schädigung geeignet (Bild 5.3.2-9, Lit. 4.5.1-8 und Lit. 4.5.1-9). Durchdringen die Fehlstellen nicht die Oberfläche, ist eine Regeneration mit HIP möglich.*
Schwingfestigkeit *(dynamische Beanspruchung, Kapitel 5.4) reagiert sensibel auf* ***Oberflächenbeschädigungen*** *(Kerben, Kapitel 5.4.4). Diese können auf mehrfache Weise während des Betriebs unvermeidlich entstehen. Dazu gehört Korrosion (Bild 5.6.1-2 und Bild 5.6.1-6). Das gilt auch für Risse in spröden Reaktionsschichten (Bild 5.6.1.4.2-2).*
Diffusionsvorgänge *(Anreicherungen, Verarmung) können je nach Werkstoff den bei Biegeschwingungen höher belasteten Oberflächenbereich schwächen.*
Ungleichmäßige Kriechdehnung *kann in dem belasteten Querschnitt* ***Zugeigenspannungen*** *induzieren, welche als Mittelspannungserhöhung die nutzbare Schwingfestigkeit absenken (Bild 5.3.2-10).*
Wurden ***Verfestigungsverfahren*** *(Kugelstrahlen, Rollen) eingesetzt, baut Kriechdehnung als* ***Relaxation*** *die gewünschten Effekte Festigkeitssteigerung und Druckspannungen ab.*
Ein weiterer Effekt der Relaxation ist das Nachlassen der ***Vorspannung von Schrauben und Federn*** *(Bild 4.5.1-2). Bei Schrauben kann als Folge die Schwingbeanspruchung ansteigen. Ein Versagen von Federn kann beispielsweise die* ***Funktion von Reglern, Sonden und Schaltern*** *beeinträchtigen (Bild 3.3-1.1 und Bild 3.3-3.1 und Bild 3.3-2.1.2).*
Besonders empfindlich sind ***Kunststoffe.*** *Das gilt auch bei Faserverstärkung (FVK). Bereits scheinbar geringe Temperatursteigerungen (wenige °C) können sich extrem schädigend bzw. lebensdauerverkürzend auswirken. Davon sind Eigenschaften wie Kriechdehnung, Zähigkeit (Alterung) und Maßhaltigkeit (Schrumpfen, Quellen) betroffen. Auch eine reversible Veränderung wie bei Aufnahme von Wasser oder Kraftstoff und Reinigungsflüssigkeiten kann sich zumindest zeitweise gefährlich auswirken.*

Eigenspannungen *können sich ab- oder aufbauen. Kriechen in Form einer* ***Relaxation*** *kann Eigenspannungen* ***abbauen*** *(Bild 5.3.2-10). Typische Anzeichen für den Abbau von Makroeigenspannungen (Bild 4.3-15) ist* ***Verzug*** *(Bild 4.5.1-3).*
Mit Relaxation wird auch die Effektivität von ***Verfestigungen/Druckspannungen zur Schwingfestigkeitssteigerung verringert****. Deshalb sind die Betriebstemperaturen solcher Bauteile werkstoffabhängig limitiert (Bild 5.3.2-1). Eigenspannungen können auch durch*

Fortsetzung auf Seite 4.5-6

© Kassmann - TU Berlin
Nur zur Prüfungsunterlage

Werkstoffdaten und -eigenschaften können sich im Betrieb schadensursächlich verändern.

Veränderung	Ursachen/Einflüsse	Auswirkungen	Querverweise
Festigkeit (Metalle) - Bruchfestigkeit	Gefügeveränderung - Phasen Bildung/Auflösung - Ausscheidungen - Vergröberung/Korngröße - Orientierung - Diffusion von Fremdmaterial	- Rissbildung - Risswachstum - Bruch	
- Kriechfestigkeit	Kriechschädigung - Kriechporen, Mikrorisse - plastische Verformung	Funktion Maßänderung - Leck - Lockerung - Verschleiß - Anstreifen	Bild 5.3.2-1 Bild 5.3.2-8 Bild 5.3.2-3 Bild 5.3.2-9 Bild 5.3.2-6 Bild 5.3.2-10
- Schwingfestigkeit	Belastung über Schadenslinie Oberflächenschädigung - Schwingverschleiß (Fretting) - Bildung spröder Schichten Zugeigenspannungen Relaxation: Abbau erwünschter - Verfestigungen und - Druckeigenspannungen	Schwingermüdung/Versagen	Kapitel 5.4 Bild 5.4.3-3 Bild 5.4.3-4 Bild 5.4-11 Bild 4.5.1-2 Bild 5.3.2-10
Eigenspannungen - Abbau - Aufbau	Kriecheffekte /Relaxation Behinderte Verformung/ Temperaturgradienten/ plastische Verformung durch Wärmespannungen	- Schwingrisse/-brüche - Thermoermüdung - Verzug	Bild 5.3.2-1 Bild 5.3.2-10
Zähigkeit - Versprödung - Bruchmechanik	Spröde Phasen Diffusion (Wasserstoff)	- Vorzeitiges Versagen - Schwachstellengröße/ Qualitätssicherung	Kapitel 5.7
Festigkeit (Kunststoffe) - Versprödung - Erweichung - Haftfestigkeit	Alterung Quellen Schrumpfen Wasseraufnahme bei FVK	- Versagen - Klemmen - Lockern - Ablösung von Schichten	
Korrosion - Empfindlichkeit - Elementbildung - Schutzschichtabbau	Elementbildung Schutzschichtabbau Korngrenzenveränderung Verschmutzungen Betriebsatmosphäre	- Verstärkte Schädigungen - Unerwartetes Verhalten - Nutzungsdauer verkürzt - Tribologie	Bild 5.6.1-5 Kapitel 5.6.3-1 Bild 5.6.3.2-1
Magnetische Eigenschaften - Permeabilitätsänderung (Anstieg, Abfall)	Gewaltüberlastung von Bauteilen/plastische Verformung Oxidation (Sulfidation) Temperatur/Gefüge	- als zerstörungsfreier Schädigungsnachweis nutzbar. - Späneansammlung, Lagerlebensdauer	Kapitel 5.12 Bild 5.12.1-2
Tribologisches Verhalten - Reibbeiwertänderung - Verschleiß	Abrieb Alterung/Oxidation Chemische Reaktionen Oberfläche, Rauigkeit	- Gleitverschleiß, z.B. bei Anstreifsystemen - Reibverschleiß - Reibungsdämpfung	Kapitel 5.9 Bild 5.9.3-2 Bild 5.9.3-4
Wärmeleitfähigkeit - Isolation	Kristallisation Diffusion Verunreinigungen	Effektivität von Wärmedämmschichten Überhitzungen	Bild 5.3.2-4 Bild 5.6.1.4.2-5
Wärmestrahlung - Reflexion, Absorption, - Durchlässigkeit	Oxidation Verfärbung Betriebstemperatur	Überhitzungen - Verschlechterte Kühlung - intensivere Aufheizung	
Volumenänderung	Gefügeveränderung (Temperatur) - Aushärtung, - Martensitbildung	bei engen Toleranzen - Klemmen, - Fressen bei	
Reparatureignung - Schweißen - Zerspanen - Verformen - Ätzen	Gefügeveränderung Schädigungen Diffusion an der Oberfläche	- Reparatur eingeschränkt, - Kein Neuteilverhalten reparierter Teile	

Bild 4.5.1-1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fortsetzung von Seite 4.5-4

Kriechen entstehen. Beispielsweise wenn sie durch Kriechen bei ***Wärmespannungen*** *entstanden sind. Nach dem Abkühlen findet man in den plastisch gedehnten Zonen Druckspannungen, die mit Zugspannungen in den ursprünglich kälteren Bereichen im Gleichgewicht stehen..*

Zähigkeit *(Duktilität, plastische Verformbarkeit): Diffusion* ***im Inneren*** *lässt versprödende Gefügeveränderungen wie intermetallische Phasen (bei Stählen z.B. σ -Phase) entstehen. Bei entsprechenden Betriebstemperaturen sind die Werkstoffe auch auf diese Neigung zu beurteilen.* ***Stähle*** *höherer Festigkeit können bei Korrosion oder Reaktionen mit Umgebungsmedien durch* ***Wasserstoffaufnahme*** *verspröden (Kapitel 5.7).*
Diffusion ***an der Oberfläche****, z.B. durch Sauerstoffaufnahme bei* ***Titanlegierungen****, kann diese Verspröden und damit über eine Rissbildung bei plastischen Verformungen die Schwingfestigkeit absenken.*

Korrosion*: Bei ungünstigen Werkstoffkombinationen kommt es in wässrigen Medien zur* ***Elementbildung*** *(Bild 5.6.1-5) mit der Gefahr von Korrosionskerben mit Schwingfestigkeitsabfall. Angriff durch Heißgas (Heißgaskorrosion, Kapitel 5.6.1.4) kann als Sulfidation auch massive Querschnitte zerstören (Bild 5.6.1.4.2-1). Sind die Bauteile mit einer* ***Schutzschicht*** *versehen, richtet sich die Betriebslebensdauer auch gegebenenfalls nach einer Schädigung wie Abzehrung. Typische Beispiele sind bei Einwirkung wässriger Medien eine* ***Zinkschicht*** *und im Heißgas* ***Diffusionsschichten*** *mit Aluminium und Chrom.*

Magnetische Eigenschaften *können sich im Betrieb verändern. So kann eine* ***plastische Kaltverformung*** *unmagnetische Stähle (hochlegiert) als Folge einer Gefügeveränderung magnetisch werden lassen. Ni-Legierungen werden mit einer Gefügeveränderung durch* ***Sulfidation*** *magnetisch, was sich als zerstörungsfreier Nachweis nutzen lässt. Ist die* ***Betriebstemperatur ausreichend hoch,*** *kann eine Gefügeänderung die magnetischen Eigenschaften ebenfalls beeinflussen.*
Der Magnetismus eines Bauteils kann sich als Folge von Stromdurchgang (z.B. Wälzlager bei Blitzdurchgang, Bild 5.12.2-3) oder einwirkender Magnetfelder verändern.Die Folge sind z.B. das Ansammeln magnetischer Verunreinigungen des Schmieröls und damit eine verkürzte Lebensdauer von Wälzlagern.

Tribologisches Verhalten *(Kapitel 5.9): Reibbewegungen konnen sich als Verschleiß und Werkstoffschädigung auswirken. Maßänderungen auf Sitz- und Gleitflächen führen durch verschlechterte Auflage/Kraftübertragung (Bild 5.9.3-2) und Relativbewegungen wie Stöße zum* ***Belastungsanstieg****. Zusätzlich kann die Schädigung der Oberfläche in Form eines werkstoffspezifischen* ***Schwingfestigkeitsabfalls*** *erheblich sein (Bild 5.9.3-4). Eine Veränderung der Reibung wirkt sich auch auf die* ***Schwingungsdämpfung*** *aus. Fällt diese ab, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit gefährlicher Resonanzschwingungen.*

Wärmeleitfähigkeit/Wärmeisolation*: Eine Veränderung kann den „Wärmehaushalt“ eines Bauteils bedenklich beeinflussen. Beispiel ist die* ***Oxidation in Kühlluftkanälen****. Die Oxidschicht wirkt als Isolator und verhindert den auslegungsgemäßen Abtransport der Wärme durch die Kühlluft. Wie gravierend sich dies auswirkt wird verständlich, wenn man die Halbierung der* ***Kriechlebensdauer*** *(Zeitstand) bei ca. 12 °C Temperaturanstieg betrachtet (Bild 5.3.2-4).*
Eine Veränderung von ***Wärmedämmschichten*** *(Bild 5.6.1.4.2-5) lässt einen ähnlichen Effekt erwarten. Dies gilt nicht nur für eine Strukturänderung, sondern auch bei Verringerung der Schichtdicke. Hier ist in erster Linie Erosion durch Ausbröckeln und/oder Partikel zu nennen. Ein weiterer Einfluss ist eine* ***Oxidation***

© Krupp Stahl - Tutorium
Abbildungsunterlagen urheberrechtlich geschützt

der Haftfläche *zwischen Schicht und Grundmaterial. Sie führt letztendlich zum* ***Abplatzen*** *der Schicht und damit in die Nähe eines kurzfristigen katastrophalen Bauteilversagens.*

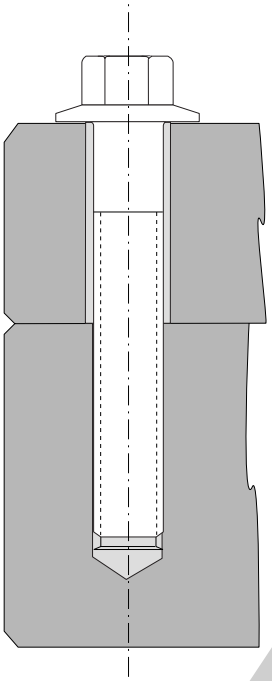
Wärmestrahlung *beeinflusst Strahlungsabsorption als auch Reflexion. Das ist für die Auslegung eines Heißteils (Aufheizung/Wärmeaufnahme) von Bedeutung. Nicht zu vernachlässigende Einflüsse sind Ablagerungen und Oxidschichten.*

Volumen-/Maßänderungen*: Diese Gefahr ist gewöhnlich nicht bewusst, bis es zu Betriebsschäden kommt. Typischer Fall ist die* ***Volumenvergrößerung gehärteter Stähle*** *durch 'Umklappen' von* ***Restaustenit****. Mit ihm ist zu rechnen, wenn das Bauteil nicht eine geeignete Wärmebehandlung oder* ***Tiefkühlung*** *(-25°C) im Fertigungsprozess erfuhr. Die relativ geringe Volumenvergrößerung ist bei eng tolerierten Spielen wie bei* ***Reglerschiebern/-ventilen*** *oder* ***Kraftstoffeinspritzungen*** *(Pumpen) in der Lage die* ***Bewegung zu blockieren****. Auch aushärtbare* ***Ni-Legierungen*** *können mit der Veränderung der Aushärtungsphase (γ '-Phase) das Volumen mit bedenklichem Einfluss auf Maße verändern. Ein solcher Fall ist die* ***Lockerung von Passsitzen*** *mit großem Durchmesser.*

Reparatureignung*: Dieser Gesichtspunkt ist nicht unbedingt naheliegend, aber von erheblicher Bedeutung für die Betriebstauglichkeit.* ***Gefügeveränderungen****, Mikrorissbildung und Oxidation kann* ***Reparaturschweißungen*** *sehr erschweren. Das gilt beispielsweise für eine ungünstige Veränderung der Aushärtungsphase von Ni-Legierungen.* ***Diffusionsvorgänge*** *an der Bauteiloberfläche können* ***Reparaturbeschichtungen*** *vereiteln.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
Weitergabe nur mit Lizenz

4.5.1.1 Relaxation und „Setzen“.



Eine Verschraubung aus einer hochfesten Aluminumlegierung hält bei Magnesiumbauteilen die Vorspannung deutlich besser als Stahlschrauben.
Das ist auf einer geringere Relaxation zurückzuführen, weil bei Betriebstemperaturen um 150°C die Wärmedehnungen besser passen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Zu diesen zeitabhängigen Veränderungen gehören Effekte die auf das **Kriechen** (Kapitel 5.3.2), der plastischen **Verformung unter Belastung**, zurückzuführen sind. Sie begegnen uns in Maschinenelementen und Bauteilen häufiger als zunächst vermutet. Das umso mehr, als in steigendem Maß Maschinenelemente wie Schrauben in anwendungsspezifischen Werkstoffen wie Titan, Messing, rostfreiem Stahl, faserverstärktem (FVK) oder unverstärktem Kunststoff angeboten und insbesondere im Leichtbau genutzt werden. Dabei sind Bereiche der Sportgeräte (z.B.Fahrräder, Fahrzeuge des Motorsports) besonders zu nennen. Beim Begriff ‘**Setzen**’ spielen Anformungen der Rauigkeitsspitzen von Dichtflächen unter hohen Flächenpressungen sowie die Anlage von Gewinden und Federn eine Rolle. Durch Relaxieren werden

- Eigenspannungen abgebaut.
- Verfestigung gemindert,
- treten plastische Verformungen (Längungen, Stauchungen) und
- Verzug auf.

Damit werden Schwingfestigkeit, Vorspannungen, tribologische Effekte, Effektivität von Dichtungen und die Maßhaltigkeit beeinflusst. Ein Abbau unerwünschter (Zug-)Eigenspannungen erfolgt durch **Spannungsarmglühen** in der Fertigung, z.B. bei Schweißkonstruktionen.

Diese Probleme wachsen mit der Höhe der Belastungen/Spannungen, **Betriebstemperatur**, leichteren **Werkstoffen** und der ‘Bauteilertüchtigung’ durch **Oberflächenverfestigung.** Betroffen sind Bauteile wie**: Schrauben, Federn** und **Flanschdichtungen**.

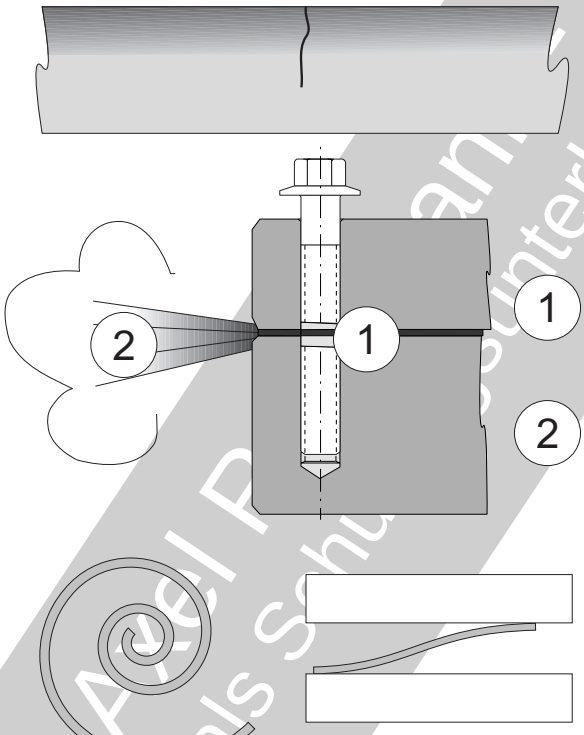
Der entscheidende Einfluss ist die Betriebstemperatur. Ab einem Temperaturbereich, der beim 0,4-fachen der Schmelztemperatur (siehe auch Bild 5.3.2-1) liegt, wirkt sich ein Anstieg auf die Kriechdehnung, d.h. bei verspannten Systemen auf den Spannungsabbau exponentiell aus. Es gilt:

Mit 12 ° C Temperanstieg verdoppelt sich die Kriechdehnung, d.h. bei 24 °C ist mit einer plastischen Verformung um das 4-fache zu rechnen. In Bild 5.3.2-2 sind werkstoffspezifische Betriebstemperaturen, ab denen mit merklicher Relaxation zu rechnen ist, angegeben.

Relaxation kann böse Überraschungen auslösen indem unbewusst genutzte Vorteile verschwinden.

Kaltverfestigen durch
plastische Oberflächenverformung
Kugelstrahlen, Rollen, Spanende Bearbeitung (z.B. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung).
Halbzeugherstellung: Ziehen, Strangpressen, Tiefziehen

Es entstehen oft unbewusst genutzte Eigenschaften
- Druckeigenspannungen
- Festigkeits- /Härteanstieg



Schwingbrüche weil die Vorteile der kaltverfestigten Oberfläche im Betrieb durch Relaxation verloren gehen.

1 Nachlassen der Schraubenvorspannung mit Gefahr der **Schwingermüdung**

2 **Undichtigkeit** von Flanschdichtungen durch 'Setzen'

Nachlassen einer **Federwirkung** bei Dichtungen, elastischen Abstützungen und Kontakten

Bild 4.5.1-2

Bild 4.5.1-2: *Relaxation ist ein Spannungsabbau durch Kriechdehnung. Es handelt sich um einen* ***dehnungsgesteuerten Vorgang*** *in einem* ***verformungsbehinderten System****. Ein solches System liegt bei Eigenspannungen und Wärmespannungen in einem Bauteil, in Schraubenverbindungen und verspannten Federn vor. Relaxation kann als Langzeitphänomen wichtige Konstruktionseigenschaften bis zum* ***Ausfall der Funktionstauglichkeit*** *verändern (Bild 4.5.1-3).*

Abbau von Eigenspannungen*: Unerwünscht sind gewöhnlich nur* ***Zugeigenspannungen.*** *Wenn sie sich zu den Betriebsspannungen addieren und so die Mittelspannung erhöhen, sinkt die nutzbare Schwingfestigkeit (Bild 5.4.3.2-4). Deshalb ist ein* ***Zugspannungsabbau****, beispielsweise mit Hilfe einer* ***Spannungsarmglühung*** *erwünscht. Dazu wird bei Schweißungen eine Wärmebehandlung durchgeführt.. Im Bauteil läuft dabei Folgendes ab. Beim Aufheizen sinken die (Eigen-) Spannungen entspre-*

© Axel Rosemann Turbocons
als Schutzgrundlage nur mit Lizenz

chend einem Abfall des Elastizitätsmoduls. Dieser Effekt ist bei ausreichend hoher, werkstoffspezifischer Temperatur zeitabhängig. Die Spannungen sinken auf die zugehörige ***Kriechgrenze****. Nach der Abkühlung ist das verbleibende* ***Eigenspannungsniveau*** *noch von der Änderung des temperaturabhängigen* ***Elastizitätsmoduls*** *beeinflusst. Dieser steigt üblicherweise bei der Abkühlung an.* ***Resteigenspannungen*** *steigen also bei gleichbleibender elastischer Dehnung im kalten Bauteil wieder an.*

Werden jedoch die ***erwünschten, Schwingfestigkeit steigernden Druckeigenspannungen*** *reduziert, kann dies zu Rissbildung und Versagen unter dynamischer Betriebsbeanspruchung führen (Skizze oben). Solche schützende Druckeigenspannungen können bewusst oder unbewusst eingebracht worden sein. Gewöhnlich handelt es sich um Kaltverfestigung mit Kugelstrahlen oder Rollen. Sie verformen die Oberfläche plastisch. Neben einer* ***Festigkeitssteigerung*** *entstehen* ***Druckeigenspannungen****. Unbewusst können zerspanende Verfahren wie Drehen und Fräsen Druckeigenspannungen erzeugen, welche, ohne dass dies erkannt wird, die Bauteilsicherheit erst 'garantieren'. Überschreiten diese Bauteile eine werkstoffspezifische Betriebstemperatur (Bild 5.3.2-1) kommt es zu einem merklichen Spannungsabbau. Damit verringert sich der schützende Effekt.*

Abbau von Schraubenvorspannung *ist ein Problem thermisch belasteter Verschraubungen. Auch hier führt Kriechen zur plastischen Längung. Die Schraubenverbindung mit geringerer Vorspannung wird von dynamischen Betriebsspannungen höher belastet, was das Risiko eines Schraubenbruchs erhöht (mittlere Skizze).*

Federn *können sich bei Relaxation „****setzen****". Sie verlieren ihre Vorspannung und damit die Funktion. Ein Beispiel sind Federn in Sonden und Relais (Skizze unten).*

Bild 4.5.1-3: *Relaxation kann unterschiedliche Effekte auslösen.*

Induzierung von Eigenspannungen *in Heißteilen mit hohem Temperaturgradient. Als Beispiel dient ein Rohr eines Kessels (Skizze oben). Die heiße Oberfläche dehnt sich aus und wird dabei von der kalten Innenseite behindert. Liegen die Druckspannungen im plastischen Bereich, kommt es durch Relaxation zur bleibenden* ***Stauchung****. Beim Abkühlen entstehen im gestauchten, d.h. verkürzten Bereich Zugeigenspannungen, die mit Druckeigenspannungen in der kalten Zone (im Inneren) im Gleichgewicht stehen.*

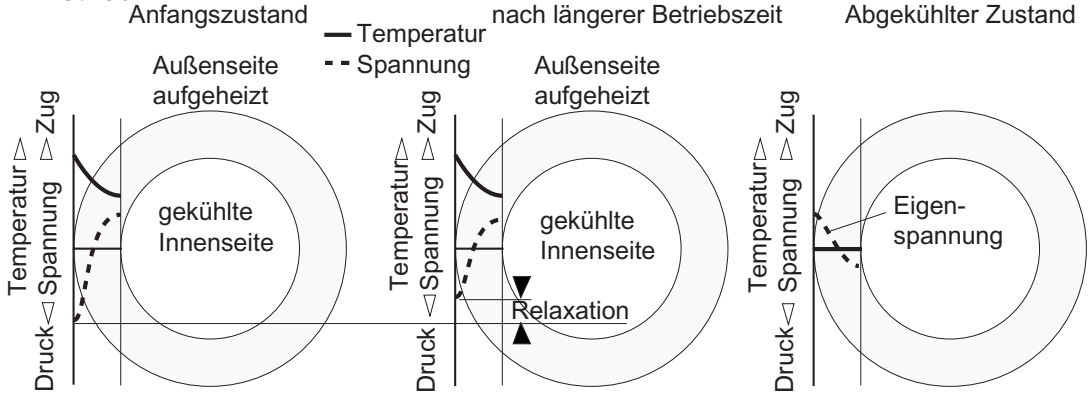
Führt Relaxation zum ***Eigenspannungsabbau*** *wird das Spannungsgleichgewicht gestört. Es kommt zum* ***Verzug,*** *der erneut ein Spannungsgleichgewicht in diesem geschlossenen System herstellt (Skizzen Mitte). Bei einem erfolgreichen Spannungsarmglühen ist also auch mit einem Verzug zu rechnen. Dieser lässt sich mit geeigneten Glühvorrichtungen minimieren.*

Die Absenkung der Schwingfestigkeit als Folge des ***Abbaus erwünschter Druckeigenspannungen*** *durch Relaxation wird in Bild 4.5.1-2 behandelt.*

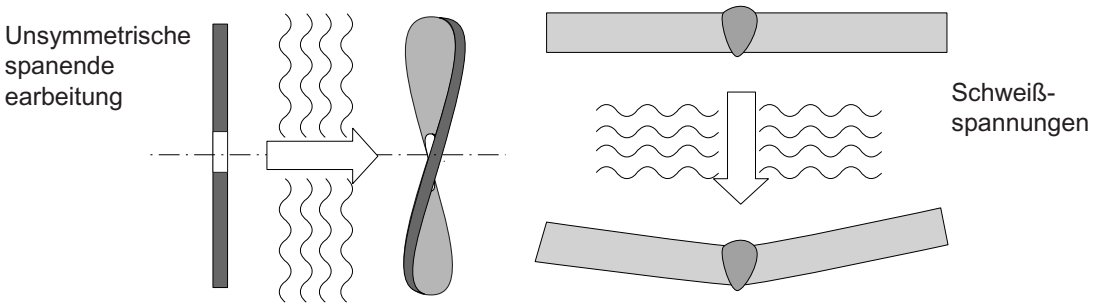
© Axel Rossmann - Technische Universität Clausthal
Das Schulungsinterface zur Lebensdauerabschätzung

Relaxation hat viele Gesichter die dem Konstrukteur bewusst sein müssen.

Entstehung von Eigenspannungen als Folge der Relaxation von Wärmespannungen im Betrieb



Verzug durch Relaxation von Eigenspannungen bei Erwärmung



Versagen durch **Schwingermüdung** an der Oberfläche kaltverfestigter Bauteile durch Relaxation bei Betriebstempeatur

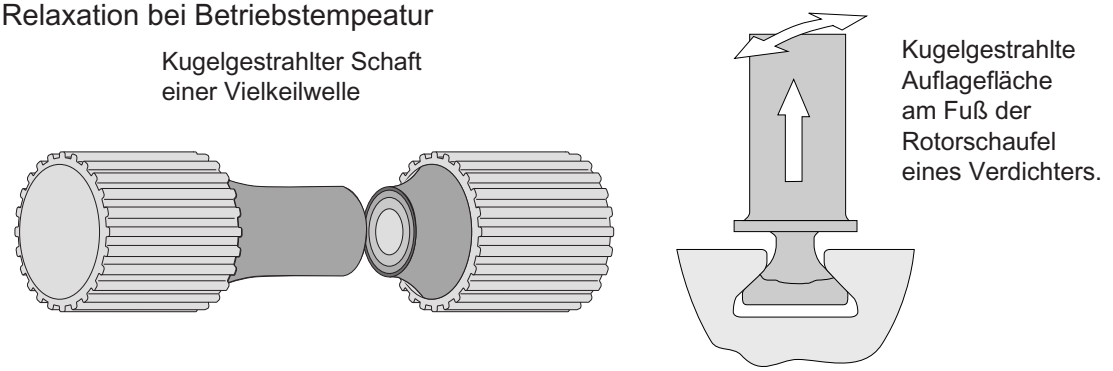


Bild 4.5.1-3

Literatur zu Kapitel 4.5.1

4.5.1-1 W.Scheiding, „Verschrauben von Magnesium braucht mehr als Allgemeinwissen - Was Konstrukteure wissen und beachten sollten“, Zeitschrift: „ke konstruktion + engineering“, Juni 2001, Seite 1-8.

4.5.1-2 K.Westphal, „Verschrauben von Magnesiumkomponenten“, Zeitschrift: „Metall, 56. Jahrgang - 1-2/2002, Seite 32-34.

4.5.1-3 „Verbindungselemente aus Aluminium“, Fa. Acument™ Global Technologies Europe, 06-2009, www.acumenteurope.com.

4.5.1-4 „Aluminiumschrauben für Leichtbaukonstruktionen“, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Artikeldienst 9 - Januar 2003, www.aluinfo.de, Seite 1-6.

4.5.1-5 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, ISBN 3-00-017733-7, 2000, Kapitel 12.5.

4.5.1-6 B.Kaiser, „Ermittlung von Dauerfestigkeits- und Relaxationsschaubildern für hochbeanspruchte Schraubendruckfedern“, Vorhaben AIF 12 287 N, 2002, Materialprüfanstalt Darmstadt, Seite 1-6.

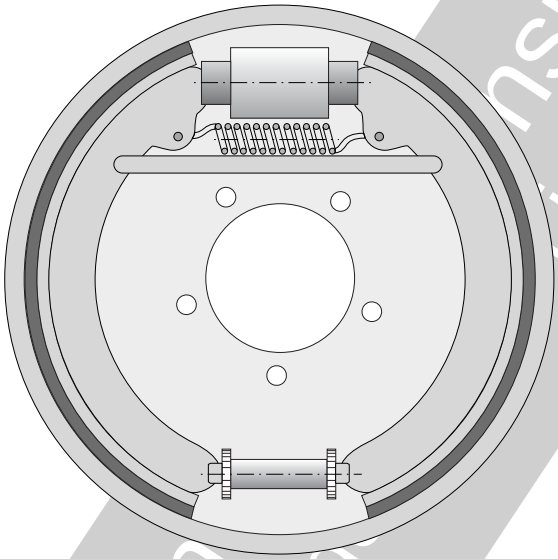
4.5.1-7 P.Thomsen, „Flansch-, Schrauben- und Dichtungstechnik - Dichtung und Flanschauswahl - Flanschverbindungen und Drehmomente für Schrauben“, Version 2010.

4.5.1-8 H.Weber, „Die Bedeutung verbrauchter Lebensdaueranteile und von Zeitstandschäden für die weitere Verwendungsfähigkeit betriebsbeanspruchter Bauteile aus warmfesten Stählen“, Berichtsband der Diskussionstagung „Bruchuntersuchung und Schadenklärung“ in der Allianz-Zentrum für Technik GmbH (AZT) am 20/21 November 1975, Seite 146-154.

4.5.1-9 H.Tipler, „The Influence of Purity and Creep Behaviour on Some Characteristics of Grain Boundary Cavitation in 1Cr-1Mo-1/4 V Steels“, Berichtsband der Diskussionstagung „Bruchuntersuchung und Schadenklärung“ in der Allianz-Zentrum für Technik GmbH (AZT) am 20/21 November 1975, Seite 139-145.

© A.Rossmann - Turboconsult
alle Schutzrechte vorbehalten
Nutzung nur mit Lizenz

4.5.2 Lebensdauerabschätzung aus Betriebsdaten.



Selbstverständlich werden Bauteile einer Maschine - entsprechend ihren normalerweise zu erwartenden Betriebsanforderungen - so ausgelegt, dass sie **möglichst lange Laufzeiten** ausreichend sicher erreichen. Dieses **“Lifing“** umfasst als wichtige Schritte die möglichst genaue Bestimmung der zu erwartenden Betriebsbeanspruchungen und deren Berücksichtigung in der **Auslegung** zur Freigabe der sicheren Lebensdauer. Das gelingt umso genauer, je mehr Erfahrungen (Messungen) bei vergleichbaren Maschinen und Betriebsbedingungen vorliegen.

In den meisten Fällen wird die Lebensdauer eines Maschinenelements von der nachlassenden Funktion bzw. Wirksamkeit einer Eigenschaft bestimmt. Typisch ist der Verschleiß an Bremsen und Kupplungen.

Wird aus den Betriebsdaten (z.B. zeitlicher Verlauf von Drehzahlen und Temperaturen, Lastwechsel, Bild 3.3-2.2), die an einer Maschine kontinuierlich **gemessen** wurden, die verbrauchte Lebensdauer und damit auch die Restlebensdauer jedes individuell lebensdauerbegrenzten Bauteils abgeschätzt, spricht man von **“Life Monitoring“** und **„Health Monitoring“** (Bild 3.3-4). Voraussetzung ist die ausreichend genaue Kenntnis der einzelnen Bauteilbelastungen und der zugehörigen Algorithmen sowie eine kontinuierliche Erfassung der notwendigen Betriebsdaten, um daraus den Lebensdauerverbrauch zu berechnen. Bei “Eichung“ der Berechnungen am tatsächlichen Lebensdauerverbrauch ist eine Nachuntersuchung gelaufener Teile möglich (**“Sampling“**). So werden z.B. im Flugtriebwerksbau gelaufene Rotorteile (Scheiben, Spacer) der Maschine entnommen und mit gezielten Belastungen (zyklische Schleuderversuche) die **Restlebensdauer** ermittelt. Diese wird dann mit den Berechnungen verglichen. Man erhofft sich so genauere Angaben über die Auswirkung unerwarteter Schwachstellen und Schädigungen auf die Lebensdauer der Bauteile.

Inzwischen lassen viele Betreiber auch von Industriegasturbinen (schwere Bauweise und Derivate) das Life Monitoring und Life Management bereits über Funk **“Online“ zentral** durchführen. Ein entsprechender Service wird heute vom OEM oder unabhängigen Institutionen angeboten (Lit.4.5.2-1) .

© Axel Rossmann Consult als Schulungsunterlage Lizenz

Lifing und Life Monitoring sind Voraussetzungen für ein erfolgreiches **"Life Management"**. Darunter versteht man die **individuelle Lebensdauerüberwachung der Bauteile**, die Ermittlung ihres momentanen Zustandes und die **Festlegung der Tauschintervalle**. Das Auswechseln von Bauteilen mit abgelaufener Lebensdauer läuft unter dem Begriff **"On Condition**" (Lit 4.5.2-2). Natürlich ist ein solches Vorgehen nur praktikabel, wenn es mit **sinnvollen Überholintervallen** einhergeht und der Aufwand angemessen bleibt.

Eine Besonderheit sind Bauteile wie Rotorscheiben mit entsprechend notwendiger niedriger Ausfallwahrscheinlichkeit bei niedrigzyklischer (Start/Abstellen) Ermüdung (LCF). Unter dieser Belastung im plastischen Bereich kommt es zur frühen Rissbildung an kleinen Fehlstellen und dann zum Risswachstum. Ist die vorgegebene sichere Lebensdauer erreicht, müssen diese Teile ausgetauscht werden. Dabei sind sie in der weitaus überwiegenden Zahl (vielleicht 1 Teil in 1000) fehlerfrei. Sie würden noch mehrere Überholintervalle ermöglichen. Deshalb denkt man seit langem darüber nach, wie solche Teile bei akzeptabler Sicherheit **wiederverwendbar** sind. Das wäre dann möglich, wenn z.B. mit genügender Sicherheit **technische Anrisse** (Bild 4.5.2-1) zerstörungsfrei gefunden werden (Bild 4.5.2-3) und sich danach eine ausreichend lange (bruchmechanisch abgeschätzte) potenzielle **Risswachstumsphase** nutzen lässt. Voraussetzung ist also das hinreichend **zuverlässige und empfindliche Prüfverfahren**. Ein solches ist zur Zeit für die praktische Nutzung nicht vorhanden. Es hängt also von der Weiterentwicklung der Prüfverfahren ab, wann dieses für den Betreiber äußerst kostensparende Prinzip (**"Retirement for Cause"**, Bild 4.5.2-2) zur praktischen Anwendung kommen kann.

Bild 4.5.2-1: *Der Trend zu immer höheren Leistungen und Wirkungsgraden zieht nicht selten auch eine* ***Steigerung der Bauteilbelastungen*** *nach sich. Im konservativen Ansatz der Lebensdauerfestlegung bei* ***zyklisch belasteten*** *Bauteilen wie Rotorscheiben, geht man von der Zeit bis zum Beginn der* ***Ermüdungsrissbildung*** *aus. Als Kriterium dient der* ***technische Anriss****. Es handelt sich um einen Oberflächenriss mit 0,8 mm Länge. Je höher die Beanspruchung, umso kleiner muss die Schädigung oder Schwachstelle im Inneren oder an der Oberfläche sein, von der aus ein Ermüdungsriss wachsen kann. Besonders hoch belastete Bauteile moderner Maschinen (z.B. Rotorscheiben) lassen an einer ausreichend großen Schwachstelle bereits vom ersten Belastungszyklus ein Risswachstum im Mikrobereich erwarten. Dies kann dazu führen, dass die nutzbare zyklische Lebensdauer bis zur Nachweisgrenze des Risses relativ kurz ist.*

Es gibt weder Werkstoff noch Bauteil, bei dem man sicher sein kann, dass es keine Fehler im Bereich der Nachweisgrenze der Prüfverfahren aufweist (Bild 4.5.2-3). Deshalb muss man zur Sicherheit davon ausgehen, dass tatsächlich ein anrissfähiger Fehler in einer hochbeanspruchten Zone vorhanden ist. Die sichere Lebensdauer wird bruchmechanisch auf einen hypothetischen Rissfortschritt bezogen. Sie wird so festgelegt, dass noch genügend Sicherheit bis zu einer Risslänge, die zum Versagen (spontaner Bruch, instabiles Risswachstum) des Bauteils führt, besteht. Man spricht von der ***kritischen Risslänge****.*

Ein Ansatz für die Auslegung der Lebensdauer eines Bauteils verlängert hypothetisch die zulässige Lebensdauer um den Risswachstumsanteil bis zum technischen Anriss. Selbst dann sollte man immer noch ausreichend von einem spontanen Versagen entfernt sein. Eine solche Vorgehensweise wurde aber bisher nur bei ***Risikoabschätzungen im Rahmen von Schadenfällen*** *bzw. akuten Problemen bekannt. Sie hilft auch bei Entscheidungen zu bereits verbauten Teilen. Wenn es sich beispielsweise um Sonderaktionen wie Teiletausch mit einer sofortigen Demontage der Maschine oder die Festlegung von Inspektionsintervallen handelt.*

©AGTSmann-Thermomat
Absolut unterlagsmäßig
Ohne Garantie

Lebensdauerabschätzung/ Restlebensdauer

Wir wissen aus eigener Erfahrung:
Ein Teil mit Rissen kann noch lange gute Dienste leisten.

! nicht jeder Riss verhindert die weitere Nutzung

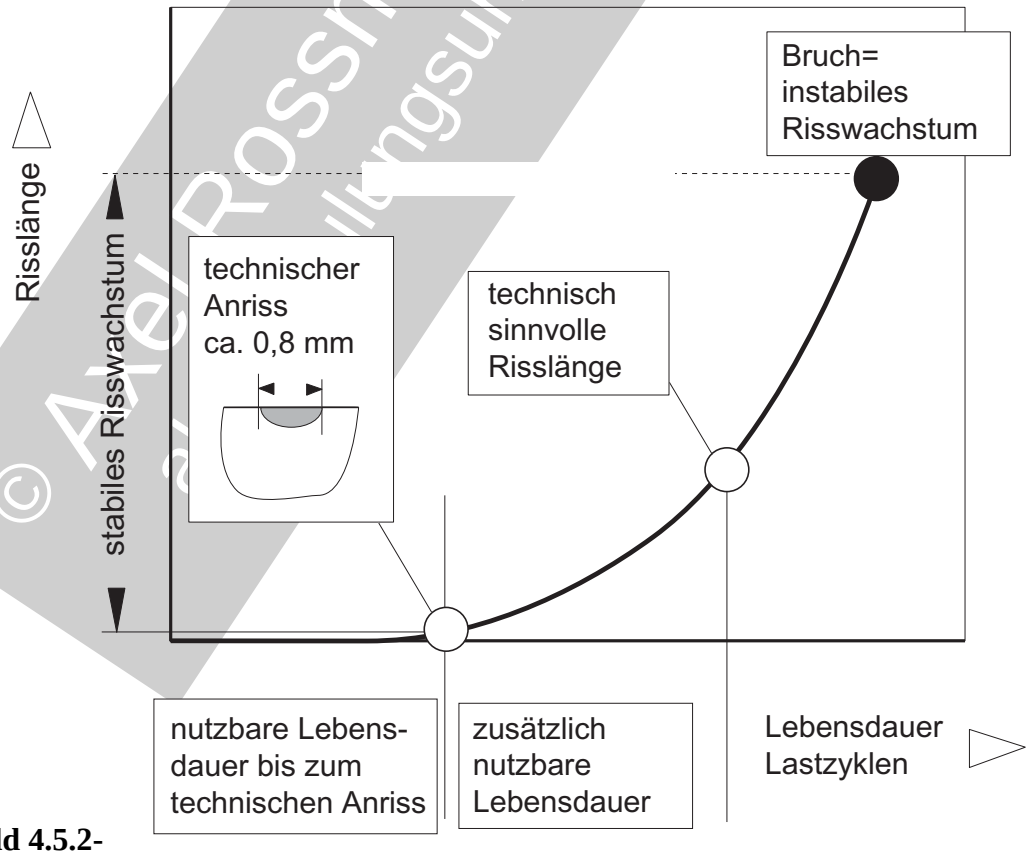


Bild 4.5.2-1

© Axel Rossmann Turboconsult
Nutzung nur mit Lizenz

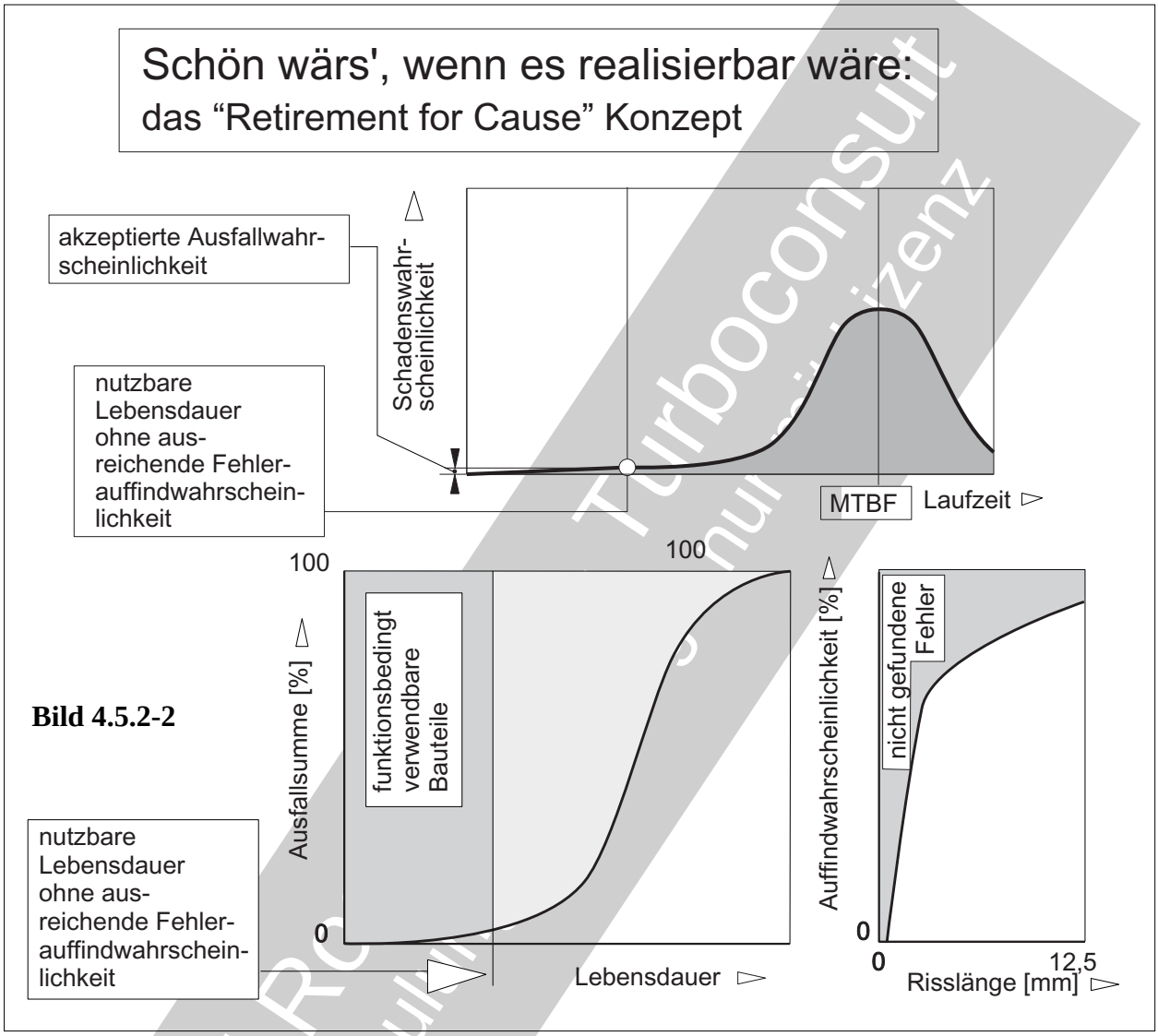


Bild 4.5.2-2

Bild 4.5.2-2: *Das “**Retirement for Cause**“ Konzept bedeutet, dass Bauteile erst wenn es ihr Zustand als Folge einer Schädigung notwendig macht, ersetzt werden (Lit 4.5.2-4). So will man insbesondere das **Lebensdauerpotenzial** des individuellen, durch zyklische Ermüdung lebensdauerbegrenzten Bauteils nutzen und **Ersatzteilkosten minimieren** (Lit 4.5.2-3). Kommerziell besonders interessant sind Rotorkomponenten wie Scheiben von Spitzenlastmaschinen die viele Zyklen ansammeln. Aufgrund der statistischen Sicherheit kann es erforderlich werden, einen Großteil der Scheiben auszutauschen (siehe Diagramm unten links). Die überwiegende Zahl hat aber noch längst nicht (Diagramm oben) eine bedenkliche Schädigung bzw. ihre potenziell nutzbare Ermüdungslebensdauer um die MTBF (**M**ean **T**ime **B**etween **F**ailure) erreicht.*
*Voraussetzung für das Retirement for Cause Konzept ist eine **ausreichend sichere, im praktischen Einsatz geeignete, zerstörungsfreie Prüfung** (ZfP) **der Bauteile**. Die heute serienmäßig verfügbaren Verfahren wie Ultraschall-Röntgen- und Wirbelstromprüfung sind offenbar **noch nicht ausreichend sicher** (Diagramm unten rechts). Das verlockende Konzept konnte sich deshalb nicht durchsetzen.*

© RdR Turboconsult
Nur zur Ausbildung

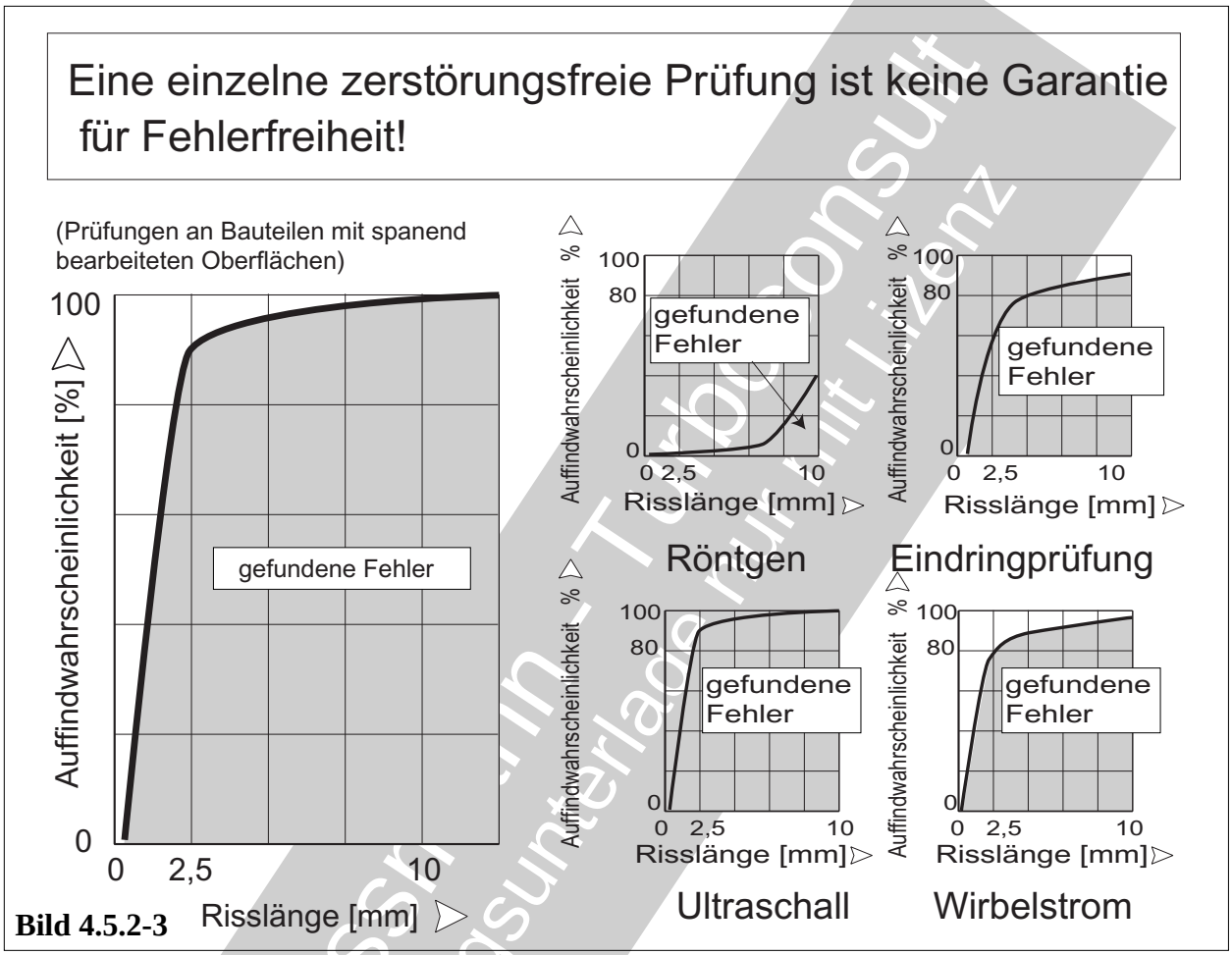


Bild 4.5.2-3

Bild 4.5.2-3 *(Lit. 4.5.2-3 und Lit. 4.5.2-4): Die Diagramme zeigen Trends der* ***Auffindwahrscheinlichkeit*** *(engl.* ***POD = Probability of Detection****) von Oberflächenanrissen. Sie lassen eine erste Einordnung der Zuverlässigkeit der häufigsten zerstörungsfreien Prüfmethoden (ZfP) im Serieneinsatz zu. Es handelt sich um Versuchsergebnisse an Proben aus Aluminium mit kleinen künstlichen Schwinganrissen. Generell gilt, dass sich die Rissgröße bzw. Risslänge und Risstiefe verfahrensspezifisch unterschiedlich auswirken. Eine POD von 100% ist offenbar nur in besonders günstigen Fällen zu erwarten. Das heißt, dass für hochbelastete Bauteile* ***gefährliche Fehler im Millimeterbereich mit einer zerstörungsfreien Prüfung nicht absolut sicher auszuschließen sind*** *(Diagramm oben). Nur von einer Kombination mehrerer Maßnahmen wie unterschiedlichen ZfP, sind die geforderten hohen Sicherheiten zu erwarten.*

Am „unzuverlässigsten“, was die POD kleiner Oberflächenrisse anbetrifft, hat sich im vorliegenden Fall die ***Röntgenprüfung*** *erwiesen (Diagramm unten links). Die beste POD zeigte bei kleinen Oberflächenrissen die* ***Ultraschallprüfung****.*

Weil die dargestellten Literaturangaben bereits älter sind, ist davon auszugehen, dass Ultraschall- und ***Wirbelstromprüfungen*** *mittlerweile Verbesserungen der Technik und der Auswertung erfahren haben. Besonders der Einsatz von Computern für die Auswertung dürfte die POD in einigen Fällen (Ultraschallprüfung, Wirbelstromprüfung) deutlich erhöht haben.*

Trotzdem ist ***auch hier bei Teilen ohne Befund nicht von absoluter Fehlerfreiheit auszugehen****.*

© Axel Rossmann - Turbo Consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 4.5.2

4.5.2-1 Land Instruments International, „Combustion Turbine Blade Temperature Analysis“, www.landinst.com, 21.Sept. 2006.

4.5.2-2 M.P.Boyce, C.B. Mehr-Homji, B. Wooldridge, „Condition Monitoring of Aeroderivative Gasturbines“, ASME Paper 89-GT-36.

4.5.2-3 R.E.Green Jr, „Non-Destructive Methods for the Early Detection of Fatigue Damage in Aircraft Components“, AGARD Lecture Series No. 103 „Non-Destructive Inspection Methods for Propulsion, System and Components“, 23-24 April 1979, London, UK, und 26-27 April Milan, Italy, Seite 6.1-6.31.

4.5.2-4 W.D.Rummel, P.H.Todd Jr.,R.A.Rathke, W.L.Castner , „The Detection of Fatigue Cracks by Nondestructive Test Methods“, Zeitschrift „Materials Evaluation“., 1974, No. 32, Seite 205-212.

© Axel Rossmann TURBOCONSULT
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Sachregister

A

A-posteriori-Wahrscheinlichkeit 3.3 -21
A-priori-Wahrscheinlichkeit 3.3 -20
Abdrücke
für Metallografie und REM 2.2.2.4-8
Abfangen
eines Bruchs 3-22
eines Schadens 4.3-31
Abgasstrahl, Schallermüdung 3-19
Abgrenzung eines Problems bei einer Problemanalyse 2-2.27
Abhilfemaßnahme
bei Fehlern 3.2.2 -4
kritische Planschritte 2.2.2-12
Zuständigkeiten 2.2.2-11
Ablagerungen 1-7
Bruchfläche 4.4-5
Einfluss auf Thermoelement 3.3 -6
Ablaufplan einer Untersuchung 2.2.2.2-1
Abschätzung
Betriebsfestigkeit 3.2.2 -1
Restlebensdauer 1-4
Risiko 4.3-30
Schädigung 1-4
Abschätzung des
Absorptionssensoren, Feuchtigkeitsmessung 3.3 -9
Abstandssensoren, Ultraschall 3.3 -8
„**Abfangen**“, Riss 4.3-17
Aerodynamische Schwingungsanregung 3-16
Alternativen bei Bewertung in einer Entscheidungsanalyse 2.2.2.1-17
Aluminiumlegierungen
Festigkeitseigenschaften 3-10
Leichtbau 3-9
Profile, Verkleben 3-9
Aluminiumoxid 3-39
Amplitude, Spannungskonzentration 4.4-15
Analyse 2-10
Chemische 3.3 -8
Bruchflächen 4.4-1
Definition des Problems 2.2.2-2
in FMEA 1.1-2, 2-2
REM-Befund 4.4-8
Rissbilder 4.4-1
-17, 2.2.2.1-18
Verfahren, Diagnoseergebnis 3.3 -17
'Zeitrichtung' 2-10
Analyse Potenzieller Probleme (APP) 2.2.2-12, 2.2.2.2-3, 2-7, 2-9
Beispiele 2.2.2.1-1, 2.2.2.1-8, 2.2.2.1-9
Laboruntresuchungen 2.2.2.4-1
Anbieter von Laboruntersuchungen, 2-1
Anbringungsort, Motorsteuerung 3.3 -11
Ändern
Fertigungsverfahren 1.1-2
Wartung 1.1-3
Anforderung, Wirkungsgrad 3.2-1
Anlauffarben, Temperaturverteilung 4.4-5
Anomalie, Definition 3.3 -16
Anriss
Rissfortschritt 4.3-1
Bild, Austenitische Legierungen 4.3-9
Entstehung 4.3-1
Lage, Ort
bei Druckeigenspannungen 4.3-25
bei Volumenfehlern 4.3-26
Ermittlung bei Sprödbruch 4.4-17
Wärmeort
Rückschlüsse 4.4-1
Ursächlicher Fehler in sprödem Werkstoff 4.4-17
Ansprechgeschwindigkeit, Thermoelement 3.3 -5
APP (Analyse Potenzieller Probleme) 2-7, 2-9, 2-2.212
Arbeitsblatt
Fakten, Beispiel 2.2.2.1-2
Situationsanalyse 2.2.2-3
Arbeitshypothese 2.2.2-2, 2-6, 2.2.2-8
Artefakte in Metallografie 2.2.2.4-6
As HIP-Verfahren 4.1-11
Atmosphäre
Einflüsse 3.2-1
auf Risse 4.3-19
Ätzspuren, Einfluss auf Rissbild 4.4-18
Auffindbarkeit, Fehler 3.2-2
Auflagepressung, Messung unter Schraubenköpfen 3.3 -5
Aufnehmer, resistiv 3.3 -4
Ausbildung in Problemanalysen 2-5
Ausfallwahrscheinlichkeit 2.3-2
Ausknicken, FVK-Hohlprofil 3-22
Auslegung 1-1
Absicherung durch Messungen 3.3 -13
Bauteile 4.1-5
Berücksichtigung
einer Technologie 3.2-6
Risswachstum 1-4
Daten
erfahrungsbasiert 1.1-2
ungenügend abgesichert 1.1-2
Lebensdauer 3.2-2
Maschinenelemente 1.1-1

Eckhard Pessmann - Turbomaschinen
als Schulungsunterlage zum Lizenz

Werkstoffe 3.2-2

Ausnutzung des Festigkeitspotenzials 3-3
Äußere Einflüsse
REM-Befund 4.4-8
Turbinenscheibe 3.2-4
Zusammenwirken 1-5
Austenitische Legierungen, Anrissbild 4.3-9
Auswahl von Maschinenelementen 1.1-1
Auswertung, Software für Messdaten 3.3 -1
Auswirkung
eines Problems 2.2.2-5
von Veränderung an Bauteilen 3.2.2 -10

B

Badewannenkurve 2.3-8
Bahnen (Verkehr) Leichtbau 3-4
Ballistischer Schutz (engl. Containment) 3-25
Bauteil
Auslegung 4.1-5
Geometrieeinfluss auf das Bruchbild bei dynamischer Beanspruchung 4.4-9
Lebensdauer 3.2-3
begrenzte 1-4
Verbrauch 3.3 -13
notwendige Dokumentationen 3.2.2 -8
Überwachung 1-4
Verhalten
als Schadensfolge 4.1-9
Einflüsse 3.2-5
Ermittlung 3.3 -1
werkstoffbeeinflusst 4.1-3
Bauweise
Integrale 3-3
Leichtbau 3-8
Bauwerke, Schwingung 3-18
Bayes'sches Netz 3.3 -15, 3.3 -20
Beanspruchung
Art aus Bruchbild 4.4-5
bei Rissfortschritt 4.4-15
Dehnungsgesteuert 4.3-17
in der Schädigungsphase 4.3-29
Richtungsbestimmung
Aus REM-Befund 4.4-12
schadensrelevant 4.3-31
Bearbeitung
Riefen, Einfluss auf Rissbild 4.4-18
Staub in porösen Schichten 4.2-6
zeitliche Einordnung in Schadensablauf 4.4-18
Bedingungsleichtbau 3-6
Befund, Einschätzung 2.2.2.4-6
Begehung von Fertigung, Montage 2.2.2.1-2
„Beherrschbarkeit“ eines Risses 4.3-17
Beispiele für
Analyse Potenzieller Probleme 2.2.2.1-1, 2.2.2.1-8, 2.2.2.1-9, 2.2.2.1-17, 2.2.2.1-18
Betriebsverhalten eines hochfesten Werkstoffs 4.1-10
Enscheidungsanalyse (EA) 2.2.2.1-1, 2.2.2.1-7, 2.2.2.1-9
Fail Safe 3-31
Faktensammlung 2.2.2.1-12
Keramische Bauteile 3-36
Leichtbau in Luft- und Raumfahrt 3-7
Monitoring an einem Flugtriebwerk 3.3 -18
Motor, Fehlerbaum 3.3 -14
Problemanalyse (PA) 2.2.2.1-1
Schraubenbruch 2-2.29
Problemdiagnose 3.3 -15
Riss verlangsamt sich 4.4-2
Schadensanalyse 2.2.2.1-1
Schadensbild 2.2.2.1-11
Situationsanalyse (SA) 2.2.2.1-1
Torsionsermüdung einer Hohlwelle 4.4-2
Überprüfung einer Hypothese 2.2.2.1-13
Ursache-Wirkungs-Diagramm 2.2.2.1-2, 2.2.2.1-3, 2.2.2.1-12
Verschlimmbesserung 3.2.2 -10
Warum-Treppe 2.2.2.1-5, 2.2.2.1-12
Beitragende Fehler 3.2.2 -4
Beläge REM-Befund 4.4-6
Belastung
Abhängigkeit des Rissfortschritts 4.3-5
Bruchbild bei dynamischer Beanspruchung 4.4-9
entsprechende Werkstoffqualität 1.1-1
höhere 1.1-1
im plastischen Bereich (LCF) 3.2.2 -1
mechanisch 3.2-1
Niveau, Schluss aus Restgewaltbruch 4.3-3
Richtung bei Bruch 4.4-13
thermisch 3.2-1
triebwerksspezifisch 3.2-1
Beplankung, Flugzeugzelle 3-19, 3-21
Berechnung 1-1
Berichterstellung 2.2.2.2-3
Berstschleuderversuch (Proof Test), Keramik 4.4-17
Beschädigung, schadensursächliche 4.4-8
Beschichtung
Betriebsverhalten 4.2-3
Einfluss auf das Betreibsverhalten 4.2-1
Festigkeitseinfluss 3.2.2 -1
Folgeschäden 4.1-9
Haftfestigkeit 4.2-9
Haftschicht 4.2-4
Metallografie 2.2.2.4-6
Prozesskontrolle 4.2-4
Schichtdicke 4.2-4
Wärmefluss 4.2-4
Werkstoffverhalten 1-4

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

ZfP 4.2-4
Beschleunigung
messen 3.3 -8
Piezoelektrische Aufnehmer 3.3 -8
Betrieb
Atmosphäre,
Einfluss auf
Bauteilebensdauer 4.3-20
Emissionsgrad 3.3 -6
Verschleiß 4.1-8
Versprödung 4.1-7
Werkstoffeigenschaften 4.1-7
Werkstoffveränderung 4.1-7
Zusammenwirken mehrerer Einflüsse 1-6
Diffusionsvorgänge 4.1-7
Schädigungen an Teilen für Praktikum 2.2.2.2-2
Verhalten, Einfluss von Beschichtungen 4.2-1
Betriebs- und Gewaltbruch,
Aussage von Flächenanteilen 4.4-6
Rückschlüsse 4.4-2
Betriebserfahrung 1-5
Definition einer Schwachstelle 3.2.2 -6
Betriebsfestigkeit, Abschätzung 3.2.2 -1
Betriebskräfte, Veränderungen 4.1-7
Betriebsprofil (Belastungsprofil), Turbinenscheibe 3.2-4
Betriebstemperatur
Einfluss auf Werkstoffeigenschaften 4.1-7
Betriebsverhalten
Indifferentes 3.2.2 -9
Labiles 3.2.2 -9
Maschinenelement 1-5
Stabiles 3.2.2 -8
von Leichtbauten 3.2.2 -8
von Schichten 4.2-3
Betriebszeiten, Schadensrelevanz 3.2-1
Bewegungen messen 3.3 -7
Bewertung, makroskopische von Brüchen 4.4-2
Biegung
Fehlereinfluss 4.3-26
Risswachstum 4.3-26
Verhalten eines Volumenfehlers 4.3-26
Binokular, Bruchfläschenbewertung 4.4-2
Bling (Bladed Ring) 3-27
Blisk (Bladesd Disk) 3-27
Bodengebundener Roboter 3.1-3
Bohrungen, Gefährlichkeit von Graten 4.3-15
Bornitrid 3-39
Brainstorming, Hypothesen erarbeiten 2-2.28
Bruch
abfangen 3-22
Art 4.4-5
Auswertung 4.4-1
Belastungsrichtung 4.4-13
Bild
Art der Beanspruchung 4.4-5
dynamische Beanspruchung
Einfluss Querschnittsdicke 4.3-8
Gewaltbruch, mikroskopisch 4.4-6
im Querschnittsinneren 4.4-9
Intermetallische Phasen 4.4-17
Merkmale
dynamischer Beanspruchung 4.4-9
plastischer Verformungen 4.4-5
statische Beanspruchung 4.4-9
Umwelteinflüsse 4.4-9
Werkstoffeinfluss 4.4-9
Fortschrittslinien 4.4-6
Abstand 4.4-15
Radachsen Zug 1-1, 1.1-1
Richtung 4.4-5
Verlauf, Hinweis auf Haftfestigkeit 4.2-9
Bruchdehnung, Werkstoffdaten 4.3-12
Bruchebene, Lage 4.4-5
Bruchbilder, dynamische Beanspruchung 4.4-9
Bruchfestigkeit und Bruchzähigkeit, Zusammenhang 4.3-12
Bruchfläche 4.4-1
Ablagerungen 4.4-5
Abschätzung des statischen Lastanteils 4.4-12
Analysieren/Auswerten 4.3-28, 4.4-1, 4.4-2
Elektronenmikroskopisch 4.3-28
Glas 4.4-13, 4.4-17
Keramik 4.4-13, 4.4-17
makroskopisch 4.3-28
makroskopische 4.4-3
Mikroskopische 4.4-6
Auswertung
Fortschrittsrichtung eines Gewaltbruchs 4.4-13
Hinweise auf Kraftrichtung 4.4-9
mikroskopische Schmelzstrukturen 4.4-21
Probenentnahme 4.4-2, 4.4-5
Rückschlüsse 4.4-1
spiegelnd 4.3-10
Untersuchungen
Aussagen 4.3-3
mit Binokular 4.4-2
Verfärbung 4.4-5
Bruchfolge 4.4-5
Bruchmechanik 4.3-1
Auswirkungen von Effekten 1-4
hochbelastete Bauteile 3.2.2 -1
Kennwerte hochfester Werkstoffe 4.1-9
Klärung Schadensursache 3.2.2 -6
Rissöffnungsarten 4.3-5
Verhalten ausgewählter Werkstofffamilien 4.3-12
Bruchstücke,
hochenergetische 1-3
Größe, Rückschluss auf Spannungsniveau 4.4-15
Bruchzähigkeit

© XRPossmann - Turbinensch
als Schulungsunterlage nicht frei

Keramik 3-39
verschiedener Werkstoffe 4.3-12
Brünierbad, Auswirkung auf Rissmerkmale 4.4-5
Burn-in (Badewannenkurve) 2.3-8

C

Chancen einen Betriebsriss vor Bruch zu finden 4.3-17
Chemische Analysen 3.3 -8
Containment (Auffangen von Bruchstücken) 1-3, 3-25
Cr-Schicht
Eigenspannungen 4.2-10
Kugelstrahlen 4.2-10
Rissbildung 4.2-6
Schwingfestigkeit 4.2-12
Überschleifen 4.2-6
ZfP 4.2-4
Crash
Sensoren 3.3 -8
Verhalten 1.1-2

D

Dachantenne, Schwingung 3-19
Damage-Toleranz-Konzept, (Damage Tolerant Design) 1-4, 4.1-4
Dämpfung
Reibung der Rissufer 4.3-28
Rissbildung 4.3-33
Daten
ungenügend abgesichert 1.1-2
Speicherung 3.3 -1
Dauerfestigkeit
Hartverchromung 4.2-10
Leichtbauwerkstoffe 3-10
Definition
Problem,
Begriff 2-1
für Problemanalyse 2.2.2-5
Fehler 2-1
Monitoring 3.3 -16
Schaden
Begriff 2-1
für Schadensanalyse 2-5
Deformation von Rastlinien, Schlüsse 4.4-8
Dehnungsmessung,
Messstreifen 3.3 -4
Probleme 3.3 -4
Dehnungsgesteuerte Beanspruchung 4.3-17
Dehnungszustand, eben 4.3-8
Delamination, FVK 3-10
Diagnose
Definition 3.3 -16
Ergebnis
Analytische Verfahren 3.3 -17
Funktionale Verfahren 3.3 -17
Qualitative Modelle 3.3 -17
Quantitative Modelle 3.3 -17
Verlässlichkeit 3.3 -17
Virtuelles Funktionsmodell 3.3 -17
Wissensbasiert 3.3 -17
in Werkstatt 3.3 -13
Plausibilitätskontrollen 3.3 -14
Symptome und Ursachen 3.3 -14
von Kraftfahrzeugen 3.3 -14
zum Bauteilverhalten 3.3 -1
Diagnosesystem 2-2.21
Diagnostische Schlussrichtung 3.3 -21
Dichtungen, keramische 3-37
Differentialbauweise 3-14
Differenzdruckaufnehmer, kapazitiv 3.3 -5
Diffusionsschichten 4.2-4
Diffusionsschweißen 3-34
Diffusionsvorgänge unter Betriebseinflüssen 4.1-7
Dirty lay out 2.2.2.2-3
DMS (Dehnungsmessstreifen) 3.3 -4
DMS-Drehmomentmesswelle 3.3 -5
Dokumentation
Erfahrung 1.1-1
Praktikum 2.2.2.2-3
Untersuchungsteile 2.2.2.2-3
zum Bauteil 3.2.2 -8
Drehmoment
Messung 3.3 -5
Magnetoelastischer Effekt 3.3 -5
Piezoelektrisch 3.3 -5
Drehzahlmessung 3.3 -7
Induktive Sensoren 3.3 -7
Drosselklappe, Stellung bestimmen 3.3 -7
Druck
Messung 3.3 -5
Aufnehmer/Sensoren
Magnetoelastisch 3.3 -5
Piezoelektrisch 3.3 -5
Piezoresistiv 3.3 -5
Druckeigenspannungen
Anrisslage 4.3-25
Einfluss auf Rissfortschritt 4.3-33
Querschnittsabhängige Wirkung 4.3-26
Druckrost. *Siehe* Fretting
Duty cycles. *Siehe* Lastzyklen
Dynamische Beanspruchung
Bruchbild 4.4-9
Einfluss der Bauteilgeometrie 4.4-9
Rissmerkmale 4.4-9
Rückschluss auf Zeitpunkt 4.3-27
Umwelteinflüsse auf das Bruchbild 4.4-9

© Axel Rossmann - Trainingsunterlagen
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

E

E- Modul (Elatizitätsmodul) Einfluss auf Risswachstum 4.3-34
EA (Entscheidungsanalyse) 2-7
Ebener Dehnungszustand 4.3-8
Edelrost. *Siehe* Fretting
Eigenschaften, unerkannte gefährliche 1.1-2
Eigenspannungen 4.3-20
Cr-Schicht 4.2-10
Einteilung 4.3-21
Rückschlüsse in Glas 4.4-15
Eigenspannungen I. Art 4.3-21
Eigenspannungen II. Art 4.3-21
Eigenspannungen III. Art 4.3-21
Eindringprüfung, Schicht 4.2-4
Einflüsse
auf das Bauteilverhalten 3.2-5
von Betriebsbelastungen 3.2-1
Einkristallwerkstoff, Schlagzähigkeit 4.1-9
Einlaufverhalten einer Schicht, Beeinflussung duch Nacharbeit 4.2-6
Einzelfall, Definition/Erklärung 2.3-8, 3.2.2 -2
Elastomer
Abdrücke für REM-Untersuchung 2.2.2.4-8
Schichten, Haftfestigkeit 4.2-9
Elektronenmikroskopische Bruchflächenauswertung 4.3-28
Elektronenstrahlschweißen 3-34
Elektronik, Ausfall durch Schwitzwasser 1.1-2
Elektronische Motorsteuerung 3.3 -10
Elektronischer Regler. *Siehe* Digitaler Regler
Emissionsgrad (Licht), Betriebseinflüsse 3.3 -6
Empfehlungen, Maßnahmen 2.2.2.2-3
Energieerzeugung, Leichtbau 3-4
Engagement, persönliches 2.2.2-10
Entscheidungsanalyse (EA) 2-7, 2.2.2-10
Beispiele 2.2.2.1-1, 2.2.2.1-7, 2.2.2.1-9
Bewertung von Alternativen 2.2.2.1-17
Entwicklung
Kosten 1-3
Risiken
FVK-Bauteile 3-7
technologiebedingt 1-4
Erfahrung
Aus Schäden 4.4-1
Dokumentation 1.1-1
fehlende 1.1-2
für Risikoanalyse 2.3-1
Erfahrungsbasierte Auslegungsdaten 1.1-2
Erfahrungshorizont 3.2.2 -10
Erkennbarkeit, Rissfortschrittslinien 4.3-10
Ermüdung, FVK 3-11
Erosionsmerkmale, Einfluss auf Rissbild 4.4-18
Evolution des Leichtbaus 3-27
Externen Untersuchungen, Möglichkeiten 2.2.2.4-1
Extremely Improbable Failure Conditions 2.3-5
Extremely remote 2.3-5
Extrusion (Werkstoffschädigung**)** 4.3-9

F

Fachbezeichnungen englische 1-4
Fail Safe 3-31
Beispiele 3-31
Verhalten 1-3, 3-7, 3-12
Faserstruktur 3-27
Schichtwerkstoff 3-21
Failsafety 3-31
Fakten
erarbeiten 2.2.2.2-1
Beispiel für Arbeitsblatt 2.2.2.1-2
Sammlung 2-6, 2-2.25, 2-2.26
Beispiel 2.2.2.1-12
Recherchen 2.2.2.1-2
False brinelling. Siehe Fretting
Faserkrümmung, Gewaltbruch 4.4-6
Faserstruktur
Fail-Save-Verhalten 3-27
Risswachstum 3-29
Faserverstärkte Keramik 3-37
Faserverstärkte Kunststoffe 1-3
Festigkeitseigenschaften 3-10
Fehlentscheidungen 2.2.2-10
Fehler 3.2.2 -4
Auffindbarkeit 3.2-2
Auftretenswahrscheinlichkeit 2-3
Beitragende 3.2.2 -4
Bewertung der Bedeutung 2-4
Definition 2-1, 3.3 -16
Schwere 3.3 -17
Spannungsintensität 4.3-23
Untersschied zur Schwachstlle 3.2.2 -8
Vorbeuugung 2-1
Wahrscheinlichkeit der Entdeckung 2-4
Werkstoff 3.2-2
Fehleralarm 3.3 -20
Fehlerbaum, Beispiel Motor 3.3 -14
Fehlereinfluss bei Biegung 4.3-26
Fehlerempfindlichkeit 3.2.2 -1
Fehlererkennung, Inspektionen 4.3-24
Fehlerfolgen 2-3
Fehlergröße 3.2.2 -1
Grenzwert für Rissbildung 4.3-3
Qualitätssicherung 4.3-12
Fehlerklassifikation 2.3-5
Fehlermodus 2.3-8
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) 2-2
Fehlersymptom, Definition 3.3 -16

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fehlerursachen analysieren 2-2
Fehlervermeidung 3.2.2 -4
Fehlerverteilung 4.3-23
Querschnittseinfluss 4.3-23
Fehlinterpretation, Rissfortschrittslinien 4.3-10
Fehlstellen
Metallografie 2.2.2.4-2
Risswachstum 4.1-3
Überprüfung einer Nacharbeit 2.2.2.4-9
Feinwerktechnik 3.1-1, 3.1-3
Fertigung
Änderung erprobter 1.1-2
Begehung 2.2.2.1-2
FMEA 2-4
Problem, UW-Diagramm 2-2.23
Turbinenscheibe 3.2-4
Verfahren ändern 1.1-2
Festigkeit
Ausnutzung 4.1-5
nutzbare Grenzen 3.2.2 -1
des Potenzials 3-3
Eigenschaften, Leichtbauwerkstoffe 3-10
Einfluss auf
Rissempfindlichkeit 4.3-11
Rissfortschrittsphase 4.3-11
Ultraschallprüfung 4.1-5
Einfluss von
Beschichtungen 3.2.2 -1
Konstruktion auf Lötverbindung 3-23
Reserven 3-15
Feuchte Luft, Rissbildung in Glas und Keramik 4.4-15
Feuchtigkeit
Messung 3.3 -9
Absorptionssensoren 3.3 -9
Einfluss, auf die Festigkeit von Keramiken 3-38
Fischgrätendiagramm 2.2.2-2, 2.2.2-5
Flächenpressung, Messung 3.3 -4
Flanschverbindung, doppelt zentriert 1-3
Flatter
Flattern 3-19
Grenze 3-18
Schwingung 3-16
Fleetleader 3.2.2 -10
Fließgrenze, Werkstoffdaten 4.3-12
Flight envelope. *Siehe* Flugbereich
Flugzeugtragflächen, Schwingung 3-18
Flugzeugzelle, Beplankung 3-19, 3-21
FMEA (Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) 2-1, 2-2, 2-7
Analyse 1.1-2, 2-2
Risikobewertung 2-4
FOD (Foreign Object Damage, Fremdkörperschaden) **-Resistenz** einer Schicht 4.2-4
Folgeschaden
Beschichtungen 4.1-9
Merkmal 4.4-5
REM-Befund 4.4-8
Folienabdrücke für REM und metallografische Untersuchung 2.2.2.4-8
Form-Leichtbau 3-7
Fortschrittsrichtung
Gewaltbruch 4.4-13
Riss 4.4-2
Fremdkörper 2.3-8
Sicherungsdraht 2.3-9
Fremdkörperschäden (FOD, Schäden durch Fremdkörper), Statistik 2.3-8
Frequenz
Abfall durch Rissbildung 4.3-28
Einfluss von Rissfortschritt 4.3-18, 4.3-19
Funktionale Verfahren, Diagnoseergebnis 3.3 -17
FVK (Faservertärkter Kunststoff) 3-10
Delamination 3-10
Versagensmodus 3-7
Hohlprofil, Ausknicken 3-22
Bauteile, Entwicklungsrisiko 3-22

G

Galvanisch beschichtet, Verhalten von Kerben 4.2-13
Gefährliche Werkstoffeigenschaften 1.1-2
Gefüge
Einfluss auf Rissfortschritt 4.3-33
Inhomogenitäten, Rissstopper-Effekt 4.3-33
Merkmale ermitteln
Metallografie 2.2.2.4-2
REM-Befund 4.4-8
typischer Rissverlauf 4.4-20
Veränderung im Betrieb 4.1-7
Gesintertes Siliziumnitrid (SSN) 3-39
Gestaltungsbeispiele für Lötungen und Klebeverbindungen 3-23
Gewaltbruch
Aussehen 4.4-9
Faserkrümmung 4.4-6
Fortschrittsrichtung aus Bruchfläche 4.4-13
Mikroskopische Bruchstrukturen 4.4-6
REM-Befund 4.4-8
Richtung der Ausbreitung 4.4-5
Wallnerlinien 4.4-13
GLARE (Al-FVK-Schichtwerkstoff) 3-21
Glas
Anrissursächlicher Fehler 4.4-17
Bruchflächenauswertung 4.4-13, 4.4-17
Bruchspiegel (bei spröden Werkstoffen) 4.4-15
Kritische Fehlergröße 4.4-17
Rissbildung in feuchter Luft 4.4-15
Rückschlüsse auf Eigenspannungen 4.4-15

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Spannungshöhe/-niveau abschätzen aus Sprödbruchfläche 4.4-13
Bruchstückgröße 4.4-15
Spannungsverteilung aus Bruchfläche 4.4-13
Glasfaser-Kunststoff (FVK) 3-21
Glätten einer Schicht 4.2-6
Gras (Störsignale bei Ultraschall) 4.1-5
Grate
Gefährlichkeit bei Bohrungen 4.3-15
Kerben 4.3-15
Grenzen nutzbarer Festigkeit 3.2.2 -1
Grenzwert für Rissbildung 4.3-3
„**grobes**“ **Gefüge**, Eigenschaften 4.3-15
GRP (Glasfaser versärkter Kunststoff) 3-21
Gusswerkstoff, Risswachstum 4.3-19

H

Haftfestigkeit
Beschichtung 4.2-9
Elastomer 4.2-9
gefüllter Silikongummi 4.2-9
Hinweis des Bruchverlaufs 4.2-9
Haftschicht 4.2-4
Halbleiter-DMS (Dehnungsmessung) 3.3 -4
Halbleiterwiderstände 3.3 -6
Hall-Sensoren 3.3 -7
Haltezeit, Kriechen 3.2-5
Handbücher 1-1
Härte
nachgearbeiteter Schicht 4.2-6
Schrauben 2.2.2.1-2
Verlauf, Ermittlung mit Metallografie 2.2.2.4-2
Hartverchromung 4.2-10
Hauptbeanspruchungsrichtung aus Schadensbild ermitteln 4.3-31
Haushaltsgeräte
Leichtbau 3-4
Kunststoffkomponenten, Beispiele 3-40
Hazard Indices 2.3-7
Health Monitoring, Problematik 3.3 -16
Heat soaking. *(Wärmeeintrag im Stillstand) siehe* Abstellen: Verkokung
Heißfilm Sensor 3.3 -6
Heißgas, Einfluss auf
Rissbild 4.3-22
Rissfortschrittsgeschwindigkeit 4.3-22
Heißleiter (Keramikwiderstand) 3.3 -6
Heißteil, Kriechen 1-4
Hersteller, Zulassung 3.2.2 -1
Herstellungskosten keramischer Bauteile 3-34
Hintergrundwissen, unbewusstes 2.2.2.4-1
Hochbelastete Bauteile
Anwendung 3.2.2 -1
Schwachstellen 3.2.2 -1
Sicherheitsfaktoren 3.2.2 -1
Verhalten 3.2.2 -1
Hochfester Werkstoff
Beispiel für Betreibsverhalten 4.1-10
Hohlprofil aus FVK
Ausknicken 3-22
Hohlstrukturen
im Leichtbau 3-34
Umformtechniken 3-34
hot start. ***Siehe*** **Heißstart**
Hubschrauber
Mikrogerät 3.1-3
Human Factors 3-13
Hybridbauweise
Konventionell 3-27
Hybridbauweise einer Rotorscheibe
Konventionell 3-27
Hybridbauweisen 3-25
Hydroforming 3-34
Hypothese
wahrscheinlichste erkennen 2.2.2.1-5
Hypothesen
Beispiel für Übrprüfung 2.2.2.1-5
Erarbeiten 2-6
Plausibilität 2-7
Prüfen 2-7
überprüfen 2-2.29
Hypothesen erarbeiten 2.2.2-8
Hypothesenerstellung 2.2.2-2

I

Improbable Failure Conditions 2.3-5
Impulsrad -Sensor 3.3 -7
Indifferentes Betriebsverhalten 3.2.2 -9
Induktive Sensoren, Drehzahlmessung 3.3 -7
infant mortality (siehe Badewannenkurve) 2.3-8
Infiltriertes SiC mit Siliziumschmelze (Si SiC) 3-39
Ingenieurgefühl 2.3-1
Inhomogenitäten, Werkstoff 4.3-21
Inkubation 4.3-29
Schwingriss 4.3-3
Zeit 3.2.2 -3
Innen liegende Risse 4.3-33
Inprobable failure conditions 3.2.2 -2
Inspektionen
Fehlererkennung 4.3-24
Intervalle 1.1-3
festlegen 4.3-2, 4.3-12, 4.3-30
Integralbauweise 3-3, 3-15
Bauteile, Reparatur 3-25
Konventionell 3-27
Ring als Rotor (Bling) 3-27
Intermetallische Phasen, Bruchbild 4.4-17
Ishikawadiagramm (Fischgrätendiagramm) 2.2.2-2

Bernd Rossmann - Turbosoft
Nur Schulungsunterlagen mit Lizenz

K

Kaltleiter 3.3 -6
Kampfwertsteigerung 3.2-2
Kantenschärfe, Metallografie 2.2.2.4-6
Kapazitive Sensoren 3.3 -7
Differenzdruckaufnehmer 3.3 -5
Kármán'sche Wirbelstraße 3-16, 3-19
Katalysator, 'vergiften' 3.3 -9
Katalysatoreffekt, Platindraht eines Thermoelements 3.3 -6
Katalysatorträger 3-37
Kausale Schlussrichtung 3.3 -21
Kenntnis der Umwelteinflüsse 1.1-2
Keramik
anrissursächlicher Fehler 4.4-17
Bauteile 3-34
Anwendungsbeispiele 3-36
Herstellungskosten 3-34
Motorenkomponenten 3-36
Nachbearbeitung 3-34
Qualitätskontrolle 3-34
Turbolader 3-9
Versagensmechanismen 3-36
Wälzlager 3-36
Wellen 3-37
Widerstände 3.3 -6
Zahnräder 3-36
Berstschleuderversuch (Proof Test) 4.4-17
Bruchflächenauswertung 4.4-13, 4.4-17
Bruchspiegel 4.4-15
Bruchzähigkeit 3-39
Dichtungen 3-37
Faserverstärkt 3-37
Festigkeitseigenschaften 3-34
Feuchtigkeseinfluss auf Festigkeit 3-38
Kritische Fehlergröße 4.4-17
Rissbildung in feuchter Luft 4.4-15
Rückschlüsse auf Eigenspannungen 4.4-15
Scheibenbremsen 3-39
Bruchstückgröße 4.4-15
Sprödbruchfläche 4.4-13
Spannungsverteilung aus Bruchfläche 4.4-13
Verbindung mit Stahl 3-9
Kerbe
galvanisch b eschichtet 4.2-13
Grate 4.3-15
konstruktionsbedingt 4.4-5
Montagebeschädigung 4.4-6
Primärschaden, Merkmale 4.4-9
Rissauslösend 4.3-15
Werkzeugeindrücke 4.4-6
Kerbschlagzähigkeit, Schluss auf Risszähigkeit 4.3-12
Klaffen eines Risses, Bedeutung 4.4-19
Klebeverbindungen
Gestaltungsbeispiele 3-23
Kleinroboter 3.1-1
Kohlefaserstrukturen Si-infiltriert (CMC) 3-39
Kombiantion von
Metall und FVK 3-25
Metall Keramik 3-25
Konstruktion
Änderung 3.2.2 -11
nachempfundene 1-3
Turbinenscheibe 3.2-4
unverstandene 1.1-1
Verbesserung 1.1-1
Konstruktionshandbücher 1-5
Konstruktionskeramik 3-34
Konstruktionsphilosophie, Rissverhalten 3-29
Kontaktflächen/Auflageflächen 3-25
Kontrollmaßnahmen an Maschinen 2.3-1
Konventionelle Bauart/Bauweise 3-15
Rotorscheibe 3-27
Korngrenzenriss 4.4-21
Korngröße (Werkstoffgefüge), Einfluss auf die Ultraschallprüfung 4.1-5
Korrosion
Frequenzeinfluss auf Rissbildung 4.3-19
Rissfortschritt 4.3-19
Kraft,
Messung 3.3 -4
Einleitung bei spröden Werkstoffen 3-25
Kraftfahrzuge, Leichtbau 3-4
Kraftrichtung
Hinweise aus Bruchfläche 4.4-9
Schluss aus REM-Befund 4.4-6
Kranzrisse in Turbinenrädern 4.3-28
Kreiselkräfte, Rissverlauf 4.4-3
Kriechen 4.1-7
Haltezeiten 3.2-5
von Heißteilen 1-4
Kriechfestigkeit 3.2-2
Kritische
Fehlergröße spröder Werkstoffe 4.4-17
Rissgröße/-länge 3.2.2 -1, 4.3-12
Risszähigkeit 4.1-5
Kugelstrahlen
Bauteilsicherheit 3.2-7
Cr-Schicht 4.2-10
einer Schicht 4.2-6
Merkmale, Einfluss auf Rissbild 4.4-18
Kunststoff.
Faserverstärkt 1-3
Komponenten, Haushaltsgeräte 3-40
Kurvenbeschleunigung messen 3.3 -8
Kurze und lange Risse, Unterschiede im Risswachstumsmechanismus 4.3-21

© Axel Rossmann - Turbinenconsult
Nur Schulungsunterlagen mit Lizenz

L

Labiles Betriebsverhalten 3.2.2 -9
Laborgeräte, Kenntnis der Funktion 2.2.2.4-1
Laboruntersuchungen
externe Anbieter 2.2.2.4-1
Problemanalyse 2.2.2.2-1
Labyrinthe, Panzerungen 4.2-3
Lage von Bruchebenen 4.4-5
Lambdasonde 3.3 -8
Langzeitveränderungen bei Werkstoffen 1.1-2
Laser, Abstandsmessung 3.3 -8
Lasergestützte Anemometrie 3.3 -6
Laserschweißen 3-34
Lastanteil, Abschätzung aus Gewaltbruch 4.4-12
Laufbahnermüdung, Wälzlager 4.1-7
LCF (Low Cycle Fatiugue) 1-4
Lebensdauer
Auslegung 3.2-2
Bauteil 3.2-3
Einfluss der Betriebsatmosphäre 4.3-20
Sichere 1-3
Lebensdauerbegrenzte Bauteile 1-4
Lebensdauerverbrauch kritischer Bauteile 3.3 -13
Lebensdauerzyklus 3.2-2
Leichtbau 1-2, 3-3
Aluminiumlegierungen 3-9
Bahnen 3-4
Bauweisen 3-8
Begriffe 3-6
Beispiele Zusammenstellung 3-4
Energieerzeugung 3-4
Evolution 3-27
Hauhaltsgeräte 3-4, 3-40
Hohlstrukturen 3-34
Kraftfahrzeuge: 3-4
Lüfterrad 3-8
Qualitätsmaßstäbe 3.2-1
Radaufhängung 3-24
Schiffe 3-4
Sportgeräte 3-4
Strategien 3-14
Systematisierung 3-6
Trend zum 1-4
Übergang zum 1.1-2
Verbunde 3-3
Verkehrssysteme 3-4
Voraussetzungen 3-7
Wälzlagerungen 3-24
Werkstoffe
Dauerfestigkeit 3-10
Festigkeitseigenschaften 3-10
Leichtmetalle, Verschraubungen 3-25
Leistungskonzentration, Auswirkungen 3.2-2
Leitwert, Messung bei Öl 3.3 -9
Lernfähigkeit eines Netzwerks 3.3 -22
Literatur
Schadensklärung 1-2
Studium für Untersuchung 2.2.2.2-3
Lizenzprodukte 1-3, 1.1-1
Lötung
Einfluss der Konstruktion auf die Festigkeit 3-23
Fischbüchseneffekt 3-23
Gestaltungsbeispiele 3-23
Steifigkeitssprünge 3-23
Versagensmodus 3-23
Low Cycle Fatigue (LCF) 1-4
Luft- und Raumfahrt, Beispiele für Leichtbau 3-7
Lüfterrad, Leichtbau 3-8
Luftfeuchtigkeit, Messung 3.3 -9

M

Magnetoelastische Sonden
Drehmomentmessung 3.3 -5
Druckaufnehmer 3.3 -5
Magnetumformen (Hohlkörper) 3-34
Makroskopische Bewertung von Brüchen 4.3-28, 4.4-2, 4.4-3
Maschinenelemente
Auslegung und Auswahl 1.1-1
Betriebsverhalten 1-5
Standardwerke 1-5
Maschinenübrewachung, modellbasierte Verfahren 3.3 -20
Maßanforderungen 1-5
Maßnahme
empfohlene 2.2.2.2-3
kritische Planschritte 2.2.2-12
kritische Realisierungsschritte 2.2.2.1-9
Meldesystem für Erfolg 2.2.2-13
Risiko 2.2.2-11
Schadensverhütung 2.2.2-12
Tragweite 2.2.2-11
Umsetzung 2-4
Voraussetzungen 2-5
Wahrscheinlichkeit des Erfolgs 2.2.2-11
Zuständigkeiten 2.2.2-11
MBCD (Model Bases Controls and Diagnostics) 3.3 -18
Mechanische Dehnungsmessung 3.3 -4
Mechatronik 3.1-1, 3.3 -1
Mehrere Anrisse, Schlussfolferungen 4.3-27
Meinungen, Brauchbarkeit 2.2.2-2
Meldesysteme für den Erfolg einer Maßnahme 2.2.2-13
Merkmale eines Problems 2.2.2-7
Messdaten
Auswertung, Software 3.3 -1
Speicherung 3.3 -1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Messung von/an/zur
Absicherung einer Auslegung 3.3 -13
Bauteilverhalten 3.3 -1
Beschleunigungen 3.3 -8
Bewegungen 3.3 -7
Dehnungen 3.3 -4
Drehmoment 3.3 -5
Druck 3.3 -5
Feuchtigkeit 3.3 -9
Flächenpressung 3.3 -4
Kräften 3.3 -4
Luftfeuchtigkeit 3.3 -9
mechanische Spannungen 3.3 -4
Stellung rotierender Bau-teile 3.3 -7
Temperatur 3.3 -5
Versuchsaufbauten 3.3 -4
Metall FVK Kombiantion 3-25
Metall Keramik-Kombination 3-25
Metall-DMS 3.3 -4
Metallografie/ metallografische Untersuchung 2.2.2.4-4
Abdrücke (mit Folien) 2.2.2.4-8
Artefakte 2.2.2.4-6
Beschichtungen 2.2.2.4-6
Bestimung einers Härteverlaufs 2.2.2.4-2
Fehlstellen 2.2.2.4-2
Gefügemerkmale 2.2.2.4-2
in der Fertigung 2.2.2.4-2
in der Schadensanalyse 2.2.2.4-4
Kantenschärfe 2.2.2.4-6
Probenentnahme 2.2.2.4-6
Schliff 2.2.2.4-2
Zerspanungsprozess 2.2.2.4-6
Metallwiderstand, Temperaturmessung 3.3 -6
Mikrobewegungen 3-16
Mikromaschinen 3-4, 3.1-1
Fluggerät 3.1-3
Turbomaschinen/Turbinen 3.1-1, 3.1-2
Mikroskopische Bruchflächenanalyse 4.4-6
Erkennbarkeit von Rissfortschrittslinien 4.3-10
Probenentnahme 4.4-6
Mikroskopische Untersuchungen 2.2.2.4-1
Mindestfehlergröße, fortschrittsfähig 4.3-18
Miniaturisierung 3.1-1
Minimaschinen 3.1-1
Misstrauen als Motivationsbremse 2.2.2-10
Model Based Controls and Diagnostics (MBCD) 3.3 -18
Modellbasierte Verfahren, Maschinenüberwachung 3.3 -20
Moderator bei Problemanalysen 2-11
Monitoring (Überwachung) von Maschinen 1-4
erforderliche Daten 3.3 -12
mit Hilfe des Regelungssystems 3.3 -20
Problematik des Health Monitoring 3.3 -16
Monitoring an einem Flugtriebwerk
Beispiel 3.3 -18
Trends des Triebwerkszustands 3.3 -20
Monolithische Keramik 3-25
Montage
Beschädigung, Kerbe 4.4-6
Fremdkörper 2.3-8
Turbinenscheibe 3.2-4
Motivation 2.2.2-10
im Studium 2.2.2.2-1
Motorenkomponenten/-teile
Keramische 3-36
Schadensmechanismen 2.2.2.2-2
Steuerung 3.3 -11
Elektronische 3.3 -10
Geräte 3.3 -10
Sensoren 3.3 -10
Anbringungsort 3.3 -11
Zugänglichkeit 3.3 -11
Murphy's Gesetz 3.2.2 -3
Mussziele einer Entscheidungsanalyse (EA) 2.2.2-11
Mustererkennung 3.3 -22

N

Nacharbeit/Nachbearbeitung
an Fehlstellen 2.2.2.4-9
Keramischer Bauteile 3-34
Nachbehandlung von Schichten 4.2-5
Nachempfundene Konstruktionen 1-3
Nachgiebigkeit (niedrige Steifigkeit) 3-15
Nebenrisse
REM-Befund 4.4-8
Schwingbelastung 4.4-8
Negatives UW (Ursache-Wirkungs)-Diagramm 2.2.2-2
Neigetechnik 1.1-2
Nernstsonde 3.3 -8
Netz (Computerprogramm)
Bayes'sches 3.3 -15
Lernfähigkeit 3.3 -22
nach Petri 3.3 -21
Neuronales 3.3 -22
Probabilistisches 3.3 -15
Neue Technologien 1-4
Ni-Schicht, Schwingfestigkeit 4.2-12
Nietverbindung 3-12
No start. *Siehe* Fehlstart: Restkraftstoff
Normteile, Auswahl 1-5
Nutzbare Werkstofffestigkeit 3.2-2
Nutzungsintervalle 1-6

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

O

Oberfläche
Beschädigungen, Auswirkung 4.1-3
mit hoher Schwingfestigkeit 4.3-24
Oberflächenfehler 4.3-23, 4.3-24
Oberflächentopografie, Einfluss auf Rissbild 4.4-18
Oberflächenzonen, REM-Befund 4.4-8
Öl
Messung von Viskosität, Leitwert und Permittivität 3.3 -9
Zustandssensoren 3.3 -9
On condition Überholung 2.3-9
Online Überwachung 3.3 -3
Optische Aufnehmer 3.3 -7
Drehmomentsensor 3.3 -5
Oxidation 1-7
Einfluss auf
Klaffen eines Risses 4.4-19
Rissfortschritt 4.3-33
Rissgrund 4.4-19

P

PA (Problemanalyse) 2-7
Panzerungen, Labyrinthe, Schaufelspitzen 4.2-3
Parallelschäden 3.2.2 -4
Parameter, nicht direkt messbare 3.3 -20
Paris-Diagramm/-Gleichung 4.4-15
Risswachstum 4.3-5
Partikel
Erosion 1-7
Filter/Rußfilter 3-37
REM-Befund 4.4-6
Passflächenkorrosion. *Siehe* Fretting
Passungsrost. *Siehe* Fretting
Permittivität, Messung bei Öl 3.3 -9
Petri Netz (Computerprogramm) 3.3 -21
Piezoelektrisch
Drehmomentaufnehmer 3.3 -5
Druckaufnehmer/-sensor 3.3 -5
Plastische Verformungen, Bruchmerkmale 4.4-5
Platindraht eines Thermoelements, Katalysator-effekts 3.3 -6
Plausibilitätskontrollen, Diagnose 3.3 -14
Porosität, Einfluss auf Schichtverhalten 4.2-6
Potenziometer 3.3 -4, 3.3 -7
Praktikum
Ausrüstung 2.2.2.2-3
Dokumentation 2.2.2.2-3
Präparation, REM-Proben 4.4-6
Präsentation der 2.2.2.2-3
Problemanalysen 2.2.2.2-1
Technische Anatomie 2.2.2.3-1, 2.2.2.3-3
Untersuchungsobjekt 2.2.2.2-2, 2.2.2.2-3
Vorgehen 2.2.2.2-3
Primärriss, Identifikation 4.4-15
Primärschaden, Merkmale einer Kerbe 4.4-9
Probabilistische Netze (Computerprogramm) 3.3 -15
Proben
Entnahme
Bruchfläche 4.4-2, 4.4-5
für Metallografie 2.2.2.4-6
mikroskopische Bruchflächenanalyse 4.4-6
Orientierung im REM 4.4-6
Problem
Auswirkung, Wirkung 2.2.2-5
besondere Merkmale 2.2.2-7
Definition 2-1
vor Analyse 2.2.2-2
Problemanalyse 1-3, 2-7
Abgrenzung des Problems 2.2.2-7
Aussage ivon Veränderungen 2.2.2-7
Beispiele 2.2.2.1-1
Definition des Problems 2.2.2-5
Dehnungsmessstreifen 3.3 -4
im Team 2.2.2.2-3
Laboruntersuchungen 2.2.2.2-1
Minimierung/-Vermeidung, Konstruktion und Auslegung 1-3, 3.2-1
Praktikum 2.2.2.2-1
Schritte 2.2.2-3
Vorbeugung 2-1
Vorgehensweise 2.2.2-1
Vorteile 2-5
Problemanalytiker 4.4-1
Problematik der Hybridbauweise 3-25
Problembeschreibung 2.2.2-5, 2.2.2-6
Abgrenzung 2.2.2-7
Problemdiagnose, Beispiel 3.3 -15
Prognose, Definition 3.3 -16
Projektbeginn, Betriebseinflüsse identifizieren 1.1-1
Proof Test 4.4-17
Propeller, erzeugt Schallermüdung 3-19
Prozesskontrolle, Beschichtung 4.2-4
Prozessschritt-Diagramm 2.2.2-3
Pyrometer 3.3 -6

Q

Qualitative Modelle, Diagnoseergebnis 3.3 -17
Qualität
Kontrolle, keramische Bauteile 3-34
Maßstäbe, Leichtbau 3.2-1
Sicherung, erfolgsabhänig von Fehlergröße 4.3-12
Quantitative Modelle für Diagnoseergebnis 3.3 -17
Querschnitt
Einfluss auf Rissfortschrittsgeschwindigkeit 4.3-15
Fehlerverteilung 4.3-23

© KAI Rossmann - Turbocasun
alle Schulungsunterlagen mit Lizenz

R

Radachsen (Zug)
Bruch 1-1, 1.1-1
Radaufhängung, Leichtbau 3-24
Random failures 2.3-9
Rasterelektronenmikroskop (REM) 2.2.2.4-7
Rastlinien 4.3-3, 4.4-5
Abstand 4.4-5
Muster 4.4-5
Schlüsse 4.4-8
RBSN (reaktionsgebundenes Si_3N_4) 3-38, 3-39
Reaktionen mit Oxidschicht 1-7
Realtime Überwachung 3.3 -3
Recherchen für Faktensammlung 2.2.2.1-2
Redundanz 3.2.2 -3
Regelungssystems als Monitoringelement 3.3 -20
Regenerosion. *Siehe* Tropfenschlag
Regensensor 3.3 -9
Reibkorrosion. *Siehe* Fretting
Reibrost. *Siehe* Fretting
Bildung 3-16
Reibschweißen 3-34
Reibung
Einfluss auf Spannungen 3-25
Rissufer Dämpfung 4.3-28
Reibverschleiß. *Siehe* Fretting
Reihenfolge der Rissentstehung 4.4-15
Reinigung
bei Untersuchung 2.2.2.2-3
Reißlänge (spezifische Festigkeit) 3-7, 3-10
REM (engl. SEM) 2.2.2.4-7. *Siehe auch* Elektronenmikroskopische Bruchflächenauswertung
Befund 4.4-6
Analysenergebnisse 4.4-8
Auffälligkeiten 4.4-6
Beanspruchungsrichtung 4.4-12
Beläge 4.4-6
Bruchbahnen 4.4-8
Gefügemerkmale 4.4-8
Gewaltbruch 4.4-8
Hinweis auf Folgeschaden 4.4-8
Nebenrisse 4.4-8
Oberflächenzonen 4.4-8
Partikel 4.4-6
Rissfortschritt 4.4-8
Schadensursächliche Beschädigung 4.4-8
Schluss auf äußere Einflüsse 4.4-8
Schluss auf Kraftrichtung 4.4-6
Schluss auf Verformungsrichtung 4.4-6
Schwingbruch Ausgang 4.4-8
Spannungsrisskorrosion 4.4-8
Spröde Merkmale 4.4-6
Verformung der Bruchfläche 4.4-8
Verunreinigungen 4.4-6
Wasserstoffversprödung 4.4-8
Werkstoffverhalten 4.4-6
Zähe Merkmale 4.4-6
Zeitzuordnung Schadensablauf 4.4-6
Untersuchung mit Folienabdrücken 2.2.2.4-8
Remote (wenig wahrscheinlich) 2.3-5
Reparatur, integraler Bauteile 3-25
Reparaturfähigkeit 1-5
Reservoirwirkung von Schichten 4.2-4
Resistive Aufnehmer 3.3 -4
Resonanz
verlassen bei Rissbildung 4.3-28, 4.3-33
Restbruch (*siehe* auch Gewaltbruch) 4.3-3, 4.3-7
Ausbreitungsrichtung, 4.4-5
Größe, Rückschlüsse 4.4-2
Hinweise auf Zähigkeit 4.4-6
Identifikation 4.4-12
Scherlippe 4.4-6
Schluss auf
Belastungsniveau 4.3-3
Spannnungszustand 4.3-4
Restlaufzeiten/-lebensdauer,
Abschätzung 1-4
festelegen 4.3-2
Restsauerstoff, bestimmen in Verbrennungsgas 3.3 -8
Retirement for Cause 1-5
Revolutionäre Technologie, Risiken 3-7
Richtung einer Schlussfolgerungen 3.3 -21
Ringzone einer Bruchfläche an der Bauteiloberfläche 4.4-6
Risiko
Abschätzung 2.3-1, 4.3-30
Analyse 2-2
notwendige Erfahrung 2.3-1
Vorgehensweise 2.3-6
Bewertung mit FMEA 2-4
einer Maßnahme 2.2.2-11
Minimierung 2-2
Maßnahmen nach FMEA 2-4
Risikozahl/-prioritätszahl 2-3
Riss
„Abfangen“ 4.3-17
Ausbreitung
Einfluss des Spannungsgradienten 4.3-17
wird langsamer 4.3-17
auslösende Kerben 4.3-15
beeinflusssende Atmosphäre, Schleuderstände 4.3-19
Beginn, Rückschlüsse aus Lage 4.4-2
„Beherrschbarkeit“ 4.3-17
Bildung von Wasserstoff aus Wasserdampf 4.3-19
Bruchmerkmale dynamischer Beanspruchung 4.4-9
Chance des Findens vor Bruch 4.3-17
entlang Korngrenzen 4.4-21

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Entstehung, Reihenfolge 4.4-15
in Oberflächennähe 4.3-9
Innen liegend 4.3-33
Klaffen 4.4-19
Oxidation 4.4-19
Kanten aufgestaucht 4.4-19
Schluss auf Fortschrittsrichtung 4.4-2
Stehen bleiben 4.3-33
Threshold (Grenz-) bedingungen 4.3-21
verlangsamt sich 4.4-2
Verlauf, charakteristisch 4.4-20
Wasserstoffinduziert 3.2.2 -1
Zuklemmen der Ufer 4.4-20
Rissbild
Analysieren 4.4-1
Einfluss der Oberflächentopografie 4.4-18
Einfluss von Ablagerungen 4.4-18
Einfluss von Ätzspuren 4.4-18
Einfluss von Bearbeitungsriefen 4.4-18
Einfluss von Erosionsmerkmalen 4.4-18
Einfluss von Kugelstrahlmerkmalen 4.4-18
Heißgaseinfluss 4.3-22
Rissbildung
Austritt aus der Resonanz 4.3-28
Dämpfungswirkung 4.3-33
Frequenzabfall 4.3-28
Frequenzeinfluss bei Korrosion 4.3-19
Grenzwert für Fehlergröße 4.3-3
in Cr-Schicht 4.2-6
Stadium I 4.3-9
Verlassen bei Resonanzfall 4.3-33
Rissempfindlichkeit, Werkstofffestigkeit 4.3-11
Rissflächen-Untersuchungen, Aussagen 4.3-3
Rissfortschritt 3.2.2 -6**,** 4.3-1, 4.3-7
Beanspruchung bei 4.4-15
bei Korrosionseinfluss 4.3-19
Belastungsabhängigkeit 4.3-5
Einfluss
auf die Rissspitze 4.3-22
der Festigkeit 4.3-11
der Oxidation 4.3-33
des Gefüges 4.3-33
Struktur 4.3-21
von Druckeigenspannungen 4.3-33
von Frequenz 4.3-19
von Sauerstoff 4.3-19
von Wasserdampf 4.3-19
Geschwindigkeit 4.3-1, 4.3-12
Beherrschbarkeit 4.3-17
Heißgaseinfluss 4.3-22
Querschnittseinfluss 4.3-15
Grenzwert (engl. Threshold) 4.3-21
Im Schutzgas 4.3-19
in Heißgas 4.3-22
REM-Befund 4.4-8
Richtung, einfluss des Spannungsgradienten 4.3-33
Rissgröße 4.3-21
Risszähigkeit 4.3-33
Rückschlüsse 4.4-2
stabiler 4.3-3
unterkritisch 4.3-1, 4.3-12
verzögert 4.3-32
Rissfortschrittslinien 4.3-10
Entstehungsmodell 4.3-10
Fehlinterpretation 4.3-10
mikroskopisch 4.3-10
Rissgröße, Rissfortschritt 4.3-21
Rissgrund, Oxidation 4.4-19
Risskorrosionen 4.3-22
Risslänge 4.3-21
kritische 4.3-3
wachstumsfähige, Spannungsgradient 4.3-20
Rissmerkmal von Brünierbad 4.4-5
Rissöffnungsarten, bruchmechanisch 4.3-5
Rissspitze 4.3-8
Einfluss des Rissfortschritts 4.3-22
Rissstillstand 4.3-33
Rissstopper-Effekt, Gefügeinhomogenitäten 4.3-33
Rissverhalten, Konstruktionsphilosophie 3-29
Rissverlauf 4.4-1
im Gefüge
Rückschluss auf Schadensmechanismus 4.4-20
typische Merkmale 4.4-20
unter Kreiselkräften 4.4-3
Risswachstum 4.3-24
bei Biegung 4.3-26
Berücksichtigung in Auslegung 1-4
E- Modul 4.3-34
Faserstruktur 3-29
Fehlstellen 4.1-3
Frequenzeinfluss 4.3-18
Gusswerkstoff 4.3-19
Parisgleichung 4.3-5
Phase des 3.2-2
stabiles 4.3-5
Temperatureinfluss 4.3-19
Unterkritisch 3-39
Unterschiede kurzer und langer Risse 4.3-21
Werkstofffestigkeit 4.3-33
Risszähigkeit 4.3-7
Rissfortschritt 4.3-33
Schluss aus Kerbschlagzähigkeit 4.3-12
Roboter, bodengebundene 3.1-3
Rohteilbeschaffung 4.1-3
Rotorscheibe, Bauart en 3-27
RPZ (Risikoprioritätszahl) 2-3, 2-4
Rückrufaktionen 2.2.2-1, 2.3-1
Rückschlüsse
Anrissort 4.4-1
aus Bruchflächen 4.4-1

© Vereinsmann - Tuppenpraxis
als Schulungsunterlage zur Verfügung

Betriebsbruch 4.4-2
Restbruchgröße 4.4-2
Rissbeginn 4.4-2
Rissfortschritt 4.4-2
RZ (Risikozahl bei FMEA) 2-3, 2-4

S

SA (Situationsanalyse) 2-7
Sandwichstrukturen 3.1-1
Sauerstoff, Einfluss auf Rissfortschritt 4.3-19
Scanning Electron Microscope (SEM = REM) 2.2.2.4-7
Schaden
Abfangen 4.3-31
Definition 2-1, 3.3 -16
Erfahrungsgewinn 4.4-1
rechtzeitig erkennen 3-31
Vorläufer, Definition 3.3 -17
Schadensakkumulation 3.2-5
Schadensanalyse 3.2.2 -4
Begriff 2-5
Definition 2-5
Faktensammlung 2-6
Teamarbeit 2.2.2.4-4
Schadensanalytiker 3.2.2 -4, 4.4-1
Schadensbild
Beispiel 2.2.2.1-11
Schallermüdung 3-19
Spiralfeder 3.2-7
Schadenseintritt, Wahrscheinlichkeit 2.3-1
Schadensfolge, Bauteilverhalten bei Schaden 4.1-9
Schadensklärung
Literatur 1-2
makroskopische Bruchflächenanalyse 4.4-3
Schadensmechanismen
Motorenteile 2.2.2.2-2
notwendige Kenntnis 3.2-2
Rückschluss auf Rissverlauf im Gefüge 4.4-20
Zusammenwirken 3.2-5
Schadensstatistik, Fremdkörperschäden 2.3-8
Schadensuntersuchung 1-6
Begriff 2-5
Untersucher 3.2.2 -4
Schadensursächlich
Beschädigung 4.4-8
Einflüsse 3.2.2 -3
Fehler 3.2.2 -4
Vorgehen zur Ermittlung 3.2.2 -6
Schadensverhütung 3.2-1
Maßnahmen 2.2.2-12
Schädigung
Phase, Beanspruchung 4.3-29
Verlauf, Definition 3.3 -17
Schallermüdung 3-19
durch Abgasstrahl 3-19
durch Propeller 3-19
Schadensbild 3-19
Schälung
Effekt (bei Lötungen und Klebeverbindungen) 3-23
Schichtbelastung 4.2-9
Schaufeln (Strömungsmaschinen)
Schwingungen 3-16
Spitzen, Panzerungen 4.2-3
Scheibenbremsen, keramische 3-39
Scheinbare Redundanz 3.2.2 -3
Scherbruch 4.4-9
Scherflächen 4.3-4
Scherlippe an Restbruch 4.4-6
Schicht
Aufbau von Mikro-Bauteilen 3.1-1
Belastung durch Schälung 4.2-9
Dicke (Diffusionsschicht) 4.2-4
Eigenschaften, Einfluss auf Bauteilverhalten 4.2-1
Eindringprüfung 4.2-4
Einfluss
auf die Schwingfestigkeit 4.2-3
der Porosität auf das Verhalten 4.2-6
Einlaufverhalten
Beeinflussung duch Nacharbeit 4.2-6
FOD (Fremdkörper)-Resistenz 4.2-4
Glätten 4.2-6
Härte bei Nacharbeit 4.2-6
Kugelstrahlen 4.2-6
Nachbehandlung 4.2-5
Thermografie 4.2-4
Überschleifen 4.2-6
verbliebener Bearbeitungsstaub 4.2-6
Verfestigen 4.2-6
Verschleiß 4.2-4
Werkstoff 3-21
Aufbau 3-21
Fail-Save-Verhalten# 3-21
ZfP (zerstörungsfreie Prüfung) 4.2-4
Schiffe, Leichtbau 3-4
Schlagbeanspruchung 4.1-9
Schlagzähigkeit von EK-Werkstoffen 4.1-9
Schleuderstände, rissbeeinflusssende Atmosphäre 4.3-19
Schliff (metallografischer) 2.2.2.4-2
Auswirkung ser Lage auf den Befund 2.2.2.4-6
Schlussfolgerungen, Schlussrichtung
Diagnostische 3.3 -21
Kausale 3.3 -21
Schmelzstrukturen, mikroskopische auf Bruchfläche 4.4-21
Schraube
Spannungsrisskorrosion 2.2.2.1-2
zu hohe Härte 2.2.2.1-2
Schraubenköpfe, Messung der Auflagepressung 3.3 -5

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schulung, Trainerauswahl 2-11
Schulungsunterlagen für Wartung 3-13
Schusssicheren Westen, Technologie 3-25
Schutz, ballistischer 3-25
Schutzgas, Einfluss auf Rissfortschritt 4.3-19
Schutzwände gegen Durchschlag (engl. Containment) 3-25
Schwachstelle 2-2, 3.2-2, 3.2.2 -4
abgesicherte Einstufung 3.2.2 -6
als Vorteil 3.2.2 -8
bauteiltypisch 4.3-32
Definition aus Betriebserfahrung 3.2.2 -6
hochbelasteter Bauteile 3.2.2 -1
Schwellenwert 3.2.2 -4
Schwingbelastung, Rückschluss aus Nebenrissen 4.4-8
Schwingbruch 4.3-3
Ausgang 4.4-8
Bruchbahnen 4.4-8
Hohlwelle 4.4-2
Schwingermüdung durch Schall (Schallermüdung) 3-19
Schwingfestigkeit
Auswirkung der Zerspanung 1.1-2
Cr- und Ni-Schichten 4.2-12
Einfluss von Schichten 4.2-3
erhöht an der Oberfläche 4.3-24
Hartverchromung 4.2-10
Schwingriss, Inkubation 4.3-3
Schwingstreifen. *Siehe* Bruchfortschrittslinien
Schwingung
Anregung, aerodynamische 3-16
Bauwerke 3-18
Dachantennen 3-19
Flugzeugtragflächen 3-18
Schaufeln von Turbomaschinen 3-16
selbsterregend 3-16
Schwingungssystem, Steifigkeitseinfluss 3-18
Schwingverschleiß. *Siehe* Fretting
Schwitzwasser 1.1-2
Scruton-Spirale 3-19
Segmentierungsrisse in Wärmedämmschicht 4.2-3
SEM (REM), 2.2.2.4-7
Sensoren
Einfluss von Umgebungsbedingungen 3.3 -12
mit Impulsrad 3.3 -7
Motorsteuerung 3.3 -10
Zugänglichkeit 3.3 -11
Sensormatrix 3.3 -4
seriengeeignete ZfP-Verfahren 3.2-2
Severity. *Siehe* Lebensdauerverbrauch
Si-infiltrierte Kohlefaserstrukturen 3-39
Si_3N_4 (Siliziumnitrid) 3-39
SiC (Siliziumkarbid) 3-38, 3-39
SiC-C (Poröses Siliziumkarbid + Kohlenstoff) 3-39
Sichere Lebensdauer 1-3
Sicherheit
einer Technologie 3.2-6
Kugelstrahlen 3.2-7
von Fakten (für Problemanalyse) 2-6
Wärmedämmschicht 3.2-6
Sicherheitsbeiwerte/Sicherheitsfaktoren 1-1 3.2.2 -1
hochbelasteter Bauteile 3.2.2 -1
Sicherheitsrelevante Überlegungen 1-3
Sicherungsdraht als Fremdkörper 2.3-9
Silikongummi, Haftfestigkeit 4.2-9
Siliziumcarbid (SiC) 3-38
Siliziumnitrid (Si_3N_4) 3-39
Siliziumschmelze infiltriertes SiC (SiSiC) 3-39
Situation erkennen 2.2.2-3
Situationsanalyse (SA) 2-7, 2.2.2-3
Arbeitsblatt 2-2.23
Beispiele 2.2.2.1-1
Softwarem für Messdatenauswertung 3.3 -1
Sonde 'vergiften' 3.3 -9
Spacer. *Siehe* Rotorzwischenstufenringe
Spaltfläche im Bruch 4.3-10
Spannnungszustand, Schluss aus Restgewaltbruch 4.3-4
Spannungen
Einfluss Reibungseigenschaften 3-25
Messung 3.3 -4
Spannungsamplitude, Abschätzung aus Striations 4.4-16
Spannungsgradient
Einfluss auf
Rissausbreitung 4.3-17
Rissthreshold 4.3-20
Rissfortschrittsrichtung 4.3-33
Spannungshöhe, Abschätzung aus Sprödbruchfläche 4.4-13
Spannungsintensität (bruchmechanisch) 4.3-5, 4.3-7, 4.3-24
bei Fehlern 4.3-23
Spannungskonzentration, Amplitude 4.4-15
Spannungsniveau
aus Abstand von Bruchfortschrittslinien 4.4-15
Rückschluss aus Bruchstückgröße 4.4-15
Spannungsrisskorrosion
REM-Befund 4.4-8
Schraube 2.2.2.1-2
Werkstoff hoher Festigkeit 4.1-3
Spannungsverteilung, Rückschluss aus Sprödbruch 4.4-13
Speicherung von Messdaten 3.3 -1
Spezifikationen 3.2.2 -4**,** 3.2.2 -5
Spezifische Festigkeit (Reißlänge) 3-10
Spezifische Steifigkeit 3-10
Spiegelnde Bruchfläche 4.3-10

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Spiralfeder, Versagensbilder 3.2-7
Sportgeräte, Leichtbau 3-4
Sprödbruch 4.1-5
Ermittlung bei Anrisslage 4.4-17
Abschätzung aus Bruchfläche der
Spannungsverteilung 4.4-13
Spannungshöhe 4.4-13
Spröde Merkmale im REM-Befund 4.4-6
Spröde Werkstoffe
anrissursächlicher Fehler 4.4-17
Krafteinleitung 3-25
kritische Fehlergröße 4.4-17
Stabile Rissfortschrittsphase, stabiles Risswachstum 4.3-3, 4.3-5
Stabiles Betriebsverhalten 3.2.2 -8
Stadium I, Rissbildung 4.3-9
Stadium II, Rissbildung 4.3-10
Stall. *Siehe* Strömungsabriss: Verdichter
Stand der Technik 2.3-1
Standardwerke der Maschinenelemente 1-5
Statisch unbestimmte Bauweisen 3-29
Fail Safe-Verhalten 1-3
Statische Beanspruchung, Bruchbild 4.4-9
Statistik Ausfallhäufigkeit 2.3-8
Staubexplosion 1-3
Stehenbleiben eines Risses 4.3-33
Steifigkeit
angepasste 3-25
Schwingungssystem 3-18
spezifische 3-10
Steifigkeitssprung bei Lötung 3-23
Stellung rotierender Bauteile ermitteln 3.3 -7
Steuergeräte, Motorsteuerung 3.3 -10
Steuerungsanlagen 3.3 -3
Stoff-Leichtbau 3-7
Streckgrenzenverhältnis 4.1-5
Striations 4.3-10. *Siehe auch* Bruchfortschrittslinien
Stroboskop 3.3 -7
Strukturgewicht minimieren 3-3
Strukturkeramik 3-34, 3-38
Studium als Motivationsschub 2.2.2.2-1
Sub surface cracks 4.3-26
Symptome und Ursachen bei Diagnosen 3.3 -14
System
Modell 3.3 -20
Verhalten 3.3 -20

T

Tacho-Generator 3.3 -7
Tauglichkeitsnachweis einer Konstruktion 1.1-2
Tauschteile 1-5
Teamarbeit 2.2.2-2, 2.2.2.2-1
in der Schadensanalyse 2.2.2.4-4
Teambildung 2-11
"Technische Anatomie" 2.2.2.3-1
Praktikum, Untersuchungsobjekte 2.2.2.3-2
zur Überprüfung des Lernerfolgs 2.2.2.3-3
Technologie
Berücksichtigung in der Auslegung 3.2-6
Neue 1-4
Nutzung spezifischer Vorteile 3-7
Risiken revolutionärer 3-7
schusssichere Westen 3-25
Sicherheit 3.2-6
Temperatur
Einfluss auf Risswachstum 4.3-19
Messung 3.3 -5
Halbleiterwiderstände 3.3 -6
Heißfilm Sensor 3.3 -6
Keramikwiderstände 3.3 -6
Lasergestützte Anemometrie 3.3 -6
Metallwiderstände 3.3 -6
Pyrometer 3.3 -6
Thermische Anemometrie 3.3 -6
Thermoelektrische Aufnehmer 3.3 -5
Thermoelemente 3.3 -5
Verteilung aus Anlauffarben 4.4-5
Thermal Fatigue (TF = Thermoermüdung) 1-4
Thermal Mechanical Fatigue (TMF) 1-4
Thermische Anemometrie 3.3 -6
Thermische Belastungen 3.2-1
Thermische Ermüdung 1-4
Thermoelektrische Aufnehmer 3.3 -5
Thermoelement 3.3 -5
Ablagerungen , Einfluss auf Messung 3.3 -6
Ansprechgeschwindigkeit 3.3 -5
Einfluss unverbrannter Kohlenwasserstoffe 3.3 -6
Thermoermüdung (TF) 4.3-17
Thermografie zur Schichtprüfung 4.2-4
Threshold (Grenzwert) 4.3-19
Bedingungen Langer Risse 4.3-21
Rissbildung 4.3-3
Titanlegierungen, Festigkeitseigenschaften 3-10
Torsionsermüdung, Beispiel 4.4-2
Tragweite einer Maßnahme 2.2.2-11
Trainerauswahl für Schulung 2-11
Trend zum Leichtbau 1-4
Trennbruch 4.4-9
Anteil 4.4-13
Rückschlüsse 4.4-13
Tribokorrosion. *Siehe* Fretting
Triebwerksmodell, softwarebasiertes aero-thermodynamisches 3.3 -20
Tropfenschlag. *Siehe* Regenerosion
Turbinenscheibe
Auslegung 3.2-4
äußere Einflüsse 3.2-4
Betriebsprofil 3.2-4

© Veit Rossmann - Turbosonic
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung 3.2-4
Konstruktion 3.2-4
Montage 3.2-4
Überholung 3.2-4
Turbo-Mikrogeräte / Turbomaschinen, Mikrobauweise 3.1-2
Turbolader, Keramik 3-9

U

Überholung
Intervalle
friedensorientierte 2.3-9
konfliktorientiert 2.3-9
on condition 2.3-9
Philosofie 2.3-9
Turbinenscheibe 3.2-4
Überprüfen von Hypothesen 2.2.2-9
Überschleifen einer Schicht 4.2-6
Überwachung
Anlagen 3.3 -3
des Bauteilverhaltens 3.3-1
System 2.2.2-1
von Maschinen 2.3-1
modellbasierte Verfahren 3.3 -20
Uhrenindustrie 3.1-3
Ultra-high tensile strength 4.1-11
Ultraschall Abstandssensoren 3.3 -8
Ultraschallprüfung, Einfluss
auf die Festigkeitsnutzung 4.1-5
der Korngröße 4.1-5
Umformtechniken für Hohlstrukturen 3-34
Umgebungsbedingungen/-einflüsse 4.1-5
auf Sensoren 3.3 -12
Bruchbild bei dynamischer Beanspruchung 4.4-9
Kenntnis 1.1-2
Ungänze. *Siehe* Schwachstelle: Definition aus Betriebserfahrung
Ungewöhnlicher Zustand, Definition 3.3 -16
Unterkritisch, Rissfortschritt/Risswachstum 3-39, 4.3-12
Untersuchung
Ablaufplan 2.2.2.2-1
Befund, Einschätzung 2.2.2.4-6
Ergebnisse, Präsentation 2.2.2.2-3
Literaturstudium 2.2.2.2-3
Reinigung von Teilen 2.2.2.2-3
Schritte festlegen 2.2.2.2-3
Unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Einfluss auf Thermoelement 3.3 -6
Ursache-Wirkungs-Diagramm (UW-Diagramm = Fischgrätendiagramm) 2.2.2-2, 2.2.2-5, 2.2.2.1-2, 2.2.2.2-3
bei Fertigungsproblemen 2.2.2-3
Beispiel 2.2.2.1-2, 2.2.2.1-3, 2.2.2.1-12
Ursachen-Gruppen 2.2.2-3, 2.2.2.1-3

V

Veränderung
Aussage in Problemanalyse 2-2.27
an Bauteilen, Auswirkungen 3.2.2 -10
Verbesserung 3.2.2 -8
einer Konstruktion 1.1-1
Verbindung Keramik -Stahl 3-9
Verbrennungsgas, Restsauerstoff bestimmen 3.3 -8
Verbundbauweise, Kombination von Metallen 3-25
Verbunde im Leichtbau 3-3
Verfahren, Zulassung 3.2.2 -1
Verfärbung einer Bruchfläche 4.4-5
Verfestigung
Querschnittsabhängige Wirkung 4.3-26
Schicht 4.2-6
Verformung
Behinderung bei Bruch 4.3-8
Bruchfläche, REM-Befund 4.4-8
Richtung, Schluss aus REM-Befund 4.4-6
"Vergiftung" von Sonden und Katalysatoren 3.3 -9
Verhalten von Leichtbauten 3.2.2 -8
Verkehrssysteme, Leichtbau 3-4
Verkleben von Al-Profilen 3-9
Verlangsamung eines Risses 4.4-2
Vermutungen bei Faktensammlung 2.2.2-2
Versagen
Durch Bauteiländerungen 3.2.2 -10
Flugzeugflügel bei Überlast 3-22
Mechanismen keramischer Bauteile 3-36
werkstoffspezifisches 3-21
Modus
FVK 3-22
Lötung 3-23
Verhalten in Abhängigkeit von der Festigkeit 4.1-5
Verschleiß
Beschichtung 4.2-4
Betriebseinflüsse 4.1-8
Verschlimmbesserung 1-4, 3.2.2 -2, 3.2.2 -3
Beispiel 3.2.2 -10
Verschraubungen, Leichtmetalle 3-25
Versprödung, Betriebseinflüsse 4.1-7
Versuch
betriebsnah 1-6
Messungen 3.3 -4
Auswertung 2.2.2.2-1
Parameter definieren 2.2.2.2-1
Verunreinigungen, REM-Befund 4.4-6
Verzögerter Rissfortschritt 4.3-32
Verzögerungen messen 3.3 -8
Virtuelles Funktionsmodell, Diagnoseergebnis 3.3 -17
Viskosität, Messung bei Öl 3.3 -9
Volumenfehler 4.3-23, 4.3-24
Anrisslage 4.3-26
bei Biegung 4.3-26

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Vorbeuugung gegen Fehler und Probleme 2-1
Vorläufer von Schäden 3.3 -17

W

Wachstum von Rissen 4.3-1
Wachstumsfähiger Fehler 3.2-2
Wahrscheinlichkeit
A-posteriori- 3.3 -21
A-priori- 3.3 -20
der Entdeckung eines Fehlers 2-4
Erfolg einer Maßnahme 2.2.2-11
eines Fehlers 2-3
Schadenseintritt 2.3-1
Wahrscheinlichkeitseinstufung 2.3-5
Wallnerlinien 4.4-13
Wälzlager
Laufbahnermüdung 4.1-7
Leichtbau 3-24
Keramische 3-36
Warm- und Kriechfestigkeit 3.2-2
Wärmedämmschicht 4.2-3
Segmentierungsrisse 4.2-3
Sicherheit 3.2-6
Wärmefluss in einer Schicht 4.2-4
Wärmespannung 1.1-3
Anrisslage 4.3-24
Warmrissmerkmale 4.4-21
Wartung
Änderung 1.1-3
Besonderheiten 1-6
Durchführbarkeit 1.1-3
Programmversagen 3-13
Warum-Treppe 2-2.25
Beispiel 2.2.2.1-5, 2.2.2.1-12
Wasserdampf, Einfluss auf Rissfortschritt 4.3-19
Wasserstoff, Bildung aus Wasserdampf bei Rissen 4.3-19
Wasserstoffinduzierte Risse 3.2.2 -1
Wasserstoffversprödung
REM-Befund 4.4-8
Werkstoff hoher Festigkeit 4.1-3
Wear- out (in Badewannenkurve) 2.3-6
wear-in (in Badewannenkurve) 2.3-8
Weg
Aufnehmer 3.3 -7
Messung 3.3 -4
Weiterverwendbarkeit 1-5
Wellen, keramische 3-37
Werkstatt, Diagnosen 3.3 -13
Werkstoff
Änderungen 1.1-2
Besonderheiten, beanspruchungsspezifische 1-4
bruchmechanisches Verhalten 4.3-12
Daten
Bruchdehnung 4.3-12
Bruchzähigkeit 4.3-12
Fließgrenze 4.3-12
Eigenschaften
Betriebsatmosphäre 4.1-7
Einfluss der Betriebstemperatur 4.1-7
schadensrelevante 3.2-1
Einfluss auf das
Bauteilverhalten 4.1-3
Bruchbild bei dynamischer Beanspruchung 4.4-9
Fehler 3.2-2
Festigkeit
nutzbare 3.2-2
Risswachstum 4.3-33
steigende 4.1-4
Versagensverhalten 4.1-5
Gefüge, Veränderung im Betreib 4.1-7
Inhomogenitäten 4.3-21
Langzeitveränderungen 1.1-2
Nutzung höherer Festigkeit 4.1-3
Qualität entsprechend Belastung 1.1-1
Spezifisches Versagen 3-21
Veränderung im Betrieb 4.1-7
Verhalten
Beschichtungen 1-4
REM-Befund 4.4-6
Verbunde 1-4
Wechsel, Realisierungschance 4.1-3
Zulassung 3.2.2 -1
Werkzeugeindrücke, Kerben 4.4-6
Wet start. *Siehe* Fehlstart
Widerstand (Ohm'scher) 3.3 -7
Sonde 3.3 -8
Wiederverwendbarkeit 1-5
Wirbelbildung (Strömung) 3-16
Wirbelbrecher (Strömung) 3-19
Wirbelstrom
Drehmomentmesswelle 3.3 -5
Drehzahlmesser 3.3 -7
Prüfung (ZfP) 3-13
Wirkung eines Problems 2.2.2-5
Wissen, nicht bewusstes 1.1-1
Wissensbasiertes Diagnoseergebnis 3.3 -17
Wissensmanagement 1.1-1
Wunschziele 2.2.2-11

Z

Zähigkeit
Hinweise im Restbruch 4.4-6
Merkmale im REM-Befund 4.4-6
Zahnräder, keramische 3-36
Zeitpunkt dynamischer Beanspruchung ermitteln 4.3-27
Zuordnung aus REM-Befund 4.4-6

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Zerspanung
Einfluss auf Schwingfestigkeit 1.1-2
Parameter 1.1-2
Prozess, metallografischer Befund 2.2.2.4-6
Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) 4.1-3
Schicht 4.2-4
Cr-Schicht 4.2-4
notwendige Empfindlichkeit 4.1-3
Serieneignung 3.2-2
Zirkonoxid 3-39
Zufallsausfälle 2.3-9
Zugänglichkeit
am Bauteil 1-5
Sensoren Motorsteureung 3.3 -11
Zuklemmen eines Risses 4.4-20
Zulassungen, Werkstoffe, Hersteller, Verfahren 3.2.2 -1
Zustand einer Komponente, Aussagen 3.3 -20
Zuständigkeit für Abhilfemaßnahme 2.2.2-11
Zwänge bei Beurteilung der Schadensursache 3.2.2 -4

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz