## 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 1B: Auswirkungen mechanischer und thermischer Belastung: Schlag, Kriechen, Thermoermüdung, Schwingermüdung.



Axel Rossmann



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. Sie 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.

Der Teil "A" hat sich im Schwerpunkt mit allgemeinen Aspekten des Verhaltens von Maschinenelementen, insbesondere in Leichtbauten befasst. Dabei wurde auf die Vorgehensweise bei der Lösung von technischen Problemen mit Hilfe einer systematischen Problemanalyse Wert gelegt.

Der hier vorliegende Teil "B" des Band 1 widmet sich besonders den Auswirkungen mechanischer Belastungen auf Elemente des modernen Maschinenbaus. Zu dem Begriff 'mechanische Belastung' gehören gerade auslegungsrelevante Effekte die früher bei konventionell großen Sicherheitsabsänden nicht in den Blickpunkt des Konstrukteurs gerieten. Typisch sind Aspekte wie dynamische Wärmespannungen (Thermoermüdung) und zyklische Belastungen im plastischen Bereich (LCF) welche eine begrenzte Auslegungslebensdauer erfordern. Im Unterschied zum vorliegenden Band werden im Band "C" 'Betriebseinflüsse' wie Korrosion und Erosion behandelt. In diesem Zusammenhang wurde auch auf Erfahrungen aus Turbo-Flugtriebwerken, als eine Spitze des Maschinenbaus zurückgegriffen. Hier gelten bereits historisch Vorgehensweisen die im modernen Maschinenbau (Leichtbau) immer wichtiger werden.

Axel Rossmann

# 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)



- **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.

## Inhalt

Vorliegender Band 1B 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

## 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
    - 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

# Mechanische Belastungen

## 5. Effekte und Mechanismen der Betriebseinflüsse

## 5.1 Wechselseitige Beeinflussung von Effekten



Diese Skizze zeigt den Mechanismus eines verstärkten **Erosionsvorgangs in und um ein La**byrinth.

Erosiver Labyrinthabrieb von Spitzenpanzerungen oder Einlaufschichten kann aus dem Labyrinth ausgeblasen werden und sich in benachbarten Gehäusebereichen fangen. Dort wird der Staubfilm herumgewirbelt. Es kommt bei ausreichend hohen Betriebstemperaturen zu einer Kombination von Erosion mit der Oxidation der immmer frischen und damit reaktiven Metalloberflächen. So wird der Abtrag deutlich verstärkt und kann mehrere Millimeter dicke Querschnitte durchdringen.

Ist bereits die Berücksichtigung der Auswirkung einzelner Effekte nicht einfach, erhöht sich die Schwierigkeit mit mehreren **Effekten** die sich **wechselseitig beeinflussen**. Dies entzieht sich gewöhnlich der Berechnung und muss entsprechend der praxisrelevanten Erfahrung abgeschätzt werden. Danach sollte ein **Tauglichkeitsnachweis** in Betriebsversuchen erfolgen.

Das oben dargestellte Beispiel zeigt einen Fall, bei dem sich der Verschleiß durch die Kombination einer scheinbar harmlosen erosiven Belastung durch gleichzeitige Oxidation gefährlich verstärkt.

### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Wechselseitige Beeinflussung von Effekten





Bild 5.1-1 (Lit. 5.1-1): Unter der Inkubationszeit versteht man, ähnlich wie bei natürlichen Vorgängen (z.B. in der Medizin und Biologie), die Zeitspanne ab dem Einwirken eines Einflusses bis zu dessen charakteristisch schädigender Wirkung (Kapitel 5.9.1). Während der Inkubationszeit erfolgen bereits schädigende Veränderungen, die jedoch das makroskopische äußere Verhalten scheinbar nicht schädigend verändern. Typische Schadensmechanismen mit ausgeprägter Inkubationszeit können Schwingermüdung, Erosions- und Korrosionsvorgänge sein.

Bei Schwingermüdung von Metallen laufen im Mikrobereich des Gefüges Veränderungen wie Verfestigung, Entfestigung oder Rissentstehung ab, die am Ende der Inkubationszeit zu makroskopischem Risswachstum führen.

Bei Erosionsvorgängen können während der Inkubationszeit Zerrüttungsvorgänge auftreten oder Erosionspartikel in der Oberfläche stecken bleiben. Diese Vorgänge können den Abtrag als Erosionseffekt begrenzte Zeit deutlich verringern. Man kennt sogar den Effekt, dass zu Beginn der Erosion die stecken gebliebenen Erosionspartikel eine Gewichtszunahme der beanspruchten Probe bedingen (Bild 5.5.1.1-5). Bei Korrosionsvorgängen werden während der Inkubationszeit häufig schützende Qxidschichten gebildet. Die Inkubation endet dann, wenn das Medium direkt auf das Grundmaterial schädigend einwirken kann.

Die Inkubationszeit wird in der Technik genutzt, um bei lebensdauerbegrenzten Komponenten akzeptable Lebensdauern bzw. Ausfallsicherheiten zu erzielen. Ein Beispiel ist der Lebensdaueranteil der Inkubationszeit bei LCF-beanspruchten Bauteilen.

Der Schwellenwert (engl. threshold, Bild 4.3-3) bezeichnet einen Grenzwert, hier eines schädigenden Einflusses. Bei Überschreitung wird dieser schadenswirksam. Schadensmechanismen eines oder mehrerer schädigender Einflüsse mit jeweiligen Schwellenwerten sind recht häufig. Bei Ermüdungsvorgängen ist die Dauerfestigkeit ein dynamischer Belastungsschwellenwert. Erst oberhalb dieser Belastung ist mit einem Schwingbruch zu rechnen. Ähnliche Schwellenwerte kann man auch bei Bauteilen mit inneren und äußeren Kerben (innen: z.B. Mikrorisse, Lunker, Fehlstellen; außen: z.B. Riefen, Gefügeveränderungen) bezüglich einer bestimmten Spannungskonzentration ( siehe Bild 4.3-3) beobachten.

### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Wechselseitige Beeinflussung von Effekten

Ein geradezu klassisches Beispiel für das Schwellenwertverhalten ist die Spannungsrisskorrosion (SpRK, engl SCC, siehe Kapitel 5.6.3). Die typische Rissbildung erfolgt erst, wenn bei einem für das Korrosionsmedium empfindlichen Werkstoffzustand ein bestimmtes Zugspannungsniveau überschritten wird. Bei Erosionsvorgängen kann ein Schwellenwert durch die Härte der erosionsbeanspruchten Oberfläche im Vergleich zur Härte der Erosionspartikel bedingt sein (Bild 5.5.1.1-2).

Das "Schwellenwertverhalten" ist von größter Bedeutung für die Technik. Die Auslegung dauerfester Bauteile, die Einschätzung der Zulässigkeit bestimmter (unvermeidlicher) technologiecharakteristischer Fehler und Schwachstellen bei Auslegung und Risikoabschätzungen nutzt diesen Effekt.

Wie nach der Inkubationszeit der zeitliche Schadensverlauf erfolgt, kann von verschiedenen Parametern abhängen, die nicht unbedingt die gleichen wie diejenigen sein müssen, die den Schwellenwert bestimmen.

Handelt es sich im Schadensverlauf z.B. nicht um Korrosion, sondern um zyklisches Risswachstum durch eine Schwingbeanspruchung, so sind wahrscheinlich andere Gefügebesonderheiten ausschlaggebend.

#### Bild 5.1-2:

Bild oben (Lit. 5.1-1 und Lit. 5.1-2): Der Abtrag an einer Heißteiloberfläche kann durch die Kombination von Erosion und Oxidation stark beschleunigt werden. Spröde Oxidationsschichten sind für steile Aufprallwinkel (Bild 5.5.1.1-1), wie sie an der Eintrittskante der Schaufelblätter zu erwarten sind, besonders erosionsempfindlich. Der Erosionsabtrag der schützenden Oxidschichten legt reaktive frische Metalloberflächen frei, die entsprechend heftig oxidieren.

Eine ähnliche Erscheinung tritt dann auf (Lit 5.1-5) wenn **Staubpartikel** in der Brennkammer **aufgeschmolzen** werden und auf den vergleichsweise kalten gekühlten Oberflächen der Heißteile, insbesondere den Schaufelblättern, beim Auftreffen**festkleben** (engl. glassing, Lit. 5.1-6).

Die Staubschmelzen können sich mit den relativ rauen Oxidschichten verklammern und/oder mit diesen reagieren. Damit entsteht eine festhaftende Verbindung. Auf diese Weise kann besonders der Durchtrittsquerschnitt an Leitapparaten (nozzle) der Hochdruckturbine so zugesetzt werden, dass das Triebwerk bei Leistungserhöhung leicht ins Pumpen gerät (Lit. 5.1-6).

Beim Abstellen des Triebwerks erstarren diese Schichten zu spröden Belägen unter Rissbildung und platzen mit den schützenden Oxidschichten ganz oder teilweise ab (Lit. 5.1-7).

Beim erneuten Betrieb oxidieren die frischen metallischen Flächen besonders stark und der Vorgang wiederholt sich bei erneutem Staubeintritt in das Triebwerk.

**Bild unten:** Lösbare **Wellenkupplungen** in Form von **Steckverzahnungen** werden häufig in Triebwerken verwendet. Die Verzahnungen sind gewöhnlich nicht sehr hoch belastet, weisen relativ lose Schiebesitze auf und sind schlecht geschmiert. Steckverzahnungen werden an Hauptwellen und Hilfsgeräten angewandt (Skizze oben "1" bis "6").

Gesteckte Wellenverbindungen sind äußerst zuverlässig wenn zumindest die folgenden Bedin-





gungen gewährleistet werden um unzulässigen Fretting-Verschleiβ zu vermeiden:

- geeignete Werkstoffkombination (Tribosystem)

- ausreichende Schmierung. Besonders gefährlich ist es, wenn es gelingt Steckwellen so abzudichten, dass das in der Entwicklungs- und

#### Zulassungsphase vorhandene Lecköl als Schmiermittel fehlt.

- -begrenzte Schwingungen (z.B. Torsionsschwingungen)
- ausreichendes Fluchten der rotierenden Komponenten

## Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Wechselseitige Beeinflussung von Effekten



- abgestimmte Steifigkeiten, um Relativbewegungen in der Verzahnung zu minimieren
- keine Überlastungen im Betrieb (z.B. durch Stoβbeanspruchung), bzw. richtige, betriebsnahe Auslegung.

Sind einzelne dieser Bedingungen nicht gegeben, ist Verschleiß in der Verzahnung zu erwarten. Oberflächenbehandlungen wie Einsatzhärten, Nitrieren oder Verchromen sind offenbar kein ausreichend sicherer Schutz. Dagegen haben zumindest im Einzelfall Vakuumbeschichtungen wie Sputtern oder Ionen-Plattieren deutliche Lebensdauerverlängerungen gebracht (Lit. 5.1-8). Ein Verschleißschaden wird häufig erst dann erkannt, wenn die Kupplung außer Eingriff gerät (Bild 5.9.3-1, Lit. 5.1-9 und Lit. 5.1-10). **Bild 5.1-3** (Lit. 5.1-4): Beeinflussen sich zwei Schadensmechanismen gegenseitig, ist diese Auswirkung theoretisch, wenn überhaupt nur schwer, für die Auslegung ausreichend verlässlich abzuschätzen. Ein typisches Beispiel ist die **Kavitationserosion**. Dabei trägt die Erosion schützende Reaktionsschichten (z.B. Oxide) ab. Mit den frischen, hochreaktiven Metallflächen kann das Strömungsmedium nun stark reagieren. Dieses 'Spiel' wiederholt sich und es kommt zu einer hohen Abtragsgeschwindigkeit.

#### 5.1.1 Wechselwirkung elektrisch leitender Flüssigkeiten mit Magnetfeldern und elektrischen Feldern.



Effekte der **Magnetofluiddynamik** bzw. **Magnetohydrodynamik** an Maschinenelementen dürften mit der Anwendung elektrischer Antriebe in Fahrzeugen, der Erzeugung regenerativer elektrischer Energie (Windenergie, Solarthermie) und statt Hydraulik in Aktuatoren, steigende Bedeutung erlangen. Beispielsweise ist denkbar, dass die Schmierung von Wälzlagern oder die Auswirkungen größerer Schwitzwassermengen in Meeresatmosphäre schädigend wirken. Es ist also von Vorteil, wenn solche dem Maschinenbauer eher fremde Zusammenhänge, bewusst sind.

Hier wird lediglich auf potenzielle Auswirkungen auf **leitende Flüssigkeit**en aufmerksam gemacht. Es kann sich sowohl um gut leitende Flüssigkeiten wie **Metallschmelzen** als auch relativ schlecht leitende wie Salzwasser und andere **Elektrolyte** handeln. Solche niedrigen Leitfähigkeiten sind beispielsweise von Verschmutzungen durch Salze zu erwarten. Bei Problemen in entsprechenden Systemen sind zu berücksichtigen:

- Kraft: Bewegung von Flüssigkeiten, Rühren, Fördern, Verzögern insbesondere von Metallschmelzen. Wirkung der beeinflussten Strömung : z.B. Erosion auf Anschmelzungen von Rohrleitungen und Gefäßen. Erosion von schützenden Reaktionsschichten und/oder ein intensiverer Elektrolytaustausch kann sich beschleunigend auf Korrosion auswirken. Auch galvanische Vorgänge wie in der Fertigungstechnik können unterstützt oder beeinträchtigt werden.
- Aufheizung.
- Strömungsbeeinflussung (turbulent in laminar).
- Durchfluss an Spalten und Öffnungen.
- Rückwirkung der Flüssigkeit auf die Felder (Strömungssonden).
- Misch-/Entmischvorgänge.

In konkreten Fällen wird geraten, für eine Einschätzung der Relevanz in die Fachliteratur einzusteigen. Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Wechselseitige Beeinflussung von Effekten

## Literatur zu Kapitel 5.1

- **5.1-1** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik", Band 1, ISBN 3-00-005842-7, 2000, Seite 6.2-37.
- **5.1-2** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik", Band 2, ISBN 3-00-008429-0, 2001, Seite 3.2-22 und 4.5-15.
- **5.1-3** C.Karcher, "Arbeitsgruppe Angewandte Thermo- und Fluiddynamik", www.maschinenbau.tu-ilmenau.de, 4.10.2004, Seite 1-10.
- **5.1-4** E.J.Pohl, R.Bark, "Wege zur Schadenverhütung im Maschinenbau", Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin, 1964, Seite 86.
- 5.1-5 P.König, T. Miller, A. Roßmann, "Damage of High Temperature Components by Dust-Laden Air", AGARD-CP-558, Conference "Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines", April 1994, Seiten 25-1 bis 25-12.
- 5.1-6 V.R. Edwards, P.L. Rouse, "U.S. Army Rotorcraft Turboshaft Engines Sand & Dust Erosion Considerations", AGARD-CP-558, Proceedings der Konferenz "Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines", Propulsion and Energetics Panel Symposium, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 3, Seite 5.
- **5.1-7** R.A.LeyesII,W.A.Fleming "The History of North American Small Gas Turbine Aircraft Engines", AIAA, ISBN 1-56347-332-1, 199.Seite 551.
- 5.1-8 R.L. Johnson, R.C. Bill, "Fretting in Aircraft Turbine Engines", Conference Proceedings AGARD-CP-161 "Specialists Meeting on Fretting in Aircraft Systems", Seite 5-1 bis 5-4.
- **5.1-9** S.R. Lamb, G. Clark, "Engine Accessory Angle Drive Gear Failure", "Handbook of Case Histories in Failure Analysis", Kapitel: Transportation Components 17, ASM international.
- **5.1-10** R.L.Jonson, R.C. Bill, U.S.Army, "Fretting in Aircraft Turbine Engines", AGARD-CP-161, Oct. 1974, Seite 5-1 bis 5-13.

## 5.2 Verhalten bei Bruch und hoher Belastungsgeschwindigkeit

## 5.2.1 Gewaltbrüche



Unter Gewaltbruch wird im Folgenden ein instabiler Rissfortschritt (Bild 5.2.1-1) bis zum Bruch verstanden. Ausgelöst wird ein solcher instabiler Rissfortschritt wenn die Belastung die (Rest-) Festigkeit überschreitet. An Bauteilen mit rissartigen Trennungen wird der instabile Rissfortschritt nach Überschreiten der kritischen Risslänge "a"" (Bild 4.3-7 und Bild 5.2.1-4) bzw. der Bruchzähigkeit eingeleitet (Bild 5.2.1-7). Ein Überschreiten der zum Belastungszeitpunkt herrschenden Festigkeit ist auf sehr unterschiedliche Art möglich (Bild 5.2.1-3):

- zu hohe **äußere Beanspruchung** bei spezifikationsgerechter Festigkeit infolge von Überdrehzahlen, Containment oder Vogelschlag.

- zu niedrige **Festigkeit** aber auslegungsgemäße Belastung, z.B. wegen zu hoher Betriebstemperatur oder einer Schädigung (Diffusion, Härteabfall, Versprödung), Rissbildung und Kerben (Schwingermüdung, Kriechriss, Korrosionsriss, Heißriss, FOD).

**Restbrüche** (Restgewaltbrüche) entstehen durch instabilen Rissfortschritt nach einer stabilen Rissfortschrittsphase, welche die kritische Risslänge erreicht hat. Bei stabilem Rissfortschritt unter statischer Last (z.B. Kriechbrüche) oder zyklischem Rissfortschritt unter Schwingbeanspruchung ist lediglich der Restbruch als Gewaltbruch einzuordnen. Damit sind Restbrüche wohl die häufigste Form von Gewaltbrüchen an Triebwerksbauteilen.

Für den Praktiker stellt sich nach diesen Erklärungen die Frage: **Wie kann mir die Bruchmechanik bei meinen Aufgaben helfen?** Auf die Bruchmechanik kann heute in vielen Fällen nicht mehr verzichtet werden, hierzu gehören die folgenden Gebiete (Bild 5.2.1-12):

- Risikoabschätzung/Produktbetreuung
- Qualitätssicherung/Fertigung
- Auslegung/Konstruktion
- Schadensanalyse

Ein Riss wird instabil, d.h. es entsteht ein Gewaltbruch, wenn bei Rissfortschritt mehr elastisch gespeicherte Energie frei wird als zum Risswachstum notwendig ist.



Bild 5.2.1-1: Das Bauteil speichert wie eine gedehnte Feder mit elastischer Aufweitung potenzielle Energie. Dem Risswachstum setzt der Werkstoff einen Widerstand entgegen. Das zeigt sich als Energieverbrauch. Wächst der Riss ("1", Rissfortschritt), wird gespeicherte elastische Energie frei ("3"). Beim sog. stabilen Rissfortschritt wird weniger Energie frei als Energie für das Risswachstum benötigt wird und muss von außen zugeführt werden. Erreicht der Riss eine bestimmte Länge, die sog. kritische Risslänge, setzt der Rissfortschritt durch Auffedern mehr gespeicherte potenzielle Energie im Bauteil frei ("4"), als zum Risswachstum notwendig ist (Bild 5.2.1-6). Damit beschleunigt sich das Risswachstum ("2"). Man spricht von einem instabilen Risswachstum, dem sog. Gewaltbruch. Dieser muss nicht immer das katastrophale Versagen bzw. den Bruch des Bauteils bedeuten (Bild 5.2.1-2 und Bild 5.2.1-12).

**Bild 5.2.1-2:** Nicht immer führt ein **Gewaltbruch** zum Bersten des Bauteils. Es gibt auch Fälle, in denen der **Rissfortschritt sich wieder stabilisiert**.

Das kann der Mechanismus eines Gewaltbruchs in einem geschlossenen System verdeutlichen. Dabei sollen keine äußeren Kräfte einwirken.

Das gilt für dehnungsbehinderte Anordnungen (dehnungsgesteuert). Ein solcher Zustand entspricht einem Bauteil unter **Eigenspannungen** oder **Wärmespannungen**.

Als Beispiel kann auch eine dehnungsgesteuert belastete Probe in einer Zugprüfmaschine (Skizze rechts) dienen.

Zur Verdeutlichung wurde das Modell eines mit mehreren Saiten gespannten Bogens gewählt. Wird eine Saite durchtrennt, kommt es zum Auffedern der tragenden bzw. belastenden Struktur. Das entspricht einem Rissfortschritt im (homogenen) zugbelasteten Querschnitt eines Bauteils bzw. der Probe in der Prüfmaschine. Der Restquerschnitt bzw. die verbliebenen Saiten müssen die beim Auffedern frei werdenden Beschleunigungskräfte und die zusätzliche



**Belastung** aufnehmen. Sind sie dazu nicht in der Lage, reißt eine Saite nach der anderen. Das entspricht einem Rissfortschritt. Solange diese Belastung ausreichend **ansteigt**, kommt es zum **beschleunigten Rissfortschritt** (instabiler Rissfortschritt, Bild 4.3-1 und Bild 5.2.1-1). Das ist z.B. beim Bruch einer Radialstrebe in einem Gehäuse denkbar.

Wegen der vorgegebenen begrenzten Dehnung bzw. steigender elastischer Nachgiebigkeit, kann die Spannung beim Rissfortschritt aber auch deutlich abnehmen. Der Rissfortschritt wird dann langsamer, d.h.wieder stabil. Dann ist ein vorübergehender Stillstand des Risses durchaus möglich. Ein typisches Beispiel ist ein Anriss durch Wärmespannungen im Blatt eines Ventiltellers (Bild 4.3-11 u. Bild 5.4.2-1). **Bild 5.2.1-3:** Überschreitet die Belastung die Bruchfestigkeit in einem Querschnitt, kommt es zum **Gewaltbruch**. Bei nicht vorher angerissenen Querschnitten heißt dies, dass die Nennspannung über der Werkstofffestigkeit lag. Ist ein Riss vorhanden, lässt sich die Überlastungsbedingung besser durch bruchmechanische Größen beschreiben. Hier ist es entscheidend, dass an der Spitze eines Risses mit einer kritischen Länge a<sub>c</sub> die **Spannungsintensität die Risszähigkeit des Werkstoffs übersteigt** (Bild 4.3-4).

Gewaltbrüche infolge zu hoher Belastung: Es handelt sich um Folgeschäden einer nicht auslegungsgemäßen Belastung (linke Spalte). Hierzu gehören Überdrehzahlen, Explosionen, Containmentvorgänge und Fremdkörpereinwirkung. Zu berücksichtigen ist, dass das Werkstoffverhalten durch die Belastung selbst beeinflusst wird. Ein Beispiel ist die Versprödung (Skizze links unten) unter hoher Verformungsgeschwindigkeit im Containmentfall (Bild 5.2.2-8). Bei Abschätzungen bruch-



erzeugender Belastungen ist auch daran zu denken, dass die genutzten Daten das Werkstoffverhalten unter Betriebstemperaturen ausreichend berücksichtigen müssen. Dabei ist durchaus nicht immer mit einer Zunahme der Zähigkeit mit steigender Temperatur zu rechnen. Bei sehr hohen Temperaturen können sich z.B. Ni-Legierungen spröd verhalten (Bild 5.3-1). Auch der Gefügezustand ist von Bedeutung. Ein Einkristall kann auf Schlagbeanspruchung deutlich anders reagieren als ein gerichtet erstarrtes oder ein normal erstarrtes Gefüge. Gewaltbrüche infolge verminderter Festigkeit: Die rechte Spalte zeigt die Möglichkeiten



eines gefährlichen Festigkeitsabfalls. Es kann sich z.B. um Folgeschäden durch nicht auslegungsgemäße Betriebsparameter (z.B. bei einer Überhitzung) handeln. In den meisten Fällen wird jedoch ein Rest-Gewaltbruch vorliegen, der von einem vorhandenen Riss mit kritischer Länge ausgeht (Bild 5.2.1-4). Ähnliche Bedingungen liegen bei rissähnlich wirkenden Werkstofffehlern vor. Beschädigungen in Form scharfer Kerben, etwa nach einem FOD können die Spannungsintensität so weit heraufsetzen (Bild 4.4-4), dass instabiles Risswachstum ausgelöst wird. Erwähnt seien noch Eigenschaftsänderungen der Werkstoffe wie Versprödungen als Folge von Gefügeveränderungen (Bildung spröder Phasen), Korrosionseinfluss (Spannungsrisskorrosion, Kapitel 5.6.3) und Gasaufnahme wie bei Wasserstoffversprödung (*Kapitel* 5.7).

**Bild 5.2.1-4:** Ein **Rest**(-Gewalt)**bruch** erfolgt nach einem stabilen Rissfortschritt (Bild 4.3-1 und Bild 4.3-3).

Ein stabiler Rissfortschritt zeichnet sich dadurch aus, dass er von außen Energie zum Fortschritt benötigt. Durch Absenken der Beanspruchung kann ein solcher Riss verlangsamt und zum Stillstand gebracht werden. Stabiler Rissfortschritt liegt bei typischen Rissbildungen wie Schwingrissen (LCF und HCF, Skizze links), Kriech- bzw. Zeitstandrissen und Korrosionsrissen vor.

Ein instabiler Rissfortschritt ist nicht kontrolliert zu stoppen und führt somit zum Bruch des Bauteils. In dünnen Querschnitten läuft der instabile Bruch mit makroplastischer Verformung unter Bildung von Scherflächen ab (Skizze Mitte, Bild 5.2.1-5). Kann die äußere Beanspruchung schnell genug abgesenkt werden oder ist die Steifigkeit des Systems ausreichend hoch, kann auch ein solcher Riss noch abgefangen



werden. Diese Chance ist jedoch in der Praxis gewöhnlich nicht nutzbar. Ausreichend dicke Querschnitte führen zu einem makrospröden Rissfortschritt (Skizze rechts). Im REM lassen sich jedoch trotzdem mikrozähe Bruchmerkmale beobachten. In diesem Fall wurde die werkstoff- und belastungstypische kritische Risszähigkeit ( $K_{Ic}$ ) von der einwirkenden Spannungsintensität überschritten. Ist die im Bauteil elastisch gespeicherte Energie (z.B. unter Fliehkraft) so groß, dass ab einer kritischen Risslänge  $a_a$  die **beim Rissfortschritt frei**  werdende Energie ausreicht, den Riss vorwärts zu treiben, führt dies unweigerlich zum Bruch.

**Bild 5.2.1-5** (Lit 5.2.1-1): Der Bruchquerschnitt und die Werkstoffzähigkeit beeinflusst die sich einstellende Rissöffnungsart (Bild 4.3-2) und damit auch Art und Aussehen des Rest-Gewaltbruchs (Skizzen oben, Lit 5.2.1-4).

Scherbrüche (Zähbrüche) bzw. Brüche mit Scheranteilen entstehen unter keilförmiger Verformung (Skizze unten Mitte) wegen großer plastischer Zonen ("1" und "2"). Je dünner der Bruchquerschnitt (Skizze unten links "1" und "2") und/oder umso zäher der Werkstoff, desto größer ist der Scherflächenanteil (Zähbruch in Diagramm oben rechts). In den plastischen Zonen besteht ein ebener Spannungszustand (Bild 4.3-5). Brüche weisen entsprechend der Scheranteile eine höhere Risszähigkeit  $(,, K_1)$ , Bild 4.3-3 und Bild 4.3-4) auf, als die werkstofftypisch niedrigste Riss- oder Bruchzähigkeit (kritische Risszähigkeit, K<sub>rc</sub>), die sich für den reinen Trennbruch (Sprödbruch,  $,,3^{\circ}$ ) ergibt.

Makroskopisch spröde Trennbrüche ("3") bilden sich unter scharnierartiger Verformung (Skizze unten rechts). Im Oberflächenbereich bilden sich keine nennenswerten plastischen Verformungen. Voraussetzung ist ein ausreichend großer Bruchquerschnitt (Skizze unten links "3") und/oder spröder Werkstoff. Das heißt, es liegt über den gesamten Querschnitt an der Rissspitze ein ebener Dehnungszustand vor. Auch ein Trennbruch in zähem Material weist eine Mikrozähigkeit auf, die im REM festgestellt werden kann. Trennbrüche haben die niedrigste Risszähigkeit. Die entsprechende kritische Risszähigkeit, wird z.B. bei Rissöffnungsart I mit K<sub>1</sub>, bezeichnet. Wenn eine, das Risswachstum fördernde Korrosion einwirkt, spricht man von K<sub>ISCC</sub> wobei SCC für Stress Corrosion Cracking (Spannungsrisskorrosion, Kapitel 5.6.3.1) steht. Solche Einflüsse setzen die kritische Risszähigkeit weiter herab (Bild 5.2.1-7).

Aus dem **querschnittsabhängigen Bruch**verhalten können sich bei Schäden trotz spezifikationsgerechtem Werkstoff sehr unterschiedliche Bruchbilder ergeben. Auch Effekte wie eine Versprödungswirkung hoher Verformungsgeschwindigkeiten (Bild 5.2.1-7, Bild 5.2.2-2 und Bild 5.2.2-8), wie sie bei Schlagbeanspruchung zu erwarten sind, können sich bemerkbar machen.

Versucht man über eine bruchmechanische Abschätzung Rückschlüsse auf das Schadensgeschehen zu ziehen (z.B. kritische Risslänge, zum Restbruch führende Beanspruchung), so ist dabei die für den betrachteten Querschnitt und die Betriebseinflüsse repräsentative Risszähigkeit zu verwenden.



Bild 5.2.1-6 (Lit 5.2.1-3): Liegt örtlich starkes Fließen an der Rissspitze vor, sind die linear elastische Bruchmechanik (Bereich "O" bis "A") und damit die kritischen Grenzwerte der Risszähigkeit ( $K_{i_{n}}$ ) nicht mehr gültig (Bild 4.3-3). Als Messgröße dient die an gekerbten und mit einem Ermüdungsanriss versehenen Proben ermittelte Verschiebung der Rissufer (Bild 5.2.1-4, Detail im Diagramm). Der daraus bestimmte Kennwert ist die kritische COD. Das **COD-Konzept** (COD = crack opening displacement) soll auch für das elastisch-plastische Verhalten gelten. Es ist deshalb noch in Fällen wie dünnen Probenquerschnitten mit einem Versagen im Bereich "A" bis "B" anwendbar. Von "B" bis "C" gilt die "konservative" Vorgehensweise der Berechnung bzw. Auslegung. Es handelt sich um eine Instabilität infolge unzulässig großer plastischer Ver-<u>formungen.</u>

**Bild 5.2.1-7:** Die kritische Risszähigkeit (kritische Bruchzähigkeit  $K_{lc}$ ) wird von vielen Parametern beeinflusst. Diese können sowohl einzeln als auch in Kombination auftreten und sich damit gegenseitig verstärken. Dies ist bei Risikoabschätzungen besonders zu berücksichtigen, denn eine zu hoch angenommene Risszähigkeit ergibt zu große kritische Risslängen. Das kann zu lange "sichere Inspektionsintervalle" zur Folge haben.

**Temperatureinfluss:** Führen Temperaturen zu einer Versprödung des Werkstoffs (niedrige Temperaturen bei Stählen, Diagramm unten), hohe Temperaturen bei Ni-Basis-Legierungen (z.B. Duktilitätsminimum bei Temperaturen um 600 °C, Langzeitbildung spröder Phasen oder

Fortsetzung Seite 5.2.1-10



Fortsetzung von Seite 5.2.1-8

Erreichen der Solidustemperatur) ist davon auszugehen, dass dies eine Absenkung der Risszähigkeit bedeutet. Wirkt zusätzlich Korrosion, sind auch kleinere Temperaturerhöhungen im Umgebungsniveau in ihrer Auswirkung auf  $K_{ISCC}$  nicht zu vernachlässigen. Die Risszähigkeit von Stählen zeigt ähnlich wie die Kerbschlagzähigkeit mit steigenden Temperaturen einen Steilanstieg. Dieser tritt erst bei deutlich niedrigeren Temperaturen als für die Kerbschlagzähigkeit auf. D.h. die Risszähigkeit reagiert weniger temperatursensibel. Wenn über Niedertemperatur-Einsatzgrenzen entschieden wird, ist dieses Verhalten zu berücksichtigen.

Korrosionseinfluss: Wirkt Spannungsrisskorrosion auf den Riss, kann der "Threshold" für ein stabiles Risswachstum deutlich herabgesetzt sein (Diagramm oben rechts). Für die Festlegung zulässiger Fehlergrößen ist dies von großer Bedeutung. Wenn der Korrosionseinfluss im Betrieb bei der Datenermittlung nicht berücksichtigt wurde, können zulässige Fehler deutlich zu groß gewählt werden. Wird die kritische Risslänge "a" erreicht, erfolgt die Instabilität bei K<sub>1</sub>. Weil es Korrosionsvorgänge gibt, die auch durch eine Versprödung der Rissspitze (z.B. Wasserstoffaufnahme, Bild 5.7.1-4, Lit. 5.2.1-10) wirken, ist davon auszugehen, dass unter Korrosionseinfluss auch K<sub>1</sub> abfällt.

**Probendicke:** Bis zu einer bestimmten werkstoffabhängigen Querschnittsdicke (Diagramm Mitte links) fällt die kritische Risszähigkeit ab (Bild 5.2.1-5 und Bild 5.2.1-6). Mit der kritischen Risszähigkeit K<sub>1c</sub> sind Abschätzungen von zulässigen Risslängen und/oder Restlebensdauern für dünnere Querschnitte auf der "sicheren Seite". Umgekehrt ist es gefährlich, das Restbruchverhalten abzuschätzen, wenn lediglich Daten vorliegen, die an dünneren Querschnitten ermittelt wurden. Streckgrenze: Im Allgemeinen gilt, die kritische Risszähigkeit steigt nicht proportional mit der Streckgrenze eines Werkstoffs. Dies ist besonders bedeutsam, weil gerade hochfeste Werkstoffe auch hoch belastet werden und somit im Anrissfall eine hohe Spannungsintensität vorliegt. In diesem Fall kann schnell die relativ niedrige Risszähigkeit überstiegen und der Bruch ausgelöst werden. Für besonders feste Werkstoffvarianten ist die zulässige Fehlergröße und das erhöhte Risiko bei Beschädigungen (z.B. Kratzer) besonders kritisch zu prüfen. Betroffen ist die Lebensdauer bei stabilem Rissfortschritt bis zu der relativ kurzen kritischen Risslänge. Möglicherweise ist es sicherer, eine weniger feste Variante einzusetzen.

Belastungsgeschwindigkeit: Die Belastungsgeschwindigkeit bei Stoßvorgängen (FOD, Containmentfall, Lit. 5.2.1-8, Bild 3-15 und Bild 3-19, ) und Druckwellen (Staubexplosion, Kapitel 5.11.1, Lit. 5.2.1-8) ist sehr hoch. Dies kann sich in einem Absinken der kritischen Risszähigkeit bemerkbar machen (Skizze oben links). Auslegungen und Nachweise von Bauteilen für solche Beanspruchungen müssen besondere Empfindlichkeiten der Werkstoffe berücksichtigen.

Die Bruchmechanik ist ein wichtiges Werkzeug um Risiken abzuschätzen und Bauteilverhalten zu verstehen.



Bild 5.2.1-8: Das folgende Beispiel zeigt die Bruchmechanik als ein wichtiges Werkzeug, um im aktuellen Problemfall Risiken zu minimieren. Es geht um die Anwendung der Reibschweißung. Betroffen ist der Turbinenrotor eines Turboladers (Skizze links). Das Turbinenrad besteht aus einer Ni-Basis-Gusslegierung und ist mit dem Verdichter durch eine Reibschweißung der Welle aus Stahl verbunden. Dies war offenbar ohne axiale Heißrissbildung in der wärmebeeinflussten Turbinenradseite nicht möglich. Zur Klärung des Risikos eines Radbruchs durch die Lastzyklen (Drehzahl, Wärmespannungen) war eine Betriebserprobung zu aufwändig und langfristig. Klarheit lässt sich von einer bruchmechanischen Probe (CT-Probe, Skizze rechts) erwarten. Sie wird, falls möglich, einem repräsentativen Bauteil entnommen. So lässt sich der Gefüge- und Schwachstelleneinfluss berücksich-

tigen. Mit einer gezielten hohen örtlichen Erwärmung ohne sichtbare Anschmelzungen sollten sich bauteiltypische Warmrisse erzeugen lassen. Wegen der relativ geringen Duktilität des Materials genügt für die Ermittlung der kritischen Risszähigkeit  $K_{lc}$  eine geringe Wandstärke. Die Kerbe wird so eingebracht, dass der Kerbgrund in die Warmrisszone läuft. Mit den Prüfdaten ist die Abschätzung der kritischen Risslänge unter den bekannten, für den Riss relevanten maximalen Bauteilbeanspruchungen möglich. Mit Hilfe von Rissfortschrittsdaten aus geeigneten Betriebserfahrungen abgeschätzt, lässt sich für die Betriebserprobung oder für bereits verbaute Teile eine ausreichend sichere Restlebensdauer angeben. Voraussetzung ist ein überwachter Einsatz in sicheren Inspektionsintervallen.



**Bild 5.2.1-9:** Die Bruchfestigkeit spröder Werkstoffe hängt merklich vom belasteten Volumen (bei **Volumenfehlern**) und/oder von der belasteten Oberfläche (bei Oberflächenfehlern) ab (siehe hierzu Lit. 5.2.1-9). Insbesondere an neuen Materialien wie Keramiken und intermetallischen Phasen (bei niedriger Tempera-

tur), aber auch von wenig duktilen Gusswerkstoffen ist dieses Verhalten zu berücksichtigen. Grund ist, dass die Wahrscheinlichkeit eines wachstumsfähigen Fehlers oder eines Fehlers mit kritischer Größe (spontaner Bruch) mit dem Volumen bzw. der Oberfläche ansteigt. Diese Abhängigkeit wird von dem sog. **Weibull-**

Seite 5.2.1-12

modul (m), die Steigung der Geraden im Weibull-Wahrscheinlichkeitsdiagramm, beschrieben (siehe auch Lit. 5.2.1-10). Je größer "m", umso steiler die Gerade und entsprechend kleiner die Streuung der Festigkeiten. "m" für die Zugfestigkeit von Metalllegierungen des Maschinenbaus liegt etwa bei 30 (Diagramm unten links, Lit 5.2.1-9). Bei hochfesten Keramiken (Karbide, Nitride) liegt "m" um 10. Damit reduziert sich eine mit den üblichen kleinen Dreipunkt-Biegeproben (Bild 5.2.1-10) ermittelte Bruchfestigkeit (Skizze oben rechts) im Turbinenrad einer kleinen Gasturbine deutlich (Skizze oben rechts). Im Nabenbereich weist das Rad ein etwa 1000 fach größeres belastetes Volumen als die Proben auf. Das führt zu einer um etwa 60 % niedrigeren nutzbaren Festigkeit im Bauteil (Beispiel im Balkendiagramm unten rechts). Wenn dies in der Auslegung nicht berücksichtigt wurde, muss bereits bei niedriger Drehzahl mit einem spontanen Bruch gerechnet werden. Für einen zähen Werkstoff liegt, bei gleicher Probengeometrie zur Festigkeitsermittlung, der Abfall auf Grund des Volumeneinflusses lediglich bei etwa 20%.



Bild 5.2.1-10 (Lit 5.2.1-6, Lit 5.2.1-7): Spröde Werkstoffe wie Keramiken sind besonders kerbempfindlich und reagieren bereits auf sehr kleine Fehlstellen mit Rissbildung und Bruch. Dieses Verhalten führt zu einer merklichen Abhängigkeit der Festigkeit von der Fehlerwahrscheinlichkeit. Je größer das kritisch hoch belastete Volumen bzw. die Oberfläche (abhängig von der Fehlerlage), umso kleiner ist die nutzbare Festigkeit. Die Messwerte werden merklich von Größe und Spannungsverteilung in der Probe beeinflusst (Bild 4.3-11). Selbst bei gleicher Probengeometrie ergibt eine Dreipunktprüfung höhere Werte als eine Vierpunktprüfung. Die niedrigsten Werte lässt die Zugprobe erwarten. Bei dominierendem Oberflächeneinfluss wirken sich bereits kleine Unterschiede in Bearbeitung und Be-

Bei spröden Werkstoffen, insbesondere Keramiken hängt der Festigkeitswert in hohem Maß von der Probengröße ab. Bauteile mit relativ großem belasteten Volumen bzw. grdßer Oberfläche (z.B. Rotorscheiben) müssen deshalb für eine ausreichende Ausfallwahrscheinlichkeit entsprechend niedrig belastet werden!



handlung auf die Festigkeit aus. Aus diesem Grund gilt:

Festigkeitswerte spröder Werkstoffe müssen besonders kritisch auf die Relevanz der Probeneigenschaften für die Anwendung überprüft werden. Prospektangaben ohne genaue Angaben zur Prüfung sind für eine Auslegung ungeeignet. **Bild 5.2.1-11** (Lit 5.2.1-5): An spröden Werkstoffen treten bei Überlastung durch Schlagbeanspruchung teilweise unerwartete Effekte auf.

Erfolgt an der Stirnseite eines prismatischen Stabes (Skizze oben) eine Schlagbeanspruchung, läuft mit der materialspezifischen Schallgeschwindigkeit ein Impuls (hier beispielhaft ein Dreiecksimpuls) durch den Stab. Der Im-



puls wird an der gegenüberliegenden Seite des Stabes reflektiert. Die Reflexion des Impulses lässt aus der Druckspannung eine Zugspannung entstehen. Übersteigt die Zugspannung die Bruchfestigkeit des Stabs, platzt das Stabende an dieser Stelle durch einen Gewaltbruch ab. Dieser Effekt ist aus der Militärtechnik beim Beschuss von Panzerungen bekannt (Skizze unten). Er kann auch im **Containmentfall** auftreten, wenn hochenergetische Bruchstücke mit großer Geschwindigkeit auf ein Gehäuse mit empfindlichem Werkstoff treffen.



Bild 5.2.1-12: Die Bruchmechanik hat sich in vielen wichtigen Anwendungen bewährt. Ein besonderer Einsatz dient zum Abfangen von Rest-Gewaltbrüchen und der Vermeidung von Anrissen im Rahmen von Problemen des Serienbetriebs.

Mit Hilfe der Bruchmechanik wurde es erstmals möglich, auf analytisch nachvollziehbare Weise, Risse in ihrer Auswirkung auf die (Rest-) Bauteilfestigkeit befriedigend zu bewerten und **Restlebensdauern** abzuschätzen. Damit besteht die Möglichkeit, zusammen mit ausgewerteten Schadensfällen ausreichend sichere Inspektionsintervalle anzugeben. Die ausgenutzten hohen Festigkeiten der Werkstoffe im Triebwerksbau erfordern eine entsprechende **Einengung der** (Wirkungs-) **Größe** herstellungs- und betriebsbedingter Schwachstellen (Bild 3.2.1-1). Mit Hilfe bruchmechanischer Überlegungen lassen sich solche Grenzwerte für Spezifikationen angeben. Diese Grenzwerte definieren Forderungen an die zerstörungsfreie Prüfung oder verfahrensbezogene Absicherungen (z.B. mehrere Umschmelzprozesse).

Aus Bruchflächen (Abstand von Rissfortschrittslinien) und Kenntnissen des werkstoffspezifischen Rissfortschrittsverhaltens (Paris-

Diagramm, Bild 4.3-3) lässt sich die Beanspruchung über dem Rissfortschritt abschätzen. Die Rissfortschrittslinien (Bild 4.3-6.2) können zusätzlich Erkenntnisse über zeitliche Abläufe der dynamischen Belastung ermöglichen. Diese lassen Rückschlüsse auf schadensursächliche Betriebsbedingungen (z.B. Stall, Resonanzen) zu.

Bei Fertigungs- bzw. Herstellungsfehlern (z.B. Rissbildung, örtlicher Härteabfall, Porosität) besteht die **Möglichkeit, über eine Nacharbeit** in Art und Umfang zu entscheiden. Dies gilt auch für reparaturfähige Schäden im Rahmen der Überholung und die **Festlegung der reparierbaren Grenzen in einem Überhol**handbuch.

## Literatur zu Kapitel 5.2.1

- **5.2.1-1** 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.
- **5.2.1-2** E. Macherauch, O. Vöhringer, "Das Verhalten metallischer Werkstoffe unter mechanischer Beanspruchung", Zeitschrift "Werkstofftechnik", 9, 1978, Seite 370-391.
- **5.2.1-3** 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.
- **5.2.1-4** K.D. Sheffler, D.K. Gupta, "Current Status and Future Trends in Turbine Application of Thermal Barrier Coatings","Journal of Engineering for Gas Turbines and Power", October 1988, Vol.110, Seite 607.
- **5.2.1-5** W. Johnson, A.G. Mamalis, "Gegenüberstellung statischer und dynamischer Schadens- und Deformationserscheinungen", Bericht der VDI-Zeitschrift Reihe 5, Nr. 32, Seite 1-72.
- **5.2.1-6** A. Rossmann, "Schadenuntersuchung und Schadenverhütung an Bauteilen der Ingenieurkeramik", Buchreihe Kontakt & Studium, Expert Verlag, Band 308, H. Grosch, "Schadenskunde im Maschinenbau", ISBN 3-8169-1202-8, 1990, Seite 76-96.
- **5.2.1-7** D.R. Bush, "Designing Ceramic Components for Structural Applications", Zeitschrift "Journal of Materials Engineering and Performance", Volume 2 (6), December 1993, Seite 851-862.
- **5.2.1-8** A. Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, Band 2", Axel Rossmann Turboconsult, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 8.1, 8.2 und 9.4.
- **5.2.1-9** A. Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, Band 3", Axel Rossmann Turboconsult, 2001, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 14.2.
- **5.2.1-10** A. Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, Band 1", Axel Rossmann Turboconsult, 2001, ISBN 3-00-005842-7, Kapitel 4.5 und Kapitel 5.4.4
## 5.2.2 Werkstoffverhalten unter Hochgeschwindigkeitsbelastung



Nach einem Bruchstückaufschlag spröd gebrochener Berstschutz aus einem weichen/zähen Baustahl

Hochgeschwindigkeitsbelastungen/-verformungen findet man in der Technik in unterschiedlichen Situationen. Dazu gehören

- Explosionen.
- Aufschlag von Festkörpern (Bruchstücke, Geschosse), Flüssigkeiten und biologischen Körpern bzw. Fest-Flüssig-Gasförmig-Gemischen (z.B. Vogelschlag, Bild 5.2.2-12).
- Bruchvorgänge, schneller Rissfortschritt (z.B. Schockwellen, Bild 5.2.4-6).
- Rückfedern verspannter Systeme.
- **Fertigungsverfahren** (Sprengschweißen, Explosivumformung, Hydroforming, elektromagnetische Umformung, Stoßwellen in Wasser, Schmieden, Kompaktieren).
- Crashvorgängen (Unfälle von Transportfahrzeugen).
- Dabei kann die Reaktion des Bauteils/ Werkstoffs sehr unterschiedlich sein. Zu beobachten sind durchaus gegensätzliche Effekte. Sie sind bei einer Berechnung zu berücksichtigen.
- Anstieg der Festigkeit.
- Abfall der Festigkeit.
- Versprödungseffekte bzw. Anstieg der Fließgrenze.
- Bessere Verformbarkeit.
- Steifigkeits- und massenabhängige (trägheitsbedingte) Belastungszonen und deren Verformungsverhalten.

Die befriedigende Berechnung des Verhaltens realer, deutlich komplexer als übliche Proben geformter Bauteile unter einer Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung ist in vielen Fällen nicht möglich. Das gilt beispielsweise für den Aufschlag eines Bruchstücks. Seine Daten, Kontaktgeometrie und Verformungseigenschaften sind gewöhnlich unbekannt. Erschwert wird die rechnerische Erfassung zusätzlich, wenn die **Energieübertragung beim Stoß** komplex ist, wie im Falle eines Vogelschlags (Bild 5.2.2-12). Bei ausreichend Erfahrung sind jedoch Tendenzen erkennbar. Für sicherere Aussagen sind erfahrungsgemäß zumindest realistische, bauteilrelevante Versuche notwendig. Selbst einfache Geometrien, wie sie für Probenversuche verwendet werden, erfordern unter definierter Belastung gewöhnlich mehrere empirisch ermittelte **Werkstoffkennwerte** (Bild 5.2.2-1 und Bild 5.2.2-2, Lit. 5.2.2-1 und Lit. 5.2.2-2). Das **Versagensverhalten** hängt ab von:

- Physikalischen Daten wie Festigkeit, Steifigkeit, Wärmeleitfähigkeit.
- Werkstoffgefüge wie Karbide und Verstärkungsphasen sowie der thermischen Stabilität.
- Örtlichen Schwachstellen wie Inhomogenitäten, Mikrokerben, spröden Schichten..



**Bild 5.2.2-0** (Lit. 5.2.2-9): Das Werkstoffverhalten unter **Hochgeschwindigkeitsbelastung** ist besonders für die Auslegung von Bauteilen wichtig, die dem Schutz vor hochenergetischen Bruchstücken dienen:

Schutzvorrichtungen um Bearbeitungsmaschinen mit hochtourigen Werkzeugen und oder Werkstücken (Bild 3-15, Lit. 5.2.2-10).
Schwungscheiben: Beispielsweise dienen Kupplungsscheiben auf der Kurbelwelle von

Automotoren auch als Schwungscheibe. Hier besteht beispielsweise bei einem durchgehenden Dieselmotor (Ölleck bei Turboladerschaden) Berstgefahr.

- Großgetriebe: Z.B. in Kraftwerken zwischen Turbine und Generator bei Schmierungsausfall (Lit. 5.2.2-13).

Für Schwungscheiben gibt es mehrere Technologien die relativ kleine, leichter beherrschbare Bruchstücke ermöglichen:

Metall: Blechstapel, oder Wicklungen aus Drähten. Generell besteht auch bei Metallen die Gefahr, dass bei heftigen Anstreifvorgängen oder Bruchstückaufschlag Metallstaub entsteht, der mit Luft eine gefährliche Staubexplosion auslösen kann. Besonders gefährlich sind Werkstoffe wie Legierungen aus Magnesium, Aluminium und Titan.

Fasertechnik: Solche Bauteile werden mit einer Kunstharzmatrix gebunden und können in geeigneter Lagenbauweise oder als Wickelkörper ausgeführt werden. Beim Bersten entstehen große Mengen feiner Stäube aus Fasern (Kohlefasern, Aramid) und Kunstharz. Es sei deshalb darauf hingewiesen, dass im Falle eines Bruchs Staubexplosionsgefahr besteht (Bild 5.11.1-4). Ein Luftzutritt ist auf jeden Fall zu vermeiden, solange sich noch Staub in Schwebe befindet oder beim Einlassen von Luft aufgewirbelt wird.

**Keramik**: kleinere Rotoren aus hochfester Keramik (Bild 4.4-9) sind durchaus eine Alternative. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die nutzbare Festigkeit deutlich von Bauteiloberfläche- und -volumen abhängt (Bild 5.2.1-9 und Bild 5.2.1-10).

Bild 5.2.2-1: Die obere Darstellung zeigt (Lit 3.3.1-1) die für ein Containment notwendige Gehäusewandstärke nach der angegebenen Formel (durchgezogene Kurve) und den Streubereich von tatsächlichen Betriebserfahrungen (graue Zone). Die kennzeichnende Durchdringungsarbeit ist stark vom Auftreffwinkel abhängig. Ein steiler Auftreffwinkel bedingt eine große Durchdringungsarbeit bzw. Durchschlagsfähigkeit des Bruchstücks. Eine hohe Bruchdehnung verbessert den Durchschlagswiderstand einer Gehäusewand offenbar deutlich mehr als die Erhöhung der Festigkeit. Nach dieser Formel müssten mehrere dünne Gehäusewände einen geringeren Durchschlagswiderstand aufweisen als eine massive Wand der Gesamtdicke.

Eine gegensätzliche Tendenz kann jedoch beobachtet werden (Lit 5.2.2-8), wenn es gelingt, die Energie des Bruchstücks auf die einzelnen Wände gut zu verteilen und deren Verformungsfähigkeit zu nutzen. In der Ballistik kennt man Laminate aus vielen Blechschichten und Kombinationen mit Kunststoff- und Keramiklagen, die eine besonders hohe Durchschlagsfestigkeit bei niedrigem Gewicht aufweisen (z.B. bei Panzerungen für den Personenschutz). *Die unten angegebenen Formeln (Lit 5.2.2-7)* werden von großen OEMs zur Abschätzung der Containmentwandstärke "t" verwendet. Interessant ist, dass sich die Formeln bis auf den Einfluss der translatorischen Kinetischen Energie "KE" deutlich unterscheiden. Die Angleichung liegt wohl in den Konstanten " $K_1$ " und " $K_{\gamma}$ ", welche das Know How des jeweiligen Anwenders beinhalten. Anscheinend berücksichtigen diese Konstanten den Einfluss des Auftreffwinkels.

Interessant ist, dass offensichtlich die Formeln die Eigenschaften des Bruchstücks, wie Festigkeit, Verformbarkeit und Geometrie (z.B. Steifigkeit, Schärfe) nicht berücksichtigen. So ist im Extremfall bei Fan-Rotorschaufeln aus faserverstärktem Kunststoff bei gleicher kinetischer Energie mit einer deutlich niedrigeren Durchdringungsfähigkeit als bei Schaufeln aus



den üblichen hochfesten Werkstoffen (Titanlegierungen) zu rechnen. Dies zeigt, dass es sich hier eher um Abschätzungen handelt, deren Richtigkeit durch betriebsnahe Versuche nachzuweisen ist.



**Bild 5.2.2-2** (Lit. 5.2.2-9): Besonders Aluminium- und Magnesiumlegirungen werden im Maschinenbau als Gehäuse, beispielsweise von Aggregaten in Verkehrsmitteln, verwen-

det. Ein Beispiel ist die Verdichterseite von Turboladern oder im Bereich von Kupplungen/ Schwungscheiben. Da sind die relevanten Werkstoffeigenschaften wichtig. Eine befriedi-

gend genaue, theoretisch basierte Auslegung des Containments ist in der Konstruktionsphase erfahrungsgemäß mit zuviel Unsicherheiten behaftet. Z.B. spielen Größe, Aufschlagwinkel und Geometrie der Bruchstücke in der Kontaktzone sowie die Nachgiebigkeit des Containments eine Rolle. Deshalb beruhen produktspezifische Auslegungskriterien und Verbesserungen gewöhnlich auf Vergleichsversuchen. Dabei dient als Referenz eine Konstruktion die sich bereits bewährt hat. Für die Analyse der Ergebnisse und der Erstellung halbempirischer Auslegungskriterien sind die Werkstoffdaten aber durchaus nützlich. Insbesondere wenn es um eine Werkstoffauswahl, beispielsweise für eine Gewichtsreduzierung, geht.

In den Diagrammen dient die **Bruchdehnung** als Kriterium. Je kleiner umso weniger zäh, d.h. spröder der Werkstoff.

Man erkennt, dass die angegebene hochfeste Aluminiumlegierung unter Stauchbeanspruchung ("A") bereits eine recht hohe Zähigkeit aufweist und bei hohen Aufschlaggeschwindigkeiten sogar noch deulich zäher reagiert. Unter diesem Aspekt, zumindest mit Stauchen als relevanter Belastung, ist der Werkstoff für ein Containment gut geeignet. Es sind jedoch noch weitere Eigenschaften wie Festigkeit, Härte oder Gefüge (Knetlegierung oder Guss) zu berücksichtigen.

Die Magnesiumlegierung hat ab einer Prüftemperatur von 200°C bei niedriger Stauchbelastung ("B") eine deutlich höhere Zähigkeit als bei Raumtemperatur. Bei hoher Stauchgeschwindigkeit nimmt die Zähigkeit bei allen untersuchten Temperaturen, ähnlich der Al-Legierung, exponentiell zu. Bei Zugbeanspruchung ("C") fällt die Zähigkeit ab und nimmt erst bei hoher Belastungsgeschwindigkeit deutlich zu.

Titanlegierungen kommen für Containments in erster Linie in der Luft- und Raumfahrt zur Anwendung. Die Zähigkeit der hochfesten **Titanlegierung** nimmt bei hoher Stauchgeschwindigkeit ("**D**") abrupt ab, d.h. der Werkstoff reagiert spröder. Dieses Verhalten zeigt sich auch im Zugversuch ("E"), wobei bis zu diesem Steilabfall die Dehnung im durchaus akzeptablen Bereich kontinuierlich abnimmt.

**Bild 5.2.2-3** (Lit. 5.2.2-9 und Lit. 5.2.2-11): Das Bild bezieht sich insbesondere auf das Verhalten bei stoßartiger Belastung mit Zug, Druck und Schub.

Bei **Zugbelastung** ("A") reagieren Einschnürung und Trennbruchgröße eines glatten Stabs deutlich. Niedrige Belastungsgeschwindigkeit lässt eine relativ große Einschnürung und einen kleinen Trennbruch (wenig Makrozähigkeit) entstehen. Umgekehrt die hohe Belastungsgeschwindigkeit.

Ist der Stab gekerbt ("B"), ist besonders der plastisch verformte Bereich um die Kerbe beeinflusst. Sie ist bei niedriger Belastung signifikant größer. Dies zeigt, dass bei einem solchen Werkstoffverhalten (Bild 5.2.2-2) Kerben in Containments vermieden werden sollten.

Beim **Druckversuch** (,,**C**<sup>"</sup>) beobachtet man als Folge der verformungsbehindernden Reibkräfte an den Auflageflächen sog. Druckkegel unter ca. 45°. In ihrer Begrenzung wirkt eine hohe Scherbeanspruchung. Während der Stoßbelastung kann bei der Verformung entstehende Wärme aus der schmalen Zone (Scherbänder) nicht schnell genug abfließen. Es kann zu hohen Temperaturen bis zu Anschmelzungen im Gefüge kommen. Das gilt besonders ausgeprägt für Titanlegierungen wegen deren um ein Mehrfaches niedrigeren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Al- und Mg-Legierungen (Bild 5.10.1-5). Wegen des starken Abfalls der Festigkeit in diesem Bereich tritt hier abruptes Versagen ein. Solche Merkmale lassen umgekehrt im Schadensfall auf diese Beanspruchung schließen.

In einem Scherversuch ("D") wirkt im Versagensbereich in erster Linie Schubbeanspruchung. Bei hoher Belastungsgeschwindigkeit wird die Scherzone schmäler (Detailskizzen) und scharf abgegrenzt.





Bild 5.2.2-4: Das obere Diagramm zeigt typische Festigkeitsbereiche einiger Werkstoffe. Interessant ist, dass offenbar der Elastizitätsmodul beim Durchschlagsverhalten nur von untergeordneter Bedeutung ist, da er in den Abschätzungsformeln für die Gehäusewandstärken (Bild 5.2.2-1) nicht erscheint. Es ist jedoch anzunehmen, dass der Einfluss der Elastizität bzw. Steifigkeit bei fasertechnischen Bandagen und Schichtaufbauten nicht vernachlässigt werden kann. Insbesondere wenn es gilt die Aufweitung der Bandage beim Bruchstückeinschlag zu minimieren. Das Diagramm unten links (Lit. 5.2.2-2) lässt die erforderliche Dicke eines Aramidrings für eine bestimmte Bruchstückenergie abschätzen (siehe Formel in Bild 5.2.2-1). Das Diagramm unten rechts zeigt anhand des Flächengewichts den Vorteil eines Keramik/Kunstfaser-Laminats gegenüber Gewebe aus reiner Aramidfaser (vergleiche Bild 5.2.2-5).



Bild 5.2.2-5: Keramische Platten (z.B. aus Bornitrid oder Aluminiumoxid) auch in Kombination mit Fasergeweben (Lit. 5.2.2-3 und 5.2.2-4) können die kinetische Energie eines Bruchstücks auf gänzlich andere Weise aufnehmen als reine Faserlagen. Faserwerkstoffe "vernichten" die Energie, indem die Fasern bei der Dehnung aneinander reiben und/oder bis zum Bruch gedehnt werden. Für ausreichende Energieaufnahme ist also eine relativ große Verformung notwendig (Detail oben rechts).

Ganz anders keramische (spröde) Werkstoffe. Diese nehmen Energie durch Zersplittern am Einschlagsort auf. Selbst wenn die Keramikkacheln, wie in der oberen Skizze dargestellt, mit Silikongummi auf einen dünnwandigen Träger aus Aluminiumblech aufgeklebt und mit Zwischenstegen getrennt sind, wird bei einem Aufschlag auf den Steg noch ausreichend **Energie durch Zersplittern gebunden**. Die Abstützung der Platten wird im Einschlagsbereich relativ wenig verformt. Ein solches **Containment benötigt wenig Raum** für eine Auslenkung und bietet sich deshalb für die Anwendung im Rumpf von Kampfflugzeugen an. Ein weiterer Vorteil sind relativ **kleine Beschleunigungen** auf benachbarte Anbaugeräte.



Bild 5.2.2-6 (Lit 5.2.2-6): Die Form der Aufschlagfläche des Bruchstücks spielt eine merkliche Rolle für die Durchschlagfähigkeit (vergleiche Bild 5.2.2-7). Bruchstücke mit gleicher Masse und unterschiedlicher Kontur können sehr verschiedene Mindestdurchschlagsgeschwindigkeiten aufweisen (Skizze oben rechts), die sich um ein Mehrfaches unterscheiden. Dabei spielt auch das Zähigkeitsverhalten des Gehäuses eine Rolle, die wiederum von der Auftreffgeschwindigkeit beeinflusst ist (Skizze links). Es handelt sich also um einen komplexen Vorgang, der analytischen Ansätzen schwer zugänglich ist. Weil bei einem Rotorbruchstück kaum die Form der auftreffenden Fläche vor-

hergesagt werden kann, sollte in der Auslegung oder Abschätzung des Durchschlagswiderstands von Gehäusen immer vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden. Bei versuchstechnischen Nachweisen im Volltriebwerk oder in Baugruppen sollte deshalb die begrenzte Aussagefähigkeit zum Containmentverhalten bewusst bleiben. Diese eingeschränkte Nachweissicherheit dürfte auch dazu beitragen, dass immer wieder Bruchstücke aus Triebwerken austreten, von denen man dies eigentlich auf Grund der Nachweise bei der Zulassung nicht erwartet hätte.



**Bild 5.2.2-6:** Hier soll ein Eindruck für das unterschiedliche **Verhalten verschiedener Stähle bei einem Bruchstückaufschlag** vermittelt werden. Es handelt sich um das Bruchstück eines Rotors in einem Rohrcontainment (Gehäuse).

Die linke Skizze zeigt den Fall einer Gehäusewand aus **Panzerstahl** wie er als ballistischer Schutz militärisch zur Anwendung kommt. Die hohe Härte und wahrscheinlich auch Kaltverfestigung verhindert ein Eindringen und plastische Deformation. Es kommt lediglich zur elastischen Ausfederung. Weil das Bruchstück dabei lediglich durch Reibung und eigene Deformation an kinetischer Energie verliert, kann es sogar minutenlang reflektiert werden. In einem solchen Fall (z.B. im Schleuderstand) besteht die Gefahr eines irrtümlichen, vorzeitigen Öffnens und Bruchstückaustritt. Die Drehbelastung auf das Gehäuse dürfte vergleichsweise beherrschbar sein. Das Gehäuse kann aber während des Abbremsvorgangs heftigen Vibrationen ausgesetzt sein (LCF-Festigkeit?).

In der mittleren Skizze besteht das Gehäuse aus einem hochlegierten austenitischen Stahl vom *Typ CrNi18/10. Dieser Werkstoff ist sehr weich.* Er hat eine niedrige Fließgrenze und verhält sich äußerst zäh. Der Einfluss der Hochgeschwindigkeitsbelastung auf die Zähigkeit ist moderat, die Festigkeit nimmt deutlich zu (Bild 5.2.2-8). Hier gräbt sich das Bruchstück tief ein und beult die Wand extrem aus. Dabei wird das Bruchstück gewöhnlich beim ersten Aufschlag gestoppt. Der plötzliche Energieübergang auf das Gehäuse lässt ein hohes, schockartiges Drehmoment erwarten. Dem hat die Konstruktion mit einer ausreichenden Befestigung Rechnung zu tragen. Dabei ist zu prüfen, ob diese nicht vorzugsweise nachgiebig und federnd anstatt starr auszuführen ist.

Im Fall rechts besteht das Gehäuse aus einem (unlegierten) **Baustahl** (Typ ST37). Dieser Werkstoff versprödet unter der Schockbeanspruchung extrem (Bild 5.2.2-8). Die dicke Wand bricht spröd. Dabei wird nur wenig Energie aufgenommen. Das Bruchstück tritt aus.



Bild 5.2.2-8 (Lit 5.2.2-6 und Lit.5.2.2-7): Im Containmentfall sind sowohl auftreffende Bruchstücke, Gehäuse und von Folgeschäden beeinflusste Bauteile hohen Verformungsgeschwindigkeiten unterworfen. Um Schadensabläufe mit hohen Belastungsgeschwindigkeiten, zu denen Containmentvorgänge zählen, richtig zu beurteilen, ist es wichtig, das Werkstoffverhalten zu kennen.

Die Skizze oben rechts zeigt ein ca. 20 mm starkes Rohr aus einem niedrig legierten Baustahl, der sich bei einem normalen Zerreißversuch ausgeprägt duktil verhält. In diesem Rohr wurde ein integrales Turbinenrad eines kleinen Hubschraubertriebwerks in einem Schleuderstand bei ca. 50 000 U/min zum Bersten gebracht. Der Baustahl verhielt sich dabei äußerst spröd. Es brachen mehrere größere Wandstücke ohne nennenswerte Verformung aus. Die aufgenommene Bruchstückenergie war dabei offenbar gering. Ein solcher Werkstoff eignet sich also nicht gut für einen Containmentring. Im Allgemeinen ist eine Schmiedeversion einer Gussversion des gleichen Werkstoffes in der Zähigkeit überlegen. Schweißungen an Containmentringen haben sich als besonders problematisch herausgestellt, da sie selbst Kerben darstellen (Formkerbe- z.B. Einbrandkerbe, Steifigkeitskerbe z.B. bei starker Nahtüberhöhung und Gefügekerbe) und weil das Gussgefüge der Schweißnaht eher zu einem Sprödbruch neigt.

Das Diagramm oben links zeigt das beschriebene Verhalten. Man erkennt, dass mit steigender Verformungsgeschwindigkeit die Streckgrenze stärker ansteigt als die Zugfestigkeit und diese im Versprödungsbereich erreicht. Wenn die Streckgrenze gleich der Zugfestigkeit ist, erfolgt der spontane Bruch, ohne dass es zu nennenswerter plastischer Verformung kam, das Teil bricht spröd. Offenbar erfolgt nicht eine gleichmäßige Abnahme der Bruchdehnung, sondern ein plötzlicher Steilabfall bei einer bestimmten Dehnungsgeschwindigkeit. Dieses ausgeprägte Versprödungsverhalten zeigen viele Werkstoffe, zumindest bei den für den Containmentfall interessanten Verformungsgeschwindigkeiten nicht (Diagramme unten), obwohl ein Festigkeitsanstieg durchaus zu beobachten ist (mittleres Diagramm). Diese Werkstoffe sind deshalb für Containmentringe geeigneter. Hierzu gehören Superlegierungen und austenitische Stähle bei denen der Effekt sogar ausgeprägter als bei der hochfesten Titanlegierung TiAl6V4 ist. 13% Cr-Stahl zeigt zwar noch keinen Steilabfall, seine Bruchdehnung ist jedoch vergleichsweise gering.

Bei Kunstharzen und faserverstärkten Kunststoffen kann die Versprödung der Matrix bei Hochgeschwindigkeitsbeanspruchung besonders ausgeprägt sein. So verhält sich Polyimid bei niedriger Verformungsgeschwindigkeit, z.B. einem Zugversuch, äußerst zäh und nimmt viel Energie auf. Bei Vogelschlag mit hoher Aufprallgeschwindigkeit, wie bei einem Kampfflugzeug zu erwarten, ist jedoch dieses Verhalten nicht nutzbar. Man beobachtet ein "glassprödes" Verhalten. Das schränkt die Anwendung für schlagbeanspruchte Teile deutlich ein.

Bild 5.2.2-9 (Lit 5.2.2-6): Mit der Wandstärke steigt die Mindest-Durchdringungsgeschwindigkeit in erster Näherung linear an. Die Steigung dieser Geraden kann jedoch werkstoffabhängig durchaus unterschiedlich sein (Diagramm oben links). In erster Näherung steigt die Mindest-Durchdringungsgeschwindigkeit mit der Zugfestigkeit des Gehäusewerkstoffs. Interessant ist, dass dies für manche Superlegierungen bei höheren Temperaturen offenbar nicht gilt (Diagramm rechts). Dieses Verhalten dürfte im Zusammenhang mit einer Festigkeitssteigerung im fraglichen Temperaturbereich und/oder einem Duktilitätsanstieg zu sehen sein.

Bei oberflächlicher Betrachtung könnte der Eindruck entstehen, dass eine allseitig eingespannte, gut "abgestützte" Gehäusewand einem auftreffenden Bruchstück mehr Widerstand entgegensetzt als eine flexibel aufgehängte

Dass die Wandstärke einen großen Einfluß hat ist selbstverständlich, weniger Beachtung finden die Temperatur des Containments und die Einspannungsverhältnisse.



#### Wand. Dem ist bei hohen Aufschlaggeschwindigkeiten nicht so.

Das Schaubild unten zeigt die Mindest-Durchschlagsgeschwindigkeit verschiedener Werkstoffe bei unterschiedlicher Einspannung. Diese Einspannungsbedingungen variieren die Nachgiebigkeit der Probe. Je weniger die Probe nachgeben kann (weiße Balken), umso kleiner ist die Durchschlagsgeschwindigkeit. Den höchsten Durchschlagswiderstand bzw. die höchste Mindest-Durchschlagsgeschwindigkeit hat die einseitig eingespannte Probe (schwarzer Balkenanteil).



5.2.2-10 (Lit 5.2.2-1): Am Beispiel des einseitig eingespannten Biegestabs (obere Skizze, Bild 5.2.2-11) lässt sich der plastische Verformungsverlauf einer Schaufel aus duktilem, homogenen metallischen Werkstoff bei Vogelschlag schematisch erklären. Selbstverständlich weichen die Blattprofile eines Verdichters häufig weit von diesen idealisierten Verhältnissen ab. Zur Deutung der Schadensmechanismen und des Bauteilverhaltens können die Überlegungen jedoch neben dem Stoßverhalten der Vogelmasse (Bild 5.2.4-7 und Bild 5.2.2-11) durchaus nützlich und hilfreich sein.

Für einen einseitig fest eingespannten Biegestab von gleichmäßigem, prismatischem Querschnitt ist das entsprechende Moment durch eine seitlich wirkende Kraft "F" im Abstand "l" von der Einspannung  $M_E = F.l = \sigma_F \cdot h \cdot b^2 / 6$  (h=Höhe, b= Breite des Rechteckprofils), wenn die Außenfaser mit einer Spannung an der Fließgrenze  $\sigma_F$  belastet ist, und der Querschnitt eine elastisch-lineare Spannungsverteilung aufweist. Wird die Spannung so weit erhöht, bis der gesamte Profilquerschnitt zu fließen beginnt (d.h. oberhalb der Fließgrenze belastet ist), so ist das entsprechende Moment größer. Im Extremfall ist kein elastischer Kern mehr vorhanden, und das Moment beträgt  $M_p$ =  $F \cdot l = \sigma_F \cdot h \cdot b^2/4$ .

In diesem Falle des vollplastischen Querschnitts spricht man von einem sog. "Fließgelenk" (plastischer Kollaps). Am Fließgelenk bzw. im Querschnitt, den das Fließgelenk bereits durchlaufen hat, ist also der Verformungswiderstand höher als im elastisch verformten Bereich. Das **Fließgelenk** wird also in diesen hineinlaufen.

In etwa der halben Zeit der dynamischen Reaktion auf den Vogeleinschlag erfolgt anfangs eine extreme Auslenkung mit hohen Dehnungs-

geschwindigkeiten. Die dadurch angeregte Schwingung klingt dann schnell ab (mittlere Skizze). Die hohe Dehnungsgeschwindigkeit kann das Bauteilverhalten werkstoffspezifisch stark beeinflussen.

Je höher die Dehngeschwindigkeit, umso mehr nähert sich die Fließgrenze der Bruchfestigkeit (Diagramm unten rechts). Bei hochfesten Titanlegierungen steigt beispielsweise die Fließgrenze bei Dehnraten 100-1000 1/s um 40% (Lit. 5.2.2-9). Sie nährt sich entsprechend der Bruchfestigkeit. Dieses Verhalten zeigt sich in einer Versprödung, d.h. der Werkstoff bricht bei Überlastung spröd, obwohl er im normalen Zugversuch ein deutliches plastisches Verhalten aufweist. Damit kann es beim Aufschlag eines Fremdkörpers mit relativ niedriger Energie aber hoher Geschwindigkeit zum Bruch erstaunlich dicker Wandquerschnitte kommen. Titanlegierungen, Nickellegierungen und hochlegierte Stähle, wie sie in Verdichterbeschaufelungen zur Anwendung kommen, zeigen diesen Effekt nicht so ausgeprägt wie unlegierte oder niedrig legierte Stähle. Trotzdem können bei Vogelschlag Schadensbilder entstehen, die sich durch eine "Hochgeschwindigkeitsversprödung" plausibel erklären lassen.

**Bild 5.2.2-11** (Lit 5.2.2-14): Dieses Bild zeigt eine Sichtweise auf die Vorgänge in der Gesamtschaufel die sich aus deren Massenträgheit ergibt.

Als Modell dient ein einseitig eingespannter Stab dessen Spitze durch eine ausreichend hohe Verzögerungskraft (einer Masse die mit hoher Geschwindigkeit und entsprechendem Energieinhalt) beaufschlagt wird, bildet ein Fließgelenk aus, das sich mit abnehmender Geschwindigkeit (siehe Kurve des Fließgelenkverlaufs) zur Einspannstelle hin bewegt. Dabei tritt eine Abbiegung als Rotation um die jeweilige Lage des Fließgelenks ein. Beim Erreichen der Einspannstelle rotiert der Stab als wäre er über der Einspannstelle starr. Es konnte gezeigt werden, dass im Verhältnis zur Stabmasse kleine, sehr schnell bewegte Massen eine deutliche Spitzenabbiegung des Stabes, jedoch eine geringere Abbiegung an der Einspannstelle bewirken (mittlere Skizze). Anders verhält sich der Stab beim Auftreffen einer langsam bewegten, relativ großen Masse. Es kommt in erster Linie zu einer Verbiegung an der Einspannung, jedoch nur zu einer kleinen, bleibenden Verbiegung auf der Gesamtlänge des Stabes.

Erfolgt der Aufschlag nicht im oberen Blattteil, so ist häufig noch ein anderes Schadensbild zu beobachten. Es kommt zu einer örtlichen Durchbiegung, wobei auf Grund der Massenkräfte das obere und untere Blattteil gegen die Verformungsrichtung weisen.

Die **Reaktionskräfte auf den Schaufelfuß** (untere Skizze) sind von Bedeutung, wenn eine Schwachstelle vorliegt. Denkbar ist dies z.B. bei Schaufeln aus Faserwerkstoffen mit einem großen Steifigkeitssprung an der abstützenden Stelle. Dies kann ein die Nabenkontur zwischen den Schaufeln bildender Einsatz oder die Scheibe selbst sein.

Schlägt die FOD-Masse unterhalb des **Blattschwerpunktes** auf, so erfolgt in Aufschlagrichtung eine große Reaktionskraft am Fuß. Wird die Schaufel im Blattschwerpunkt getroffen, sind die zu erwartenden Reaktionskräfte am Fuß gering. Trifft die Masse im oberen Blattbereich auf, so ist die Reaktionskraft am Schaufelfuß gegen die Aufschlagrichtung gerichtet.





Bild 5.2.2-12 (Lit 5.2.2-15): Bereits in den 70er Jahren wurden die extrem hohen Drücke beim Aufschlag eines Vogels auf eine feste Wand gemessen. Es handelte sich um einen senkrechten Aufschlag (Skizzen oben). Ein typischer Druckverlauf über der Zeit ist im Diagramm dargestellt. In den Vogel bzw. die Ersatzmasse vom Stoßbeginn (Phase 1) zurücklaufende Schockwellen erzeugen das Druckmaximum (Schockdruck, Hugoniot Druck). Tatsächlich entstehen durch die Stoßwelle und deren Reflexion im Bereich des Druckmaximums extrem hochfrequente Druckschwankungen. Dann wird die Vogelmasse am Rand parallel zur Oberfläche nach außen beschleunigt (**Phase 2**). Die Folge ist ein Druckabfall im Inneren, der zur Auftrennung der Vogelmasse führt. So

kommt es zum Abfließen (Phase 3) entsprechend einer Flüssigkeit. Im Staupunkt bildet sich der typische Druckverlauf wie er beim Aufprall eines Vogels im Stoßzentrum an der Wand gemessen wird (Diagramm).

Die hochfrequente Druckoszillation ist real und offenbar die Folge einer Reflexion der Stoßwellen (Schockwellen).

## Literatur zu Kapitel 5.2.2

- **5.2.2-1** D. McCarthy, "Definition of Engine Debris and Some Proposals for Reducing Potential Damage to Aircraft Structure", Proceedings AGARD CP-248, 1978, Seite 7-1 bis 7-10.
- **5.2.2-2** A.D. Lane "Development of an Advanced Fan Blade Containment System", DOT/ FAA/CT-89/20, Final Report, Oct. 1988 Apr. 1989, Seite 1-25.
- **5.2.2-3** R.M. Ogorkiewicz, "Advances in armor materials", Zeitschrift "International Defense Review" 4/1991, Seite 349-352.
- 5.2.2-4 M.L.Marsden, "Lightweight Ceramic Faced Armours".
- **5.2.2-5** E.A. Wittmer, T.R. Stagliano, J.A. Rodal, "Engine Rotor Burst Containment/Control Studies", Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference "Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity", Seite 15-1 bis 15-30.
- **5.2.2-6** J Thiery, (übersetzt aus dem Französischen) "Festigkeit von Triebwerksgehäusen bei Schaufelbrüchen" Proceedings AGARD-CP-248 der AGARD Conference "Stress, Vibrations, Structural Integration and Engine Integrity", Seite 7-1 bis 7-10.
- 5.2.2-7 J.M.S.Keen, "Development of the Rolls-Royce RB.211 turbofan for airline operation", ASE-Paper 700292 des "National Air Transportation Meeting", New York N.Y., April 20-23, 1970. Seite 1-13.
- **5.2.2-8** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2", www.turboconsult.de, 2002, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 8.1 und 8.2.
- **5.2.2-9** M. Abouridouane, "Bruchverhalten von Leichtmetallen unter Impact-Beanspruchung", Dissertation an der RWTH-Aachen, Februar 2005, Seite 1-103.
- **5.2.2-10** Michael Wittner, "Leichtbau im Maschinenschutz Umsetzungsstrategien und Konzepte", Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 2008, Seite 1-151.
- **5.2.2-11** L.Engel, H.Klingele, "Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden", Gerling Institut für Schadensforschung 1974, ISBN 3-9800043-0-9, Seite 124-155.

- **5.2.2-12** W. Novy, "Kinetische Energiespeicher als Alternative zu Akkumulatoren und Kondensatoren", Zeitschrift "Automotive", Systeme Automotive 11, 2008, Seite 64-66.
- **5.2.2-13** "Allianz-Handbuch der Schadenverhütung", Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1972, Seite 411.
- **5.2.2-14** W. Johnson, A.G. Mamalis, "Gegenüberstellung statischer und dynamischer Schadens- und Deformationserscheinungen", Fortschr.-Ber.VDI-Z. Reihe 5 Nr. 32. VDI-Verlag, D-4000 Düsseldorf, 1977.
- **5.2.2-15** J.Frischbier, "Vogelschlag in Flugtriebwerken eine impulsartige Fluid-Struktur-Wechselwirkung in der Triebwerksauslegung", www.mtu.de/de/technologies/ engineering\_news/entwicklung. Seite 1-23.

# 5.2.3 Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität von Flüssigkeiten (Rheologie).



Die **Rheologie** befasst sich mit den Fließeigenschaften von Fluiden (fließfähigen Stoffen). Sie beschäftigt sich definitionsgemäß mit der Änderung des Form- und Fließverhaltens der Materie. Dies umfasst Elastizität, Viskosität und plastische Verformung (Lit. 5.3.2-3).

Der entscheidende Parameter ist die **Viskosität**. Sie beschreibt die innere Reibung im Fluid. Viskosität beeinflusst Eigenschaften und Betriebsverhalten von Maschinenelementen auf vielfältige Weise (Bild 5.2.3-1). Nicht zuletzt ist die Viskosität deshalb ein wichtiges Qualitätsmerkmal und produktspezifisch spezifiziert. Die Viskosität eines Mediums unter definierten Bedingungen lässt sich ausreichend genau messen. Sie ist von Temperatur und Schervorgängen im Fluid abhängig.

Newton nahm an, die Viskosität sei unabhängig von der Schergeschwindigkeit. In einem Modell bei dem sich die Flüssigkeit zwischen zwei Parallelflächen mit Relativbewegung befindet bedeutet das: Das Verhältnis von Scherspannung und Schergeschwindigkeit im Fluid ist konstant. Man spricht deshalb von einem Newtonschen Fluid (Bild 5.3.2-2). Verändert sich die Viskosität zeitweise bei konstanten Scherraten spricht man bei Viskositätsanstieg von Rheopexie und bei Abfall von Tixotropie. Ein Nicht Newtonsches Fluid wird auch als Bingham-Körper bezeichnet (Kapitel 5.2.3.1). Bei ihm ist die Viskosität von der Schergeschwindigkeit abhängig. Dabei kann fluid-spezifisch die Viskosität ansteigen oder abfallen. Das muss bei der Viskositätsmessung berücksichtigt werden.

Zu solchen Fluids gehören insbesondere Emulsionen und Dispersionen. Sie werden unter Scherung fließfähiger.Ein Beispiel zeigt die **Skizze oben**.Hier macht man sich das bessere Fließverhalten von Ketchup unter Stoßeinwirkung zu Nutze. In Ruhe läuft der Ketchup nicht aus der nach unten gerichteten Öffnung aus (links).Wird die Flasche jedoch geschüttelt oder geklopft, verflüssigt die Scherung den Ketchup und er läuft aus.

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Viskosität und Schergeschwindigkeit

**Bild 5.2.3-1:** Die **Viskosität** eines Fluids wird von den folgenden **Parametern** beeinflusst:

- Temperatur.

- Schergeschwindigkeit (bei Nicht Newtonschem Verhalten).

- Zeit. Davon sind viele Anwendungen betroffen von denen einige Beispiele folgen.

"A" Rührwerke: Von der Viskosität ist die Belastung der Bauteile bzw. des Antriebs vom Rühren abhängig. Insbesondere bei Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten besteht die Gefahr, den Einfluss der Schergeschwindigkeit nicht genügend zu berücksichtigen. Ein Faktor ist der Axialschub auf die Rührerlagerung. Solche Fluide sind besonders in der Nahrungsmittelindustrie und bei Baustoffen (Lacke "G", frischer Beton, siehe "F2") häufig.

"B" Kupplungen und Bremsen: Ein Beispiel ist die sog. Vico-Kupplung (Bild 5.2.3-2, Lit.5.2.3-1). Auf der Antriebswelle (Lamellenträger) sitzen Scheiben, meist in Form aufgereihter geschlitzter Lamellen. Sie wechseln sich jeweils mit Lamellen der Abtriebsseite (hier am rotierenden Gehäuse befestigt) ab. Dieses ist mit einem Nicht-Newtonschen Fluid (Silikonöl) gefüllt. Es versteift sich (Viskositätsanstieg) mit steigender Relativbewegung bzw. Schergeschwindigkeit (Bild 5.2.3-2). Zusätzlich führt die Ausdehnung des Silikonöls bei Erwärmung zu weiteren Kräften auf die Lamellen ('Hump Effekt', Bild 5.2.3-2). Entsprechend wächst das übertragene Drehmoment bis ein Gleichgewichtszustand bei einem Mindestschlupf erreicht ist. Solche mitlaufenden Kupplungen mit Differentialeigenschaften kommen in Allradantrieben zum Einsatz. Sind Lamellen einer Welle mit einem Flügelprofil versehen, werden sie von den ansteigenden Axialkräften gegen glatte Lamellen gepresst. Die mechanische Reibung erhöht das übertragbare Drehmoment (Lit. 5.2.3-5).

"C" Gleitlager: Viskosität spielt in der Tragfähigkeit aber auch der Reibung mit Auswirkung auf die Lagertemperatur eine entscheidende Rolle. Bei der Auslegung von Gleitlagerungen ist auf für Schmiermittel ungewöhnliche Viskositätsänderungen zu achten. Eine solche Situation kann in Prozessbädern oder anderen Fluiden welche zur Schmierung dienen auftreten.

"D" Kolben sind ein weitverbreitetes Maschinenelement in vielen Anwendungen. Die Viskosität des Fluids macht sich auf unterschiedliche Weise bemerkbar und ist für die Auslegung von Bedeutung.

- Dient das Fluid zur Schmierung der Gleitfläche ist es intensiver Scherung im Schmierspalt ausgesetzt (siehe auch "C").

- Wird der Widerstand beim Durchtritt durch eine Öffnung/Bohrung ("F3") wie in Stoßdämpfern genutzt, ist die Funktion beeinflusst. Sie muss bei allen Betriebsbedingungen im Auslegungsrahmen bleiben.

- Verändert sich die Viskosität eines zu fördernden Fluids, sind Antriebsleistung und die mechanische Belastung der Komponenten betroffen.

"**E" Sprühdüsen** finden eine vielfältige Anwendung. Dazu gehören

- Lackierung,

- Kraftstoffeinspritzung,

- Sprühvorgänge.

Die Strahl/Sprühkegel und Tröpfchen (Größe, Verteilung) sind für das Ergebnis von entscheidender Bedeutung. Sie hängen von der Viskosität direkt (Zerteilung) und indirekt (Druck und Geschwindigkeit des Fluids in der Düse) ab.

"F1" Strömungsmaschinen: In Strömungsmaschinen ist die Viskosität des Fördermittels Auslegungsgrundlage für wichtige Parameter wie Lagerkräfte (z.B. Achsschub), Leistungsaufnahme und Reibungsverluste.

"F2" Vibrationsverteiler/-verflüssiger: Eine wichtige Anwendung ist die Verteilung und Verdichtung von flüssigem Beton. Dies dürfte auch einen Einfluss auf die Belastung und Dichtigkeit der Schalung und der Abstützungen haben (Bild 5.2.3-2 "C").

"F3" Stoßdämpfer: Die Viskosität bestimmt die Wirkung beim Durchströmen einer Öffnung/Bohrung.

"G" Lackierung: Dabei spielt eine vorübergehende Viskositätsänderung eine Rolle (Bild 5.2.3-2 "C" und "D"). Bei Lacken ist eine Probleme der Maschinenelemente

Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Viskosität und Schergeschwindigkeit



anfangs hohe Viskosität (geringe Tropfneigung) erwünscht, die beim Streichvorgang abfällt. So wird eine ebene und glechmäßige Beschichtung erzielt.

"**H**" **Dosierung und Aufbewahrung**: Bei pastösen Fluiden in Tuben (z.B. Zahncreme) ist ein leichtes Austreten unter Druck erwünscht. Die se Masse soll jedoch nicht tropfen und wegfließen. Die Viskosität muss also bei niedriger **Schergeschwindigkeit** wieder ansteigen.

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Viskosität und Schergeschwindigkeit



**Bild 5.2.3-2** (Lit. 5.2.3-1, Lit.5.2.3-2): Bei der in den Diagrammen angegebenen Viskosität handelt es sich um dynamische **Scherviskosität** die mit einem geeigneten Viskosimeter bestimmt wird. Dabei bewegen sich von einem Spalt getrennte Flächen mit einer Relativgeschwindigkeit.

Ein wichtiger Einfluss auf das Verhalten eines nicht-Newtonschen Öls sind die sich bei verschiedenen **Betriebszuständen** (Wärmedehnung, elastische Verformungen, Relativgeschwindigkeiten/Drehzahlen) einer Maschine einstellenden **Spaltweiten**. Sie beeinflussen die Scherung im Öl und damit **Viskosität und Wärmeentwicklung**. Die Kenntnis dieser Werte ist jedoch für die konstruktive Auslegung erforderlich.

"A" zeigt das Viskositätsmodell nach Newton. Es besteht aus zwei flächengleichen parallelen Platten im Abstand "h". Diese bewegen sich in gleicher Richtung mit der Geschwindigkeitsdifferenz "v", der Schergeschwindigkeit (engl. shear rate). Im Spalt befindet sich ein Fluid. Es überträgt eine Scherkraft zwischen den Platten. Bezieht man diese Kraft auf die Plattenfläche erhält man die Scherspannung im Fluid. Damit gilt: Viskosität = Scherspannung/Scherrate.

"B": Gilt für ein Fluid mit Newtonschem Verhalten. Die Scherspannung ist linear von der Scherrate abhängig ("B1"). Dabei ändert sich definitionsgemäß die Viskosität nicht ("B2"). Dieses Verhalten ist das häufigere. Es gilt beispielsweise für Schmieröle.

"C": Nicht Newtonsches Verhalten kann sich in unterschiedlicher Weise zeigen.

"C1.1" und "C1.2" zeigen pseudoplastisches Verhalten (Scherverflüssigung, engl. shearthinning) ist besonders häufig. Man findet es bei Emulsionen und Dispersionen (Bild 5.2.3-1 "H"). Beispiel ist flüssiger Beton (Bild 5.2.3-1, "F2").

"C2.1" und "C2.2" gelten für dilatantes Verhalten (Scherverfestigung, engl. shearthickening). Man beobachtet es in dicken Schlämmen mit Wasser als Fluid und Partikeln aus Lehm, Maisstärke oder Sand.

"C3.1" und "C3.2" zeigen in Ruhe bzw. ohne Scherung Festkörperverhalten. Erst nach Überschreiten einer Mindestkraft (engl. yield value) tritt Fließen auf. Ein typischer Vertreter ist **Tomatenketchup** (Seite 5.2.3-1).

"**D**" zeigt Fluide bei denen ein **Zeiteffekt** im Viskositätsverhalten auftritt.

"D1" charakterisieren thixotropisches Verhalten. Die Viskosität fällt spontan ab, wenn eine Scherung auftritt. Dies ist z.B. bei streichbaren Farben erwünscht, um ein Tropfen beim Auftrag zu verhindern (Bild 5.3.2-1 "G"). Bei Schmierfetten verhindert dieses Verhalten ein Ablaufen im Stillstand und gewährleistet wenn erforderlich eine optimale Verteilung.

"D2.1" und "D2.2" gilt für Rheopexie. Die Scherspannung bzw. Viskosität steigt mit der Zeit an. Bei einem Anstieg der Scherrate verändert sich die Scherspannung (Viskosität) anders als beim Abfallen. Dieser Effekt kann im Ruhezustand reversibel sein.

Der Hump-Effekt kann bei Viskosekupp*lungen* (siehe Skizze) auftreten. Die Gestaltung der Lamellen erlaubt es, dass eine geringe Menge an Luft im System verbleibt. Die Silikonölfüllung der Kupplung erwärmt sich beim Schlupf und dehnt sich aus. Das komprimiert die Restluft. Sie löst sich im heißeren Silikonöl. Dabei erfahren die Lamellen beider Rotoren auf Grund ihrer geschlitzten Form erhöhte Strömungskräfte die sie gegeneinander drücken. Bei Überbrückung entsteht plötzlich mechanische Reibung mit der das übertragene Drehmoment ansteigt und die Lamellen gegeneinander blockieren. Das hat zwar den Vorteil, dass die Wärmeentstehung im Silikonöl stark abfällt was ein Fail-Save-Verhalten bewirkt. Andererseits leidet das Betriebsverhalten unter einer stoßartigen Wirkung der Kupplung. Die Scherrate entspricht der Relativgeschwindigkeit zwischen den sich bewegenden Flächen bezogen auf deren Abstand (Spaltweite)

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Viskosität und Schergeschwindigkeit

#### 5.2.3.1 Magnetorheologische und Elektrorheologische Fluide

Bestimmte Flüssigkeiten bzw. Partikelsuspensionen verändern ihre Viskosität bei Anlegen magnetischer (Magnetorheologie) oder elektrischer (Elektrorheologie) Felder. Diese Effekte kann man für einstellbare Maschinenelemente nutzen. Dabei kann die Wirkung bei Scherbeanspruchung des Fluids (Kupplungen, Bremsen), Durchströmung (Stoß- und Schwingungsdämpfer) und Quetschung (Schwingungsdämpfer) genutzt werden. Die Technologie befindet sich auch zu Beginn dieses Jahrhunderts noch teilweise im Entwicklungsstadium.

Magnetorheologie: Bei dem Fluid (engl. Magnetorheological Fluid = MRF, Bingham-Körper siehe Bild 5.2.3-2) handelt es sich um ein Gemisch aus einer Basisflüssigkeit, gewöhnlich elektrisch isolierende Silikonöle oder synthetische Öle. Diese sind hygroskopisch und benötigen einen Stabilisator. Er soll die eingebrachten meist kugelförmigen Partikel mit 1-10µ Durchmesser in Schwebe halten, indem Koagulation und Absetzen verhindert wird. Es handelt sich um ferromagnetische, relativ harte Partikel. Ihre Neigung zur Sedimentation und Abrasivität beeinflussen das Betriebsverhalten schadenswirksam. Der Volumenanteil kann zwischen 20% und 50% liegen (Lit. 5.2.3-5). Im Magnetfeld eines Elektro- oder Permanentmagneten ordnen sich die so polarisierten Partikel in Ketten entlang den Feldlinien. Durch Verstärkung des Magnetfeldes lässt sich die Viskosität reversibel erhöhen ('stromgesteuerter' Vorgang). Die Kräfte werden von diesen im Magnetfeld festgehaltenen Ketten bis zu einer Grenzbelastung übertragen. Wird diese erreicht, zerreißen die Ketten. Sie verlieren die Orientierung und den viskositätssteigernden Effekt. Für höchste Viskositätsbeinflussung muss die Richtung der Strömung (turbulent) senkrecht zur Feldstärke orientiert sein (Bild 5.2.3-3). Die Viskositätssteigerung im Magnetfeld gegenüber der unbeeinflussten Viskosität ist eine Materialkenngröße und wird als Binghamanteil. bezeichnet. Der Vorgang der Viskositätssteigerung kann in Millisekunden erfolgen und ist weitgehend reversibel.

Davon zu unterscheiden sind ebenfalls magnetische Fluide, sog. **Ferrofluide.** Bei ihnen will man genau diesen ausrichtenden Effekt bei Magnetisierung vermeiden. Sie zeigen keinen nennenswerten Anstieg der Viskosität im Magnetfeld obwohl sich die Zusammensetzung mit MRF ähnelt. Diese Fluide werden für magnetische Volumenkräfte genutzt.

Magnetorheologische Effekte haben das Potenzial problematischer **unerwarteter Einflüsse**. Zwar wird darüber in der vorliegenden Literatur nicht berichtet, für den Fachmann sind jedoch Szenarien denkbar wie:

Entsteht im Schmierstoffkreislauf einer Maschine mit hohen Magnetfeldern örtlich großer ferromagnetischer Abrieb, könnte dies einen Schadensablauf beeinflussen. So ist denkbar, dass im Schadensbereich auf Grund des Viskositätsanstiegs eine unerwartet große **Wärmeentwicklung** auftritt. Auch ist eine Anreicherung der Partikel die Verschleiß beschleunigen denkbar. Elektrisch leitfähige parallel orientierte Ketten können **Durchschläge** von Kriechströmen und Fremdströmen (Wirbelströmen) begünstigen. Dies würde gefährliche **Mikroschmelzkrater** erzeugen, was die Lebensdauer von **Wälzflächen** (Wälzlager, Zahnräder) durch Schwingermüdung unzulässig reduziert. Besonders Lager von Generatoren und Motoren in künftigen Fahrzeugantrieben dürften gefährdet sein. Das gilt auch für Generatoren zukünftiger Turbo-Flugtriebwerke. Sie sitzen direkt auf einer Hauptwelle und dienen zur Stromversorgung der Anbaugeräte. Damit spart man sich den konventionellen mechanischen Antrieb (Radialwelle mit zwei Kegelradgetrieben) von der Hauptwelle zum außen liegenden Anbaugetriebe.

Auch **Gleitlager** können als Folge von Stromdurchgang versagen (Band 2 Bild 6.3.2-5). Hier handelt es sich eher um einen Abtrag durch '**Elektroerosion**'.

**Elektrorheologie:** Das Fluid (engl. Electrorheological Fluid = **ERF**) ist **elektrisch leitfähig**. Hier wird eine hohe Gleichspannung an das Fluid gelegt ('spannungsgesteuerter' Vorgang).**Verunreinigungen** spielen eine wichtige Rolle. Sie können **Durchschläge** auslösen. Die Leitfähigkeit beruht auf relativ **weichen Partikeln** geringer Dichte und niedriger Verschleißwirkung. Die **Leitfähigkeit erhöht sich exponentiell mit der Temperatur**. Die damit ansteigende elektrische Leistung begrenzt den Einsatzbereich. Die Stromstärke ist dabei äußerst niedrig. Die auftretenden Schubspannungen bzw. erzielbaren Kräfte sind etwa 1/10 bei MRF. Längere Betätigungszeiten führen zu einer **ungleichmäßigen Partikelverteilung** durch Elektrophorese.

Die Richtung des Magnetfelds zur Relativbewegung bestimmt die Kraftübertragung durch die Viskosität einer MRF.



**Bild 5.2.3** (Lit. 5.2.3-6): Am Beispiel einer Kupplung in 'Gockenkonfiguration' sollen die Vorgänge im **Magnetorheologischen Fluid** zwischen den beiden Kupplungsteilen gezeigt werden (Skizze rechts). Die magnetischen Partikel ordnen sich in Ketten an. Nur bestimmte Orientierungen führen zu nutzbarer Kraftübertragung. Diese **stehen senkrecht auf der sog.** 

Wirbelstärke. Dies ist ein Vektor, der die Umlaufgeschwindigkeit des Wirbels berücksichtigt und senkrecht auf dessen Ebene im Fluid steht. Eine zur Wirbelstärke parallele Orientierung der Ketten kann keine nutzbaren Kräfte übertragen.

## Literatur zu Kapitel 5.2.3

- 5.2.3-1 "Visco-Kupplung", http://de.wikipedia.org, August. 2010, Seite 1-3
- **5.2.3-2** "Öl als Konstruktionselement in Schraubenkompressoren", FG Fluidtechnik zur Untersuchung des Betriebsverhaltens von Schraubenkompressoren bei Einsatz nichtnewtonscher Öle, 03/2000, Seite 1-13.
- **5.2.3-3** "What is Viscosity", Cole-Parmer Technical Library, www.coleparmer.com, Jan. 2010, Seite 1-8.
- **5.2.3-4** "Newtonsches Fluid", Nichtnewtonsches Fluid", Wikipedia, www.wikipedia.org, Jan. 2010Seite 1 und 2.
- 5.2.3-5 "Die Visco-Kupplung", www.arstechnica.de, Jan. 2010, 3 Seiten.
- **5.2.3-6** Dietrich Lampe, "Anwendung von Magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen", Seite 1-7.

Druckstöße in Flüssigkeiten

## 5.2.4 'Schläge', Druckstöße und Druckwellen in Flüssigkeiten.



5.2.4.1 Flüssigkeitsschlag



Unter Flüssigkeitsschlag wird im Folgenden ein Vorgang verstanden bei dem von Außen mechanisch Druck auf eine ruhende Flüssigkeit einwirkt (Bild 5.2.4.1-1). Dieser Vorgang ist nicht mit einem Druckstoß zu verwechseln, der in einer bewegten Flüssigkeitssäule durch schnelles abbremsen entsteht (Bild 5.2.4.3-3). Flüssigkeitsschlag tritt als Wasserschlag in Kolbenmaschinen wie Motoren und Dampfmaschinen auf. Die Inkompressibilität der Flüssigkeit hat eine katastrophale Überlastung der Komponenten zur Folge.

Wasserschlag wird in der Literatur (Bild 5.2.4-8, Lit. 5.2.4-7) auch im Zusammenhang mit Gasströmen verwendet, wenn Luft oder andere **Gase und Dämpfe** größere Mengen **Wasser oder andere Kondensate mitreißen**. Diese haben im Vergleich zur transportierenden Gasströmung erheblich mehr Masse. Sie üben mit ihrer hohen kinetischen Energie beim Auftreffen eine Schlagbeanspruchung auf ein Hindernis aus.

Auch in den Brennraum während des Stillstands eintretender **Kraftstoff** kann beim Anfahren einen Flüssigkeitsschlag auslösen. So wurden in einem luftgekühlten Benzinmotor älteren Typs militärischer Anwendung mehrere Fälle von **Benzinschlägen** beobachtet. Dabei knickte das betroffene Pleuel aus. Die Kolben aus einer Aluminiumlegierung wurden von der Bolzenbohrung aus symmetrisch gespalten.

Problemanalysen der Maschinenelemente

# Druckstöße in Flüssigkeiten

Die Folgen eines Flüssigkeitsschlags (Wasserschlag, Benzinschlag) in Kolbenmotoren.



Bild 5.2.4.1-1 (Lit 5.2.4-5 bis Lit. 5.2.4-8): Die Gefahr eines Flüssigkeitsschlags besteht, wenn eine äußere Kraft auf eine stehende Flüssigkeit einwirkt. Beispiele sind Fälle, bei denen sich größere Mengen Kraftstoff oder Kühlwasser im Stillstand im Verbrennungsraum sammeln. Beispelsweise kann Kühlwasser als Folge der Perforierung einer nassen Zylinderlaufbüchse eindringen. Ursache ist Kavitation (Bild 55.1.3-10). Auch durch Undichtigkeit der Zylinderkopfdichtung können sich gefährliche Mengen Kühlwasser im Stillstand ansammeln.

Auch bei **Dampfmaschinen** kennt man Wasserschlag. Hier handelt es sich um **Kondens**wasseransammlung im Zylinder.

Eine weitere Form des Wasserschlags ist **bei** laufendem Motor möglich. Das ist der Fall beim durchqueren hoch stehenden Wassers. Wasser kann dann bei nicht ausreichender 'Wattiefe' in großen Mengen angesaugt werden.

Kraftstoff kann sich durch zu häufiges Starten

ohne Zündung oder eine undichte Kraftstoffzufuhr im Stillstand ansammeln. Denkbar ist auch Öl als Folge eines Turboladerschadens, wenn größere Mengen in den Lufteintritt dringen. In allen diesen Fällen kann es auf Grund der Inkompressibilität der Flüssigkeit beim Anlassen zu schweren Schäden kommen. Als Folgen sind 'gespaltene' (Leichtmetall)Kolben und ausgeknickte Pleuel bekannt. Folgeschäden können auch erst nach längerer Zeit eintreten. Ein Beispiel sind Schwingbrüche von durch Flüssigkeitsschlag verbogenen Kurbelwellen.

Druckstöße in Flüssigkeiten

#### Flüssigkeitsschlag duch äußere Schlageinwirkung auf einen gefüllten Hohlraum



Bild 5.2.4.1-2 (Lit 5.2.4-11): Dieses Beispiel gibt einen Eindruck über die Wirkung von Stoßvorgängen auf und in stehenden Flüssigkeiten. Die Untersuchung dieses katastrophalen Flugunfalls zeigte, dass der gefährliche Kraftstoffaustritt an einem Flügeltank als Folge des Aufschlags eines Reifenbruchstücks (ca. 4,5 kg)

## Druckstöße in Flüssigkeiten

zu erklären ist. Es entstand als beim Start ein größerer Metallstreifen mit hoher Geschwindigkeit überrollt wurde. Das Reifenstück wurde vom Fahrwerk gegen die Tragfläche geschleudert. Dabei deformierte sich die Flügelhaut, die in diesem Fall gleichzeitig als Wand des vollen Kraftstofftanks dient. Als Folge wurden zwei Abläufe des Tankwandbruchs betrachtet.

Schadenshypothese 1: Im Kraftstoff am nicht durchschlagenen Aufschlag entstand eine Stoßwelle (Skizze unten). Eine Abschätzung ergab, dass sie sich mit ca.1400 m/s und einem anfänglichen Druck von 200 bar ausbreitete. Der indirekte Druckstoß in der Nähe des Aufschlags erzeugte einen Druck von ca. 10 bar. Die Bewegung des Kraftstoffs selbst (weiße Pfeile) liegt deutlich unter 10<sup>2</sup> m/s. Diese Effekte erzeugten eine S-förmige Deformation der Tankwand und den Ausbruch (Skizze Mitte links). Diese Schadenshypothese wurde als die Wahrscheinliche angesehen.

Schadenshypothese 2 wird als weniger wahrscheinlich angesehen. Sie entspricht eher dem Zerbersten einer Frucht bei Durchtritt eines Projektils (Skizze Mitte rechts). Beim Aufschlag einer Masse und Durchschlag mit hoher Geschwindigkeit geht deren kinetische Energie auf die Flüssigkeit/Kraftstoff über. Um diese Zone bildet sich ein Hohlraum (Dampfbildung?). Bei vollem Tank wie in diesem Fall führt dieses Zusatzvolumen zu einer Verdrängung und belastet so die Tankstruktur. Dieses Phänomen wird in der Fachliteratur als 'pressure surge' bezeichnet. Flüssigkeitsschlag in Dampfturbinen



Bild 5.2.4.1-3 (Lit. 5.2.4-7 und Lit. 5.2.4-8): Gerät Wasser (Kondenswasser) in größerer Menge in eine Dampfturbine wird auch hier in der Literatur von Wasserschlag gesprochen. Es handelt sich um den Aufschlag von Flüssigkeit bei hoher Relativgeschwindigkeit. Als Folge stoßartig ansteigender, unsymmetrisch wirkender Förderkräfte kommt es zur Überlastung der Beschaufelung und/oder der radialen und axialen Lagerung. Die Folgen sind Überlastungen an Drucklagern, die Beschädigung von Dichtungen wie Stopfbuchsen und die Überlastung von **Schaufeln** bis zum Bruch. Darüber hinaus können auf Grund der hohen Wärmeleitung offenbar Temperaturgradienten beim Kontakt mit der Flüssigkeit auftreten, die gefährliche Wellenverkrümmungen an Turbomaschinen hervorrufen.

Druckstöße in Flüssigkeiten

#### Flüssigkeitsschlag ähnliche Vorgänge beim Aufprall eines biologischen Körpers



Bild 5.2.4.1-4 (Lit 5.2.4-12): Für Laborversuche mit Gasdruckkanonen (Luft, Helium)

werden gewöhnlich **Ersatzmassen** statt Originalvögel verwendet. Verschiedene Mischungen

# Druckstöße in Flüssigkeiten

von Kautschuk, 'Plastilin' oder Gelatine mit anderen Stoffen (z.B. Holzwolle) zeigen jedoch Ergebnisse die für Nachweise im Triebwerk nicht ausreichend realistisch sind. Eine Mischung aus 85 % Wasser und 15% Luft bildet den Druckverlauf am realistischsten nach (Bild 5.2.2-12). Trotzdem müssen in Abnahmeversuchen eines Triebwerkstyps kurz vor dem Versuch eingeschläferte Vögel verwendet werden.

Die Diagramme unten gelten für Messwerte an Platten bei senkrechtem Stoß mit einer Wasser-Luft-Vogelersatzmasse in Zylinderform. Der Schockdruck (Hugoniot Druck) liegt nahezu 10 mal höher als der Abfließdruck (Bild 5.2.2-2). Die Auftreffgeschwindigkeit erhöht den Druck exponentiell. Das zeigen Messwerte in Übereinstimmung mit der berechneten Kurve. Zur besseren Einschätzung für den Praktiker sei daran erinnert, dass die MPa Angaben dem zehnfachen Zahlenwert in bar entsprechen. Es treten also Stoßdrücke bis zu mehreren 1000 bar und Abfließdrücke in der Größe von mehreren 100 bar auf. Damit werden Werkstoffe wie faserverstärkter Kunststoff (FvK) eines Nasenconus (Lit. 5.2.4-4), der Auskleidung von Lufteinläufen und Triebwerksgondeln weit überlastet. Dies gilt selbst bei schrägem Aufschlag auch für Leichtmetalle der Wände von Flugzeugzellen. Ihr Versagen kann gefährliche Sekundärschäden eines Vogelschlags hervorrufen.

Auch typische Schadensbilder an Verdichterschaufeln, besonders Fanschaufeln (Bild oben links), lassen sich mit computergestützten Berechnungen, welche die Stoßeffekte berücksichtigen, verblüffend gut simulieren (Skizze oben rechts). Das demonstriert die Realitätsnähe eindrucksvoll. **Rissbildung** im Aufschlagbereich ist im Zusammenhang mit einem **Versprödungseffekt** des Schaufelwerkstoffs bei **Hochgeschwindigkeitsverformung** zu sehen (Bild 5.2.2-2, Bild 5.2.2-8 und Bild 5.2.2-9).

Druckstöße in Flüssigkeiten

## 5.2.4.2 Stoßwellen in Flüssigkeiten durch elektrische Funken

**Stoßwellen/Schockwellen** können auf unterschiedliche Weise entstehen. Sie erfordern immer eine örtliche hohe Beschleunigung der Flüssigkeit. Dazu können schnell bewegte Wände (Aufschlag eines Körpers, Druckwelle durch eine Explosion), plötzlich entstehende oder kollabierende Dampfblasen (**Dampfschlag**, Bild 5.2.4-5) oder Plasma in einem Lichtbogen dienen. Solche Stoßwellen lassen sich nutzbringend anwenden. Es ist aber auch denkbar, dass sie **Folgeschäden** auslösen. Hier ist an **ausbrechende Ablagerungen** zu denken, die Erosion und Zusetzen feiner Öffnungen (Siebe, Ventile, Regler) bewirken und bewegliche Elemente (z.B. Steuerkolben) in einem durchströmten System blockieren. Im Extremfall kann eine Stoßwelle größere Blechstücke aus Flüssigkeitstanks sprengen. So besteht der Verdacht, dass der Kraftstofftank des Überschallflugzeugs Concorde großflächig durch ein abfliegendes Reifenstück ausbrach. Beim Aufschlag des Gummistücks entstand offenbar im Kraftstoff eine entsprechend starke Schockwelle.

- Technische Anwendungen von Schockwellen nutzen zwei Effekte:
- Formgebung und Stanzen dünnwandiger Metallstrukturen, meist Hohlkörpern.(Bild 3-20).
- Zerkleinerung von Mineralien. Hier handelt es sich bei relativ niedrigen Energien um medizinische Anwendungen (Lit. 5.2.4-9). Auch die in der Technik weitverbreitete Ultraschallreinigung von Bauteilen lässt sich dem zuordnen. Bei ungeeigneten Prozessparametern können Schäden durch Reibverschleiß (false brinelling) entstehen.
- In der Technik geht es bei hohen Impulsenergien um die Zertrümmerung mineralischer Werkstoffe (Lit. 5.2.4-10).
- Entsanden und entfernen der Formschalen von Gussteilen,
- Reinigen von Metalloberflächen.

Energiereiche Stoßwellen für technische Anwendungen werden mit Funkenentladung unter Wasser erzeugt. Man spricht von **Leistungsschallimpulsen**. Sie benötigen elektrische Funken mit einer Spannung >250 kV. Schwache Stoßwellen werden darüber hinaus mit Hilfe von Mikroexplosionen (Kügelchen aus Blei- oder Silberazetat), Unterwasser gepulsten Lasern (Lasertripter), elektromagnetisch (Lithoster, z.B. Lautsprecherprinzip) und mit Piezoelementen erzeugt.



Problemanalysen der Maschinenelemente

# Druckstöße in Flüssigkeiten



Bild 5.2.4-4 (Lit 5.2.4-10): Stoßwellen in Flüssigkeiten lassen sich nutzbringend einsetzen. Abgesehen von der Medizin (Nierensteinzertrümmerung/Nierensteinlithotripsie) gibt es auch Anwendungen in der Technik. Es handelt sich dabei um Leistungsschallimpulse. Die Impulse entstehen durch elektrische Funken in der übertragenden Flüssigkeit (Wasser). Hierzu zwei Beispiele:

- Ablösung spröder Beläge/Ablagerungen in Rohrleitungen (Skizze links). Die Stoßwelle dehnt die Rohrwand schockartig auf. Dem kann die spröde Beschichtung nicht folgen und platzt ab.

- Gesteinszertrümmerung (Skizze rechts): Soll großtechnisch für die Zerkleinerung spröder Materialien wie Glas, Beton, Schlacke, Erze und Kohle zum Einsatz kommen.

**Bild 5.2.4-5** (Lit 5.2.4-3): Ein **Dampfschlag** ist im Gegensatz zur Kavitation ein Makrovorgang. Bei einem Dampfschlag kollabiert abkühlender Dampf in einer Flüssigkeit durch Kondensation ("A"). Dabei entsteht kurzfristig ein 'Vakuum' in das die Flüssigkeit implodiert. Dieser Vorgang kann mit Schallgeschwindigkeit ablaufen. Gefährdet sind Wasserdampf führende Systeme. Dazu gehören Kesselanlagen. Wird Dampf zur Aufheizung in eine Flüssigkeit geblasen, lässt sich ein gefährlicher Dampfschlag mit einer Eindüsung in möglichst feinen Tröpfchen vermeiden. Eine besonders heftige und gefährliche Situation liegt vor, wenn Kondensat im System verblieben ist und ein großes Wasserdampfvolumen eintritt ("**B**"). Der Druckstoß kann Rohr- und Behälterwandungen aufreißen und/oder mit der elastischen Verformung Rohrhalterungen überlasten.

Wird **Solarthermie** ("C") mit einem wässrigen Medium bei über 100 °C betrieben, verdampft bei einem **Ausfall der Druckhaltung** Wasser an den Heizflächen. Dieser Dampf wird mit der Strömung zu kälteren Bereichen transportiert und kondensiert dort mit einem Dampfschlag.
Druckstöße in Flüssigkeiten

## 5.2.4.3 Druckstöße (Joukowsky-Stoß) und Kavitationsschläge



Unter Druckstößen versteht man die Druckspitze einer dynamischen Druckänderung in Flüssigkeiten (Lit.5.2.4-19) und Gasen (Kapitel 5.2.5). Gewöhnlich wird dieser Begriff jedoch im Zusammenhang mit Flüssigkeitsströmungen in Rohren verwendet. Der Druckstoß setzt sich in Flüssigkeiten als Longitudinalwelle mit der flüssigkeitsspezifischen Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit ("a") fort. In freiem Wasser ist dies die Schallgeschwindigket von ca. 1440 m/s. In einer Rohrleitung aus Stahl liegt diese Geschwindigkeit, abhängig von der Geometrie und der Elastizität des Rohrs, zwischen 1400 m/s und 300 m/s. Weiter spielen Faktoren wie Gasgehalt (z.B. Abwasser, "a" fällt stark ab) und gegebenenfalls eine Einbettug (Erdboden, steigert "a" deutlich) eine Rolle. Ein typischer Wert sind ca. 1000 m/s. Beim Abbremsen der Strömung entsteht ein Druckstoß der sich gegen die Strömungsrichtung bewegt. In einer Flüssigkeitssäule wird dieser als Wasserhammer (engl. pressure surge) bezeichnet. Er ist die Folge einer schnellen Änderung, der Strömungsgeschwindigkeit. Beim Abbremsen wird kinetische Energie aus der Strömung frei. Abhängig von der Steifigkeit des Systems (elastische Aufweitung) und weiteren Einflüssen (Bild 5.2.4.4-1) treten hohe Drücke bzw. Massenkräfte auf. Diese können in einem Raum wie einer Leitung oder einem Kessel zu gefährlich heftigen schockartigen Belastungen führen. Die in der Flüssigkeit und den Leitungen elastisch gespeicherte Energie kann beim Druckabfall wieder an die Flüssigkeit eingespeist werden. So können mehrere aufeinanderfolgende Druckstöße auftreten. Entspricht deren Frequenz einer Eigenschwingung des Systems sind gefährliche Resonanzen mit besonders hoher Überlastung möglich. Dabei wirkt sich die Dämpfung des Systems auf den Druckstoss aus. Insbesondere die Reibung und Umlenkungsverluste an Rohrwänden und Einbauten spielt einer Rolle. Eine hohe Dämpfung lässt die nachfolgenden Druckspitzen schnell abfallen.

Steht der **Spitzendruck** im Vordergrund spricht man vom **Joukowsky-Stoß**. Dieser schockartige Druckanstieg muss kürzer dauern als die Reflexionszeit in der Rohrleitung. Er beschränkt sich auf den Zeitraum der Geschwindigkeitsänderung und erfordert ausreichend niedrige Reibungsverluste (Bild 5.2.4.3-1). Wichtig ist sich zu vergegenwärtigen, dass der Druck in einer Flüssigkeit Druckstöße in Flüssigkeiten

in alle Richtngen wirkt. Geht es jedoch um die entstehenden **Kräfte** ist die druckbeaufschlagte Fläche zu berücksichtigen (Lit. 5.2.4-14). Solche Kräfte wirken beispielsweise auf **Absperrschieber** oder äußere **Halterungen der Rohrleitungen** (Bild 5.2.4.3-1),

Die Rohrreibung kann sich auch verstärkend auf einen Druckstoß (um ein Mehrfaches) auswirken. Das kennt man von **sehr langen Rohrleitungen** (>10 km) für den Erdöltransport. Ursache ist der Wegfall der Reibungsverluste bei stehender Strömung. Dadurch addiert sich der sonst zur Überwindung der Reibung notwenige Pumpendruck zum Joukowsky-Stoß. Man spricht von 'Line Packing' (Bild 5.2.4.3-1)..

Hinter dem Strömungshindernis kann es zu starken **Druckabfall** kommen. Eine solche Situation entseht beim plötzlichen Stillstand einer Pumpe (Bild 5.2.4.3-2) oder dem Schließen eines Ventils. Es kommt zum **Abreißen der Strömung** und **Dampfblasenbildung** (**Makrokavitation**). Beim **Kollabieren der Dampfblase** entstehen in der Flüssigkeitssäule Druckstöße. Man spricht dann auch von **Kavitationsschlägen** (Bild 5.2.4-3).

**Wasser<u>schlag</u>** entsteht dagegen durch eine **äußere mechanische Krafteinwirkung** auf eine stehende Flüssigkeit und wird deshalb gesondert behandelt (Bild 5.2.4-1).

Druckstößen und -schlägen in Flüssigkeiten begegnet man in der Technik häufg. Meist im Zusammenhang mit Wasserleitungen und Ölpipelines. Weniger bewusst sind Beispiele wie

- Kraftsoffeinspritzungen bei Verbrennungsmotoren, insbesondere Diseselmotoren ('Common-Rail-Systeme', Lit. 5.2.4-23) und

- Kernreaktoren nach dem Siedewasserprinzip (Lit. 5.2.4-24).



**Bild 5.2.4.3-0** (Lit 5.2.4-14 und Lit. 5.2.4-15): **T**ypische **Ursachen** für Druckstöße und schläge (Bild 5.2.4.3-2) sowie Resonanzen (Kapitel 5.2.4.4) sind:

- **Beschleunigung** der Flüssigkeitssäule: Schnelle **Drehzahländerungen** (z.B. Ausfall) **von Pumpen**, einschließlich **Start und**  Abstellen. Das gilt besonders bei einer Wiederinbetriebnahme.

 Verzögerung der Flüssigkeitssäule (z.B. beim Abschalten von Pumpen) und Schließen von Ventilen (Schnellschluss, Magnetventil).

## Druckstöße in Flüssigkeiten



- Änderung der Strömungsrichtung (Magnetventile).
- Querschnittsänderungen im Rohrleitungssystem.
- Schnelle **Betriebsänderungen** durch **Regler** und **Armaturen**.
- Leckagen: Dichtungen und Ventile.

Eine Vielzahl **Parameter und Einflüsse** wirken sich auf die Neigung einer Anlage zu gefährlichen Druckstößen aus:

- Strömung: Geschwindigkeit, Druck, Formen der Strömung wie Pfropfen-, Kolben-, und Blasenströmung.
   Medium/Flüssigkeit:Schallgeschwindigkeit,
- Dichte, Temperatur, Anteil gelöster Gase.
- Reibungseffekte: Flüssigkeit/Rohrwand, Gleitlager.
- Anlage: Leitung:Länge, Verlauf, Geometrie, Wandstärken/Elastizität.
   Ventile (Schließzeit), Pumpen (Charakteristik).

Bild 5.2.4.3-1 (Lit 5.2.4-14 und Lit. 5.2.4-15): Die innere Reibung der Flüssigkeit steigt mit der Viskosität. Zusätzlich macht sich die Reibung an den Rohrwänden (Rohrreibung) sehr langer Leitungen (über 10 km) bemerkbar. Diese Reibungsverluste erfordern nahezu die gesamte Förderleistung bzw. Förderhöhe der Pumpe. Kommt die Strömung durch ein plötzliches Hindernis zum Stehen, fallen die genannten Reibungsverluste weg. So addiert sich die Druckhöhe der Pumpe (Line Packing) zum Druckstoß was den Gesamtdruck deutlich erhöht. Diesen Effekt kennt man von langen Öl-Pipelines. Er tritt wegen der niedrigen Viskosität des Wassers bei Wasserleitungen nicht nennenswert in Erscheinung.

Problemanalysen der Maschinenelemente

Druckstöße in Flüssigkeiten



Bild 5.2.4.3-2 (Lit 5.2.4-2): Wenn ein Flüssigkeitsstrom plötzlich abgebremst wird treten gefährlich starke Druckstöße auf. Sie beruhen auf der Massenträgheit der abgebremsten Strömung und enthalten einen Teil der kinetischen Energie. Typische Ursachen für eine solche Unterbrechung der Strömung sind schnell schließende Ventile/Schieber. Pumpen mit kleinem Massenträgheitsmoment des Rotors (Förderrad und Antrieb) können bei plötzlichem Anstieg der Förderleistung vorübergehend blockieren. Sie wirken dann wie ein abrupt betätigtes Absperrventil. Kommt es zum Abriss der Strömung am Austritt, entsteht ein Hohlraum (Skizzen rechts) mit Wasserdampf und gegebenenfalls Gas, das in der Flüssigkeit gelöst war. Kollabiert dieser Hohlraum bei Druckanstieg, gehen von den zusammenschlagenden Flüssigkeitssäulen **Druckstöße** aus. Dieser Vorgang wird auch als Makrokavitation (Kavitationsschlag, Dampfschlag) bezeichnet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Schocks liegt in Flüssigkeiten um 1000 m/s. Sie erreichen alle Bereiche des Systems und erzeugen auch an von der Entstehung entfernteren Stellen hohe Belastungen mit der Gefahr schwerer Schäden (Bild 5.2.4.3-3).

#### Druckstöße in Flüssigkeiten

# Die Folgen von Druckstößen in Rohrleitungssystemen können dramatisch und gefährlich sein.

#### Beispiele für Schäden an Rohrleitungen von Flüssigkeiten durch Druckstöße.

(Skizzen sind Bildern aus der Literatur nachempfunden)

# Durch Druckstöße aus den Halterungen einer Rohrbrücke gesprungenes Rohr.

#### Bild 5.2.4.3-3

Bild 5.2.4.3-3 (Lit 5.2.4-14 und Lit. 5.2.4-15): Gefährlich sind in erster Linie drei Effekte: - Der stoßartige Aufbau extrem hoher Drücke (richtungsunabhängig). Das führt zur Überlastung (Brücken, Rissen. bleibenden Verformungen) der Anlage bzw. deren Komponenten. Beim Bruch der Rohrleitung können Personen in der Nähe zu Schaden kommen.

- Die Drücke lösen entsprechend hohe **Kräfte** (gerichtet!) aus. Sie können zum Versagen von Halterungen und **Undichtigkeiten** an Verbindungen führen.

- **Periodische Druckstöße** besonders im Zusammenhang mit **Resonanzen** des Systems sind in der Lage Ermüdungsschäden (Kapitel 5.4) sowohl an Halterungen als auch an der Leitung selbst und den Einbauten auszulösen.

Druckstöße können sich in Rohrleitungen mit scheinbar 'harmlosen' Betriebsdaten entwickeln. Das gilt beispielsweise für Leitungslängen über 100 m mit Fördermengen unter 1 l/s. Resonanzen (Kapitel 5.2.4.4) in Form periodischer Druckstöße gefährden bereits kurze, frei verlegte Leitungen. Aufgabe des Konstrukteurs ist es die Systeme bei der Auslegung entsprechend den Regelwerken zu überprüfen. Zu berücksichtigen sind eine Vielzahl von Pa-



#### rametern (Bild 5.2.4.3-0).

Dazu stehen **Commputerprogramme** zur Verfügung. Sie berücksichtigen das Zusammenspiel der komplexen Einflüsse auf eine Druckstoßgefährdung. Dazu gehören gegebenenfalls Maßnahmen in der Gestaltung bzw. geeignete Einbauten vorzusehen (Bild 5.2.4.3-4 und Bild 5.2.4.3-5)

Die Skizzen zeigen nach Literaturangaben schematisch vereinfacht **Schäden** an frei verlegten größeren Rohrleitungen.

Von Druckstößen aus der **Halterung** einer Rohrbrücke in einer Chemieanlage gesprungene Leitung (links).

Über einem Ständer **abgeknicke** Druckleitung (600 mm Durchmesser, 12 mm Wandstärke).

## Druckstöße in Flüssigkeiten



**Bild 5.2.4.3-4** (Lit. 5.2.4-20): Um gefährliche Druckstöße zu verhindern gibt es unterschiedliche **Sicherungen**. Die Bilder zeigen Vorrichtungen die besonders in der Haustechnik zum Einsatz kommen. Größere Anlagen im industriellen Bereich (Anlagenbau) enthält Bild

#### 5.2.4.3-5.

Es handelt sich um sog. **Druckschlagdämpfer**. Sie beruhen meist auf dem Prinzip die kinetische Energie des Druckstoßes in Verformung und Dämpfung umzusetzen. Die Systeme mit einer Gasblase ("A" und "B") nutzen als sog. Dämpfungskörper eine gasgefüllte Blase aus einem Elastomer. Diese kann über ein Ventil gefüllt werden. Als Gas dient gewöhnlich Luft oder Stickstoff. Die Kompression der Blase ermöglicht bei Druckänderung in der Strömung das Ein- und Ausströmen der Flüssigkeit aus der zu sichernden Rohrleitung. Dabei wird Bewegungsenergie aufgezehrt. Vorteile dieses Konstruktionsprinzips sind

- Einfache Anpassung der Eigenschaften an die Betriebsvorgaben. Das erfolgt über ein Ventil. Mit ihm lässt sich der Gasdruck entsprechend der Auslegung einstellen.
- Dämpfer und Strömungsflüssigkeit sind getrennt.
- Die Blase reagiert nahezu trägheits- und reibungsfrei.
- Problemlose Montage, minimale Wartung.

Im Fall des Hochdruckdämpfers ("A") öffnet ein Ventil bei Überschreiten eines eingestellten Drucks in der angeschlossenen Leitung. Der 'behinderte' Durchtrittsquerschnitt und die Strömungsumlenkung dürften zu Wirbelbildung und Energieverzehr (Dämpfung) beitragen. Dieses System wird auch als **Pulsationsdämpfer** genutzt. Damit werden **Schall** und **Vibrationen** von Leitungen mit einem pulsierenden Flüssigkeitsstrom, z.B. von Kolben- und Membranpumpen, minimiert.

Niederdruckdämpfer ("**B**") sind lediglich mit einem **Lochblech**/Siebblech von der Rohrströmung getrennt. Dieses dient in erster Linie als Schutz vor einer Überdehnung und Beschädigung der Blase bei Druckabfall. Es liegt nahe, dass das Lochblech beim Durchströmung als Folge des Durchgangswiderstands (Wirbelbildung) dämpfend wirkt.

Der 'Geräusch- und Druckschlagdämpfer' in Skizze "C" (Lit. 5.2.45-21) nutzt einen geschlossenporigen ringförmigen Elastomereinsatz als Dämpfungselement. Bei Druckanstieg im Wasserstrom verkleinert sich das Volumen dieser Dämpferpatrone. Ein Druckab-

## Äußere Einflüsse

#### Druckstöße in Flüssigkeiten

fall führt wieder zurAusdenhnung. Die elastische Volumenveränderung und glechzeitig ein Dämpfungseffkt durch die innere Reibung des Elastomers lassen sich nutzen. Die geringe Größe dieses Dämpfers macht ihn für die Haustechnik geeignet. Auch ein nachträglicher Einbau ist möglich. Das lässt sich bei Problemen im Zusammenhang mit Mischern und Hähnen die Keramikscheiben verwenden (Bild 5.2.4.4-1), problematischen Magnetventilen (z.B. Waschmaschinen) und schwingenden Druckminderern nutzen.

Die in "D" skizzierte Vorrichtung (Lit. 5.2.4-22) verwendet einen in Längsachse federnd verschieblichen **Kegel als Drosselventil**. Die Verschiebung wird von einer kommunizierenden Verbindung mit Ein - und Austritt bestimmt. Bei überschreiten eines voreingestellten Eintrittsdrucks der Strömung öffnet das Ventil und **stellt sich selbstständig ein**. So erhöht sich der Austrittsdruck nur langsam und unzulässige Druckschläge werden vermieden.

## Druckstöße in Flüssigkeiten



**Bild 5.2.4.3-5** (Lit 5.2.4-14): In **Industrie-Anwendungen** kommen auch **aktive Anlagen** zum Einsatz. Sie sollen bereits die Entstehung eines gefährlichen Druckstosses verhindern. Dazu gehören:

- Nachsauge- und Belüftungseinrichtungen.
- Optimierte Armaturen und Steuerungen.

Druckstöße in Flüssigkeiten

#### 5.2.4.4 Strömungsbedingte Resonanzen von Rohrleitungen.

Schwingungen bzw. **periodische Druckstöße** können Rohrleitungen zu **Resonanzschwingungen** anregen. Solche Anregungen entstehen in der strömenden Flüssigkeit durch **Ablösungserscheinungen**. An **Armaturen** (z.B. Ventilen und 'Hähnen', Bild 5.2.4.4-1) oder **Krümmern** bilden sich periodisch ablösende Wirbel (Kámánsche Wirbelstrasse, Bild 3-9.3). Diese wirken hemmend, d.h. pulsierend auf die Strömung. Resonanzschwingungen können insbesondere örtliche **Befestigungen** frei verlegter Rohrleitungen dynamisch überlasten (**Schwingermüdung**, Kapitel 5.4)

Das Problem ist als **Geräusch** in Haushalts-Wasserleitungn weit verbreitet und durchaus ärgerlich. Es handelt sich nicht nur um knallartige Druckstöße mit einem fühlbaren Stoß beim schnellen Schließen eines Hahns. Besonders lästig ist eine andauernde Geräuschentwicklung während der Hahn geöffnet ist. Im Internt werden viele solche Fälle beschrieben. Um so verwunderlicher ist, dass man saubere, verständliche **Erklärungen dieses Mechanismus vermisst**. Sie wären eine Voraussetzung für die Ursachenermittlung und gezielte Abhilfen, seien sie vorbeugend oder nachträglich.

Bild 5.2.4.4-1 (Lit 5.2.4-14): Geräusche und Druckstöße ("Schläge"), insbesondere in der Haustechnik, sind zumindest lästig. Schläge (Wasseschlag) können auch gravierende Schäden am Rohrleitungssystem hervorrufen. Dazu gehören Leckagen durch Dichtungsversagen, Risse und Bruch der Leitung, ihrer Befestigungen und Einbauten (z.B. Armaturen).

Die Ausbildung der Druckstöße hängt von mehreren Einflüssen ab. Dazu gehören in erster Linie:

- Schließgeschwindigkeit des Absperrorgans. Schnell schließende, moderne Hähne und Mischbatterien mit Keramikscheiben dürften besondes leicht Druckstöße auslösen.

- Abzubremsende Masse der Flüssigkeitssäule (Leitungslänge).
- Elastizität des Systems.
- Strömungsgeschwindigkeit als impulsbestimmend.

Geräusche entstehen durch Wirbel und Kavitation in Unterdruckzonen der Strömung. Es bilden sich kleine Dampfblasen die in Zonen wieder ausreichend angestiegenen Drucks implodieren.

Treten Druckstöße in schneller periodischer

**Folge** auf, kann die Leitung und/oder deren Einbauten zu **Resonanzschwingungen** angeregt werden. Sie sind nicht nur lästig sondern können auch zu Schäden führen. So entstehen im Extremfall Gewaltbrüche (Kapitel 5.2.1) oder eine Kurzzeitüberlastung innerhalb weniger Lastwechsel (LCF, Kapitel 5.4.1). Gefährdet sind **Halterungen**, Verbindungen, Armaturen und Sicherungseinrichtungen. Druckstöße können auch **Regler** 'verwirren'. Treten merkliche Resonanzen häufiger auf, sind ausgeprägte Schwingbrüche/-risse (HCF, Kapitel 5.4.3) mit kostspieligen Folgeschäden (Wasserschäden) zu erwarten.

Es stellt sich zunächst die Frage nach dem **Mechanismus solcher Schwingungen**. Dazu sind verschiedene **Modelle** denkbar.

Schwingungen einer Absperrkomponente (Skizze links): Gerät beispielsweise ein Ventil so in Schwigungen, dass der Ventilkegel bzw. die Dichtung auf den Sitz schlägt und zurückspringt, wird der Flüssigkeitsstrom sehr schnell periodisch unterbrochen. Das verzögert und beschleunigt die Flüssigkeitssäule mit entsprechenden Druckstößen. Die Schwingungen von Ventil und Flüssigkeit können sich gegenseitig verstärken (Lit. 5.2.4-25). Sie sind in der Lage bei Übereinstimmung mit der Eigenfrequenz

Druckstöße in Flüssigkeiten

Geräusche und "Schläge" in flüssigkeitsdurchströmten Rohrleitungen, insbesondere von Wasserleitungen in Gebäuden, sind ein häufiges Ärgernis und können gefährlich sein.



derHardware das Rohrleitungssystem oder Bereiche davon in gefährliche Resonanzschwingungen bringen. Zunächst verwundert, dass diese Bedingungen offenbar recht häufig vorliegen. Der Grund dürfte darin liegen, dass Druck- und Kraftstöße das System verändern (elastische Verformungen, Strömungsablösungen) und so eine **Rückkopplung** erfolgt. Damit ist eine Selbstverstärkung in der Resonanz zu erwarten. Die Schwingfrequenz bleibt dabei weitgehend konstant. Eine weitere An-

#### regungsmöglichkeit ist eine

**Periodische Ablösungen der Strömung** hinter Ventilen (Skizze rechts) und/oder an Umleitungen und Hindernissen in den Leitungen. Das gilt besonders für die gewöhnlich strömungsungünstig geformte Durchtrittsöffnung. Hier kann es zu **periodischer Wirbelablösung** (Kámánsche Wirbelstrasse?) kommen. Geht diese Wirbelbildung mit einem deutlich erhöhten periodischen Durchtrittswiderstand einher, sind Effekte wie bei schwingenden Ventilen

Druckstöße in Flüssigkeiten

denkbar. Ein solcher Mechanismus könnte auch, abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit **Frequenzänderungen** während des Vorgangs erklären. Von der Wirbelbildung sind eher lästige Geräusche als Schäden zu erwarten.

## Literatur zu Kapitel 5.2.4

- 5.2.4-1 "Wasserschlag", de.wikipedia.org, August 2010, Seite 1 und 2.
- 5.2.4-2 "Druckstoß (Wasserhammer)", mikal-can.de, Vorlesung MVT, Seite 1-4.
- 5.2.4-3 "Dampfschlag", de.wikipedia.org, Mai 2009, Seite 1 und 2.
- **5.2.4-4** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 3", www.turboconsult.de, ISBN 3-00-017733-7, 2003, Seite 11.2.1.1-41 bis 11.2.1.1-44. und Kapitel 14
- 5.2.4-5 L.C. Young, W.D. Beaulieu, "Review of Hammershock Pressures in Aircraft Inlets", Zeitschrift "Journal of Aircraft" Vol 12, No. 4, April, 1975, Seite 210-216."Kavitation an Zylinderlaufbuchsen", F. Mahle, www.cn.mahle.com, 2/2007, Seite 1-3.
- **5.2.4-5** E.Greuter, "Motorschäden Schäden an Verbrennungsmotoren und deren Ursachen", Vogel Buchverlag, 1. Auflage 1994, ISBN 3-8023-1515-4, Seite 242.
- **5.2.4-6** G.Vouros, "Begutachtung von Maschinenschäden aus der Sicht eines Konstruktions-, Betriebs- und Service-Ingenieurs",Books on Demand GmbH, 1. Auflage 2001, ISBN 3-8311-1475-7, Seite 77 81, 405-407.
- **5.2.4-7** "Handbuch der Schadensverhütung", Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1972, 1972, Bestell-Nr. TV fb 6, Seite 146, 156, 157, 176, 203
- 5.2.4-8 E.J.Pohl, R.Bark, "Wege zur Schadensverhütung im Maschinenbau", Seite 180 und 194.
- **5.2.4-9** O.Weiss, "Physikalische Grundlagen der extrakorporalen Stoßwellentherapie", Zeitschrift: Mineralstoffwechsel, 2004, 11 (4), Seite 7-18.
- **5.2.4-10** 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.
- **5.2.4-11** Accident Report, "Accident on 25 July 2000 at La Patte d'Oie in Bonesse (95) to the Concorde registered F-BTSC operated by Air France", BEA, Report translation f-sc000725a, Seiten 109-115.

## Druckstöße in Flüssigkeiten

- **5.2.4-12** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 1", www.turboconsult.de, ISBN 3-00-005842-7, 2003, Seite 5.2.2.2-3 und 5.2.2.2-4.
- **5.2.4-13** B.Bosy "Wasserschlag Dampfschlag, die Geschichte der Heizungstechnik", www.bosyonline.de, Stand Februar 2011, Seite 1-4.
- **5.2.4-14** "Der Druckstoß", KSB-Know-How, Band 1, Fa. KSB AG, www.ksb.de, Stand Februar 2011, Seite 1-30.
- **5.2.4-15** A.Apostolidis, A.Dudlik, "Druckstöße und Kavitationsschläge in Rohrleitungs-Systemen: Entstehung, Berechnung und Gefahrenabschätzung für die betriebliche Praxis", www: rohrleitungstechnologie.de, Seite 1-6.
- **5.2.4-16** "Joukowski-Stoß kann Abgasanlagen beschädigen", www.gradimo.hr, 18.04.20101, Seite 1-3.
- 5.2.4-17 "Suzuki GR 650 Tempter", http://de.wikipedia.org, Stand Sept. 2010, Seite 1-3.
- 5.2.4-18 A.Dudlik, S.Schlüter, H.Fahlenkamp, J.Alt, "Methoden zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitationsschlägen in Rohrleitungssystemen", Proceeding des "Technisch-Wissenschaftlicher Kongress Rohrbau", 9.2000 Weimar, www.fitr.de, Seite 98 - 104.
- 5.2.4-19 "Druckstoß", http://de.wikipedia.org, Stand Januar 2011, Seite 1-4.
- **5.2.4-20** "Druckschalldämpfer", Produktinformationen der Firma "Olaer AG", www.olaer.ch, Stand Februar 2011
- **5.2.4-21** J.Egli, "Pressure Damper and Silencer, in Particular for Connections of Sanitary Fittings", Patentschrift PCT/EP 2003/00902 vom 06.09.2003.
- **5.2.4-22** R.Seitz, "Device for Supplying a Liquid Under Pressure in a Consumer Unit", Patentschrift PCT/CH 2001/000284 vom 09.05.2001.
- **5.2.4-23** J.Baumann, "Einspritzmengenkorrektur in Common-Rail-Systemen mit Hilfe magnetoelastischer Drucksensoren", Dissertation, Universität Karlsruhe, 2006, ISBN-13: 978-3-86644-064-7,
- 5.2.4-24 G.Class, "Untersuchung der bei der Damfkondensation im Druckabbausystem von Siedewasserreaktoren entstehenden Wandbelastungen", Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Projekt KfK 2549, März 1978.
- **5.2.4-25** K.Habr, "Gekoppelte Simulation Hydraulischer Gesamtsysteme unter Einbeziehung von CF", Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2002, Seite 1



**Bild 5.2.5-1** (Lit 5.2.5-7 und Lit. 5.2.5-8): Bei Überschreiten der Schallgeschwindigkeit (Machzahl = Strömungsgeschwindigkeit/ Schallgeschwindigkeit >1) entstehen um das Flugzeug sog. Mach'sche Kegel. Es handelt sich um kegelige Stoßwellen (unten). Sie sind mit Hilfe der Schlierenoptik visualisiert. Dies macht lokale Inhomogenitäten (Dichte infolge Druck oder Temperaturunterschieden) in der Luft bzw. einer Gasströmung durch Änderung des Brechungsindex auch bei Unterschallvorgängen erkennbar (Lit. 5.2.5-10). Die Schattenoptik nutzt temperaturbedingte optische Änderungen des Durchstrahlungsver-

## Gasschock

haltens (z.B. Flimmern heißer Luft). Dahinter tritt eine Unterdruckzone auf. In dieser kommt es zur Abkühlung. Kondensiert hier feuchte Luft kommt es zum 'Wolkenscheibeneffekt' (oben). Man findet Stoßwellen auch um Geschosse und Raketen, bei Explosionen und in Turbomaschinen, insbesondere in modernen Verdichtern mit Überschallströmung. In diesem Fall beeinflussen diese Schockwellen das Betriebsverhalten und können benachbarte Schaufeln zu Schwingungen anregen.

Überschallströmungen können aus einer geeignet geformten Düse, der sog. Lavaldüse strömen (Lit. 5.2.5-9). Benötigt wird z.B. eine solche Düse, will man eine Überschall-Austrittsgeschwindigkeit erreichen. Ein Beispiel sind sog. Druckluftkanonen für Vogelschlagversuche an militärischen Triebwerken. Bild 5.2.5-2 (Lit 5.2.5-3 und Lit. 5.2.5-6): Stoßwellen von Überschallströmungen lassen sich auch als intensive Schallwellen betrachten. Sie können Ermüdungsschäden an benachbarten Strukturen auslösen (Bild 3-10). Man spricht bei solchen Schäden auch von Schallermüdung. Neben der direkten Belastung durch die Stoßwellen (engl.shock noise) wirken zwei weitere Effekte (Skizze oben). Das Mischungsgeräusch des Strahls und die Abstrahlung der Schockwelle (engl. Mach wave radiation). Diese Gefahr der Materialermüdung besteht besonders im Bereich der Abgasstrahlen militärischer Flugtriebwerke mit Nachbrenner (Skizze oben).

Die Skizze unten zeigt die Verhältnisse um einen Abgasstrahl im **Unterschallbereich** (Lit. 5.2.5-4). Obwohl in diesem Fall keine überschallbedingten Stoßwellen vorhanden sind, besteht auch hier Ermüdungsgefahr für benachbarte Teile der Flugzeugzelle. Man unterscheidet drei belastungsrelevante Bereiche:

- Hydrodynamisch wirksames Druckfeld,
- hydrodynamisch und akustisch wirksames Nahfeld sowie ein
- akustisch wirksames Fernfeld.

#### Schwingungsanregung durch Druckfluktuationen in einem Gasstrahl (Lit. 5.2.5-4).

Längskräfte werden von der Gasreibung übertragen. Hier spielt die Turbulenz in Wandnähe bzw. dem Übergang zur Umgebungsluft, dem **Mischbereich**, eine wichtige Rolle. Dieser Einfluss dominiert das **hydrodynamisch wirksame Druckfeld um den Strahl und das Nah**feld.

Eine Geschwindigkeitsänderung ist entsprechend dem Gesetz von Bernoulli auch mit einer Druckänderung verbunden (hydrodynamischer Bereich). Schnelle Druckschwankungen führen so zur **Schallabstrahlung**.

Die Schallabstrahlung im Nah- und Fernfeld ist deutlich **weniger energiereich** (ca. 1/100) als die hydrodynamische des Nahfelds Auch bei Einwirkung von Stoßwellen einer Überschallströmung besteht Ermüdungsgefahr. Das gilt besonders bei heißen Strukturen unter thermo-akustischer Belastung.



Gasschock

#### Joukowski-Stoß in Leitungen von Gasen

#### Hammerschock

Ein dem Wasserhammer ähnliches Phänomen tritt auch **in einem schnellen Luftstrom** auf. Es handelt sich um einen Joukowski-Stoß (Kapitel 5.2.4.3) in einer Gasströmung. Wird dieser abrupt gestoppt, kommt es zu einer gegenläufigen Schockwelle, die Einbauten in der Leitung zerstören kann. Das Bild 5.2.5-3 zeigt den Einlauf eines Flugtriebwerks

Bild 5.2.5-3 (Lit. 5.2.5-1, Lit 5.2.5-4 und Lit. 5.2.5-5): Wird eine Strömung in einem Kanal schnell abgebremst, setzt dies die kinetische Energie in einen Druckimpuls um. Diesen Effekt kennt man von Wasserleitungen (Wasserschlag, engl. Waterhammer, Skizze links). Im Extremfall kommt es zu schweren Schäden an Druckleitungen und Armaturen. Ein vergleichbarer Effekt tritt auch in einem Kanal mit einer Luftströmung, z.B. dem Einlaufkanal eines Kampfflugzeugtriebwerks, auf. Das Pumpen eines Triebwerks kann den Einlaufkanal wie ein Ventil schnell ganz oder teilweise verschließen (Skizze unten). Die Störung läuft dann vom Triebwerkseintritt zum Kanaleintritt gegen die Strömung nach vorne. Dabei steigt der Druck in wenigen zehntel Sekunden in der jeweiligen Kanalposition an (Skizze oben). Ein intensiver Strömungsabriss in einem Triebwerk ("hard engine stall") kann im Einlaufkanal einen schockartigen Druckanstieg (engl. Hammershock) auslösen. So kann Verdichterpumpen nicht nur im Triebwerk selbst Schäden verursachen. Gefährdet ist auch die Peripherie des Triebwerks. Bekannt ist das Lockern von Nieten und Blechen, insbesondere der Stifte von Popnieten an Prototypenaufbauten. Dies kann umfangreiche Fremdkörperschäden im Triebwerk auslösen.

Diese zerstörerisch starken Druckimpulse diktieren die Struktur und Festigkeitsauslegung des Einlaufkanals moderner Kampfflugzeuge. Hier sind besonders die verstellbaren Rampen und die Dichtungen der Klappen gefährdet (Lit. 5.2.5-1).

Stärke und Dauer des Pumpimpulses bedingt die Härte des **Hammerschocks** und hängt von verschiedenen Einflüssen ab:

- Art bzw. Auslösemechanismus des Verdichterpumpens. Von Einfluss ist, ob der Stall im Spitzenbereich des Fan oder im Nabenbereich vorliegt. Von Bedeutung ist, ob der Stall zuerst im Verdichter auftrat und sich auf den Fan ausdehnte und ob vom Strömungsabriss nur ein Segment am Umfang des Fan betroffen ist.

- Machzahl am Triebwerkseinlass.

- Gesamtdruckverhältnis.

- **Bypassverhältnis**, die Belastung von Fantriebwerken ist geringer als die reiner Einkreiser. Trotzdem sind auch Schäden von Fantriebwerken bekannt geworden.

- Trennspalt zwischen Fan und Verdichter bzw. Splitter. Je größer der Spalt bzw. die Eintrittsfläche in den Verdichter, umso unempfindlicher ist der Fan gegen Einflüsse von Strömungsstörungen aus dem Einlauf und dem Verdichter. Ein Teil eines Pumpstoßes aus dem Verdichter kann leichter in den Bypass austreten und damit die Impulsintensität am Fan, die den Hammerschock auslöst und dessen Höhe bestimmt, verringern.

Gasschock



Gasschock

Äußere Einflüsse

#### Joukowsky-Stoß in Abgasleitungen/Schornsteinen.

Gefährliche Joukowski-Druckstöße in Leitungsströmungen kennt man in erster Linie bei Flüssigkeiten (Kapitel 5.2.4.3). Sie treten jedoch auch in Gasströmungen auf, wo man es zunächst nicht erwarten würde. Dazu gehören neben Ansaugleitungen von Verdichtern (Bild 5.2.5-3) auch Abgasleitungen.



Bild 5.2.5-4 (Lit. 5.2.5-11): Auch in Abgasanlagen wie von Heizungen (größere Anlagen) können gefährliche Druckstöße entstehen. Sie sind die Folge eines Joukowsky-Stoßes den man in erster Linie von Flüssigkeiten kennt (Seite 5.2.4-9). Es handelt sich um eine plötzliche Druckänderung bei Änderung der Strömungsgeschwindigkeit.

Schadenswirksam ist bei den dünnwandigen Abgasleitungen (Wandstärke ca. 0,5 mm, Durchmesser > 300 mm) ein Druckabfall. Die Leitung kann dadurch kollabieren (Skizze rechts).

Ein gefährlicher Druckabfall entsteht bei einem **Strömungsabriss** hinter dem die abfließende Strömung intensiv 'nachsaugt'. Das gilt auch für einen primären, stoßartigen Druckanstieg der einen Strömungsabriss und Unterdruck zur Folge hat (vergleiche Bild 5.2.4.3-2).

Für einen merklichen Effekt ist ausreichend schnelles Abbremsen der Strömungsgeschwindigkeit erforderlich. Die Ursachen können in der Luftzufuhr (schnelles Schließen der Zu-

# Äußere Einflüsse Gasschock

luftklappe), dem Brenner (plötzliches Abschalten, z.B. Stromausfall) und einer Verpuffung im Abgasbereich liegen.

Konstruktive Abhilfe bietet eine sog. Nebenluftvorrichtung (DIN 4795). Sie sorgt für einen trägheitsarmen Druckausgleich und kommt bei Großanlagen zum Einsatz. Damit werden Folgeschäden an Einbauten im Abgasstrom und dem Kessel vermieden. Gasschock

# Literatur zu Kapitel 5.2.5

- **5.2.5-1** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 3",www.turboconsult.de, ISBN 3-00-017733-7, 2003, Seite 11.2.1.1-41 bis 11.2.1.1-44.
- **5.2.5-2** L.C. Young, W.D. Beaulieu, "Review of Hammershock Pressures in Aircraft Inlets", Zeitschrift "Journal of Aircraft" Vol 12, No. 4, April, 1975, Seite 210-216."Kavitation an Zylinderlaufbuchsen", F. Mahle, www.cn.mahle.com, 2/2007, Seite 1-3.
- **5.2.5-3** M.Harper-Bourne, "Predicting the Jet Near-Field Noise of Combat Aircraft", Paper des RTOAVT Symposiums "Aging Mechanisms and Control: Paper A Developments in Computational Aero- and Hydro-Acoustics", Manchester, UK, 8-11 October 2001, Paper RTO-MP-079(1), Seite 12-1 bis 12-15.
- **5.2.5-4** E.J.Richards, "An Introduction to Acoustic Fatigue", University of Southampton, England, Seite 1-55.
- **5.2.5-5** "Impact of Acoustic Loads on Aircraft Structures", AGARD-CP-549, Proceedings mehrerer Autoren, ISBN 92-836-0001-0, Konferenz in Lillehammer, Norway, May 1994, insgesamt 282 Seiten.
- **5.2.5-6** H.H.Hubbard, P.M.Edge, C.T.Modlin, wahrscheinlich Proceeding-Paper einer Konferenz zum Thema "Enginering Experience and Relative Importance of Various Parameters on Acoustical Fatigue", "Design Considerations for Minimizing Acoustic Fatigue", ca. 1960, Seite 320-338.
- 5.2.5-7 "Überschallgeschwindigkeit", de.wikipedia.org, 23. Oktober 2009, Seite 1-4.
- 5.2.5-8 "Überschallflug", de.wikipedia.org, 16.Januar 2010, Seite 1-5.
- **5.2.5-9** J.Dörr, J.Schumann-Bischoff, "Aufbau einer Schlierenoptik und Anwendung an einem Überschallfreistrahl", Strömungsmechanisches Praktikum des Deutschen Zentrums für Luftund Raumfahrt, Georg-August-Universität Göttingen, 19.08.2008, Seiten 1-10.
- **5.2.5-10** L.Mardorf, A.Garcia, "Schlierenoptische Visualisierung der Gemischaufbereitung und Zündung von Heizölbrennern", www.mb.fh-osnabrueck.de, 2000, Seiten 1-8.
- **5.2.5-11** "Gefahr für Abgasanlagen: Der Joukowski-Stoß", Zeitschrift "Schornsteinfeger", Februar 2010, Seiten Seite 20 und 21.

## **5.3 Temperatur- und Umgebungseinflüsse**



Die **Problematik der Definition schadensursächlicher Temperaturen** wird in Lit. 5.3-1 wie folgt dargestellt:

"In vielen Fällen ist es nicht einfach, eine qualitative oder quantitative Aussage zur Schadensursächlichkeit der thermischen Beanspruchungen zu machen, weil eine große Zahl zum Schaden beitragender Einflüsse vorliegt (Bild 5.3-1). Bereits der Begriff der 'thermischen Beanspruchung' erweist sich bei näherer Betrachtung als problematisch. Da ist zunächst die Frage, ab welcher Temperatur die thermisch schädigende Beanspruchung beginnt. In den seltensten Fällen liegt darüber hinaus die Bauteiltemperatur als alleinige Beanspruchung vor, so wie etwa bei einer unzulässigen Gefügeveränderung auf Grund einer Übertemperatur. Gewöhnlich treten an einem Heißteil untrennbar von der Temperatureinwirkung behinderte Wärmedehnungen auf, die zu entsprechenden mechanischen Spannungen führen. Eine Menge, in ihrem Ursprung nicht temperaturabhängiger Einflüsse (Bild 3.2-2) wie mechanische Belastungen, chemischer Angriff und metallurgische Vorgänge, können zwar in vielen Fällen unter Temperatur schadenswirksam werden (Bild 5.3-2), sollen jedoch gesondert behandelt werden. Nicht immer ist es notwendig, dass die Temperatur zulässige Werte übersteigt. So ist die Temperatur also oft nicht selbst als Schadensursache zu bezeichnen, der Schaden in diesem Sinn nicht ihre Folge.

In den weiteren Betrachtungen werden unter 'Schäden als Folge thermischer Beanspruchung' solche verstanden, die ohne den Einfluss von Temperaturen, die deutlich oberhalb der Raumtemperatur liegen (>600°C), nicht aufgetreten wären."

Schadensursächliche Umgebungseinflüsse sind, neben einer Temperatur welche die Bauteiltemperatur bestimmt, besonders die Umgebungsatmosphäre sowie bei Kunststoffen (Kapitel 5.3.1.1) die Witterung, als Kombination klimatischer Umwelteinflüsse. Im Vordergrund steht Korrosion (Kapitel 5.6), sie ist aber bei weitem nicht alleine. Eine wichtige Rolle spielt elektromagnetische Strahlung als Licht (UV-Strahlung) und in Form von Gamma- und Röntgenstrahlung. Auch Korpuskularstrahlung wie Elektronen/Betastrahlung und Neutronenstrahlung. Letztere beeinflusst auch Eigenschaften von Metallen (Versprödung).Solche Strahlen sind in der Kerntechnik, bei Fusionsprozessen (Fusionsreaktor) und Geräten im Weltraum (Höhenstrahlung) zu berücksichtigen. Weitere Wirkungen haben biologische Prozesse und diffundierende Medien. Aber auch bei scheinbar unempfindlichen Werkstoffen wie Keramiken und Gläsern ist mit Überraschungen wie verzögerter Rissbildung und Korrosion zu rechnen.

Bild 5.3-1.1: Werkstoffeigenschaften reagieren auf Temperaturänderung und haben so einen bedeutenden Einfluss auf Schadensmechanismen. Neben der Festigkeit sind nahezu alle auslegungsrelevanten Werkstoffeigenschaften betroffen (Lit 5.3-7). Änderungen stehen meist weder in linearem Zusammenhang mit der Temperatur, noch gehen sie immer in dieselbe Richtung. Damit nimmt die Komplexität der Bauteil-Dimensionierung und -Auslegung gewaltig zu. Im Folgenden werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einige Effekte aufgezeigt.

"D", statische Festigkeit ist zeit- und temperaturabhängig. Die Festigkeitsabnahme beschleunigt sich mit dem Temperaturanstieg (Bild 5.3.2-4). Dieses Verhalten wird zusätzlich davon beeinflusst, dass unter Belastung Veränderungen im Werkstoff auftreten. Zu nennen sind beispielsweise Porenbildung (Bild 5.3.2-6), Veränderung der Aushärtungsphase oder die Bildung spröder Phasen (Bild 5.3-3 und Bild 5.3-4). Effekte, wie die Orientierung der Korngrenzen und die Korngröße, beeinflussen Lage und Häufigkeit belastungsspezifischer Schwachstellen und bedürfen besonderer Beachtung.

Bruchdehnung: Üblicherweise steigt im Warmzerreißversuch (Kurzzeit) die Bruchdehnung mit der Temperatur. Einige Ni-Basis Legierungen zeigen jedoch im Temperaturbereich um 600°C ein mehr oder weniger ausgeprägtes Minimum (Lit.5.3-10). Danach kann die plastische Verformbarkeit exponentiell ansteigen (unten rechts). Unter sehr hohen Temperaturen, die bereits zum Erweichen des Werkstoffs führen (Solidustemperatur), beobachtet man, dass sich ein bis dahin zäher Werkstoff plötzlich äußerst spröd verhält. Natürlich macht sich dieses Verhalten auch in der Kerbschlagzähigkeit bemerkbar. Diese ist im Containmentfall und bei Fremdkörpereinwirkung (FOD) für das Bauteilverhalten von Bedeutung.

Dehnungsverhalten bei Langzeitbeanspruchung: Die Kriechdehnung ist temperatur- und belastungsabhängig. Üblicherweise steigt die Kriechdehnung bis zum Bruch mit der Belastung (Bild 5.3.2-3 und Bild 5.3.2-4). Werden Verformungsparameter geeignet gewählt, lässt sich ein superplastisches Verhalten erzielen. Erholungsvorgänge im Werkstoff stehen dabei mit der dehnungsbedingten Schädigung im Gleichgewicht. Dieses Verhalten wird in der Umformtechnik genutzt.

"A", Elastizität: Der E-Modul fällt üblicherweise mit steigender Temperatur in einer werkstoffspezifischen Kurve ab. Dies ist z.B. von erheblicher Bedeutung für die Schwingfrequenzen von Heiβteilen. Das muss zur Vermeidung von Resonanzen berücksichtigt werden. Der E-Modul ist bei erhöhter Temperatur gewöhnlich zeitunabhängig. Interessant ist eine Orientierungsabhängigkeit des E-Moduls (Bild 5.4.3.2-1, Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8). Er beeinflusst Wärmespannungen der einkristallinen Version von Ni-Basis-Legierungen für die Vermeidung von Resonanzen. Das macht sich im Thermowechselverhalten bemerkbar (Bild 5.4.2.1-7).

Verfestigung bei plastischer Verformung: Schmiedeprozesse nutzen neben dem Festigkeitsabfall und einer erhöhten plastischen Verformbarkeit den Abbau von Verfestigungen bei Temperatur. Umgekehrt kann mit gezielter thermomechanischer Behandlung die Festigkeit gesteigert werden. Dies ist auf schnellere Diffusionsprozesse bei Temperatur zurückzuführen.

Eigenspannungen und Verfestigungen: Kriechen (Relaxation, Kapitel 4.5) führt zur Veränderung und Induzierung von Eigenspannungen und Abbau von Verfestigungen. Sind erwünschte Druckeigenspannungen und Verfestigungen aus spanender Bearbeitung oder Kugelstrahlen betroffen, verschlechtert sich

Fortsetzung auf Seite 4



Probleme der Maschinenelemente

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Temperatur- und Umgebungseinflüsse

#### Fortsetzung von Seite 2

das Betriebsverhalten. So kann ein zu langes Betriebsintervall oberhalb einer werkstoffspezifischen Temperatur (Bild 5.3.2-1) bis zum erneuten regenerativen **Kugelstrahlen** Schwingbruch in durch Fretting beanspruchten Zonen einer Titanlegierung begünstigen. Kriechdehnungen können aber auch **Eigenspannungen** umlagern und/oder induzieren. Auf diesem Effekt beruht die Thermoermüdung (Kapitel 5.4.2). Erfolgt in einem begrenzten Bauteilbereich eine Kriechverformung (z.B. durch **Stauchen des heißen Bereichs** (Bild 5.3.2-10 und Bild 5.4.2.1-2), bauen sich dort nach dem Abkühlen **Zugeigenspannungen** auf.

Kerbverhalten: Sinkt die Kerbwirkung bei kriechbedingtem Spannungsabbau in der Kerbe, steigt die Schwingfestigkeit (LCF und HCF). Dies kann für gelten. Auch die Kerbschlagzähigkeit nimmt gewöhnlich mit der Temperatur zu. Von besonderer Bedeutung ist dieses Verhalten für Beschichtungen wie Diffusionsschichten und metallische Auflagschichten vom Typ MCrAlY. Diese zeigen, ähnlich Bauteilen aus intermetallischen Phasen, bis zu einigen hundert °C ein sprödes Verhalten. Erst dann werden sie befriedigend duktil. Bei niedrigen Betriebstemperaturen (Anfahren und Abstellen) besteht Rissempfindlichkeit. Das beeinflusst das Thermoermüdungsverhalten negativ. Hohe Betriebstemperaturen führen dagegen zu Kriechdehnungen in der Schicht, die eine "Runzelbildung" auslösen. Bei sehr hohen Temperaturen im Solidusbereich kann es wegen innerer Anschmelzungen wieder zu einem deutlichen Abfall der Kerbschlagzähigkeit kommen.

Gefüge: Gefüge können sich bei erhöhten Temperaturen verändern, beispielsweise durch Kornwachstum. Im Bereich plastischer Verformungen kommt es bei sehr hohen Temperaturen bis zur Rekristallisation mit der Bildung neuer Körner. Wird die Lösungsglühtemperatur einer Aushärtungsphase überschritten, erleidet der Werkstoff einen bleibenden Festigkeitsabfall. Folgt eine längere Betriebszeit, kann sich diese Phase wieder ausscheiden. Abhängig von der Haupt-**Belastungsrichtung** kann sich eine **Phase ausrichten** (z.B. Floßbildung). Die Ausscheidung spröder Phasen (z.B. Sigma-Phase, Laves-Phase) über längere Zeit beeinflusst die **Zähigkeit** und damit z.B. das FOD-Verhalten.

Diffusionsschichten erfahren unter Temperatureinwirkung Veränderungen. Sie zeigen **Porenbildung** (Kirkendalleffekt) oder eine veränderte Verteilung von Legierungsbestandteilen (Verarmung, Anreicherung, Bild 5.3-3).

Riss- und Kerbschlagzähigkeit, bruchmechanisches Verhalten: Beide Kennwerte zeigen üblicherweise mit steigender Temperatur einen charakteristischen Steilanstieg (Bild 5.4.4-5). Dieser liegt bei der Risszähigkeit jedoch bei einer niedrigeren Temperatur als die Kerbschlagzähigkeit. Dies beeinflusst auch Eigenschaften wie die wachstumsfähige Fehlergröße oder den Rissfortschritt unter zyklischer Belastung.

"B", Wärmedehnung: Der Wärmedehnungskoeffizient steigt gewöhnlich mit der Temperatur linear an. Die Wärmedehnung ist von großer Bedeutung für die Spalthaltung im Bereich von Dichtungen (Labyrinthe) von Strömungsmaschinen. Nickellegierungen haben eine größere Wärmedehnung als Titanlegierungen. Dies erschwert den Übergang von Titan- zu Ni-Legierungen gefügter Bauteile (Gehäusen, Rotoren in Turbomaschinen). Aus diesem Grund wird z.B. eine Ausgleichsscheibe aus einem Stahl mit geeigneter Wärmedehnung (13%-Cr Stahl) zwischen Ni- und Ti-Scheiben eingefügt. An dieser Stahlscheibe können im Betrieb Korrosionsprobleme auftreten.

**Passungen und Verschraubungen**, die sich bei Temperatur nicht lockern, erfordern **abgestimmte Wärmedehnung** über den gesamten Betriebs-/Temperaturbereich. Die Wärmedehnung beeinflusst natürlich auch das Thermo-

ermüdungsverhalten. Ein hoher Wärmedehnungskoeffizient dürfte dabei schwer zu beherrschen sein. Besonders bei keramischen Wärmedämmschichten ist die Wärmedehnung gegenüber dem metallischen Grundmaterial entscheidend (Bild 5.4.2.2-5 und Bild 5.6.1.4.2-5).

"C", Wärmeleitfähigkeit: Die Wärmeleitfähigkeit ist entscheidend für das Aufheiz- und Abkühlverhalten der Bauteile. Davon hängt besonders bei gekühlten Heißteilen die Materialtemperatur ab. Das gilt auch für dehnungsbestimmte Spalthaltung. Sie ist für Anstreifvorgänge und eine damit verbundene Bauteilschädigung verantwortlich (Bild 4.4-15, Bild 5.3-5 und Bild 5.3-6). Es gibt Werkstoffe wie Aluminium und Magnesium deren Wärmeleitfähigkeit für einsatzrelevante Temperaturen nahezu temperaturunabhängig ist. Dagegen zeigen Ni-Basis-Legierungen und Titan-Legierungen einen deutlichen Anstieg

der Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur. Das gilt auch für hochlegierte Stähle vom Typ 13% Cr-Stähle und 18/8 CrNi-Stähle bis 500 °C.

Niedrig legierte Stähle lassen einen deutlichen Abfall der Wärmeleitfähigkeit bis zu Temperaturen um 500°C erkennen.



**Bild 5.3-1.2** (Lit. 5.3-17): Werkstoffe können temperaturabhängig ihre Zähigkeit vorübergehend oder bleibend verändern.

Einfluss erhöhter Betriebstemperatur: Bei einem 'empfindlichen' Werkstoff (z.B. CrMoV-Stähle) ist eine bleibende Versprödung möglich. Sie entwickelt sich bei der Herstellung oder im Betrieb als Folge einer Gefügeveränderung. Eine Auswirkung auf die Kerbschlagzähigkeit ist gegeben. In diesem Zusammenhang spricht man von Effekten wie - Anlassversprödung bei 475-575 °C an Cr-,

Mn-, CrNi- oder NiMn-Stählen.

- Alterungssprödigkeit (Reckalterung) von Kohlenstoffstählen mit ungünstigem Gefüge entsteht in Minuten und wird von Temperaturen zwischen 100°C und 300°C unterstützt.

- Warmversprödung beobachtet man an Stählen bei Langzeit-Gefügeveränderungen unter niedriger Belastung, besonders im Zusammenhang mit Ausscheidungen. Der Begriff der Warmversprödung wurde bereits sehr früh geprägt. Ein damals kaum bekannter Zusammenhang mit Kriechporenbildung (Band 1 Bild 5.3.2-7 und Bild 5.3.2-8) darf in manchen Fällen vermutet werden.

- Ein ähnlicher Effekt tritt bei stabilisierten austenitischen CrNi-Stählen (Typ CrNiTi (oder Nb) 18/9) auf. Ausscheidungen mit den Stabilisierungselementen Ti oder Nb, die sich bei schnellem Abkühlen im Herstellungsprozess nicht bilden konnten, entstehen über längere Zeit bei Betriebstemperatur. Diese Ausscheidungshärtung führt zum Anstieg der Festigkeit mit einem Rückgang der Zähigkeit. - 475°-Versprödung beobachtet man bei Cr-Stählen mit über 15% Cr. Der Effekt wird von Phosphor unterstützt und entseteht zwischen 475°C und 500°C. Der Vorgang ist durch Glühen bei 600°C reversibel.

- Sigma-Phasen-Versprödung findet in Stählen mit über 13% Anteil an Cr- oder Cr-Mn statt. σ-Phase ist eine intermetallische Fe-Cr-Phase die bei Langfristerwärmung zwischen 500°C und 900°C entsteht und von Kaltverformung und Kriechen beschleunigt wird.

Stähle bei denen diese Gefahr besteht sind nur mit Vorsicht anzuwenden.

- Versprödung durch Kornwachstum/-vergröberung bei ferritischen Stählen ab Temperaturen von 1000°C. Sie entsteht also beim Herstellungsprozess. Begünstigend wirkt eine 'kritisch' hohe Kaltverformung. Diese 'Kaltversprödung' erfordert große Vorsicht bei Kaltverformung im Produktionsprozess (Ziehen, Walzen, Stauchen, Biegen) oder Handhabung. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang auf die Gefahr von Betriebsunfällen hingewiesen.

Einfluss niedriger Betriebstemperaturen begegnet dem Konstrukteur heute auf vielen Gebieten. Dazu gehören insbesondre Alternative Energien und Umweltschutz:

- Wasserstoffspeicher.
- Recycling (Zerkleinern).
- Kaltmahlen von Lebensmitteln,
- Gasverflüssigungsanlagen bzw. Verdampfersysteme (Lit. 5.3-18),

- Anwendungen unter Weltraumbedingungen, hier ist mit Temperaturen bis weit unter 100 °C zu rechnen.

- Entlackungsanlagen,

- Nahrungsmittelindustrie (Schockgefrieren). Mit den folgenden medienspezifischen (Siede) Temperaturen ist zu rechnen:

- Stickstoff ist flüssig bei 1 bar -196°C, bei 3 bar -185°C.

-  $CO_2$  befindet sich bei 1 bar und ca. -  $80^{\circ}C$ nur im festen Zustand (Trockeneis). Eine Lagerung im flüssigen Zustand erfolgt in Tanks bei 17 bar und -25°C.

Die Versprödungsneigung zeigt sich in einem steilen Abfall der Kerbschlagzähigkeit unterhalb einer Temperatur welche die untere Einsatzgrenze markiert (Bild 5.4.4-5). Für ausreichende Sicherheit insbesondere bei kryogenen Temperaturen sorgen Stähle mit besonderer Legierungszusammensetzung oder geeignete Leichtmetalllegierungen auf Basis von Aluminium und Titan. Sowohl hohe als auch niedrige Betriebstemperaturen können die Sprödigkeit eines Stahls gefährlich erhöhen. Das muss vom Konstrukteur berücksichtigt werden.



Besonders Kunststoffe/Elastomere sind bei niedrigen Temperaturen versprödungsgefährdet. Dem muss der Konstrukteur mit einer richtigen Werkstoffwahl entgegenwirken. Ein Beispiel sind elastische Dichtungen wie O-Ringe und Lippendichtungen.

Bild 5.3-1.3: Beispiele für technische Anwendungen bei Niedertemperatur und unter kryogenen (extrem niedrige Temperaturen) Bedingungen. Die Anwendungen nehmen besonders im Zusammenhang mit umwelt-

freundlichen Technologien und der 'Weltraumtechnik'(mittlere Skizze) zu. Dabei spielen Flüssiggase eine besondere Rolle.

- Gasverflüssigungsanlagen (Bild 5.10.2-1), - Flüssiggasspeicher (Skizze oben), insbesondree auch im Hinblick auf Brennstoffzellen in der Verkehrsanwendung (Skizze oben). Eine besondere Herausforderung ist die Wärmeisolation um das Verdampfen möglichst zu verzögern. Dazu wurde eine sog. Superisolierung entwickelt welche die Technologie der 'Thermosflasche' nutzt. Ein solches sog. Derwar-Gefäß nutzt die Isolationswirkung des Vakuums und zusätzlich Reflexionsschichten für die Wärmestrahlung. Das ermöglicht mit eine Dicke von 3,5 cm die Isolation einer 10 m (!) dicken Polystyrolschicht bzw. Perlitschüttung (vulkanisches Glas). So lässt sich beispielsweise der Druckanstieg innnerhalb von 3 Tagen in einem Flüssigwasserstofftank auf 2 Bar begrenzen. Dieser Wert wird noch deutlich günstiger wenn man die Kälte bei der Entnahme des Flüssigwasserstoffs als Treibgas (Vergasung) nutzt. Damit lässt sich Luft oder Stickstoff verflüssigen und so die Superisolierung kühlen. Ein solcher 'Kälteträger' entzieht außerhalb der Nutzungsphase (ohne Wasserstoffentnahme) beim Verdampfen dem Isolierbereich Wärme und verbessert so dessen Güte.

Aus Sicherheitsgründen ist bei Anlagen mit Flüssigwasserstoff zu berücksichtigen, dass bereits geringe Mengen an Verunreinigungen beim Füllvorgang gefährlich werden können. Sie, insbesondere Sauerstoff, kristallisieren aus. Dann können sie sich wegen der höheren Dichte in schlecht durchströmten Bereichen einer Anlage absetzen. Kommt es hier zu einem zündfähigen Gemisch kann dies bereits bei geringer Zündenergie explodieren. Dazu genügt beispielsweise Reibung eines Ventils (siehe auch Kapitel 5.10).

- Zerkleinerung zäher Materialien (Bild unten) wie Kunststoffe/Elastomere (z.B. Recycling von Altreifen) oder **Pulverherstellung** in der Lebensmittelindustrie (Milch, Kaffe mittleres Bild).

- 'Schockgefrieren in der Lebensmittelindustrie.

- Herstellung von Tiefkühlkost.

- **Kühlung** von Metallstrukturen im sehr heiβen Gasen (**Raketendüsen**)

- Separieren durch '**Ausfrieren**' (z.B. alkoholfreies Bier).

Bei allen diesen Anlagen kommt Maschinenbau mit **angepassten Maschinenelementen** zum Einsatz. Dabei sind besondere Effekte zu berücksichtigen:

- Sprödigkeit von Metallen (Bild 5.4.4-5) und Kunststoffen bei niedrigen Temperaturen. Für Tieftemperaturanwendung bieten sich besonders austenitischen Stähle, Nickellegierungen, Leichtmetalllegierungen und Titanlegierungen an. Bei Kunststoffen, z.B. für Gleitschichten und Dichtungen sind Fluorverbindungen (z.B. PTFE) nutzbar.

- Berücksichtigung von Wärmedehnungen um je nach Unterschieden gefügter Komponenten ein Lockern oder Klemmen zu vermeiden.

- Müssen flüssige Gase wie bei **Raketenantrieben** auch zur **Schmierung von Gleitflächen** (z.B. Gleitlager, Zahnräder, Bewegungskolben) dienen ist besonderes Know How erforderlich. Zunächst stellt sich die Frage nach der **Tragfähigkeit** eines Flüssiggas-Gleitfilms.

Bei flüssigem Wasserstoff (Lit. 5.3-19) ist nicht mit der Bildung einer schützenden Oxidschicht (z.B. bei Mischreibung) zu rechnen. Bereits vorhandene Oxidschichten können bei hohen Gleittemperaturen im Mikrobereich (Blitztemperaturen) durch Reduktion geschädigt werden. Damit wird Kaltverschweißen (Fressen, Kapitel 5.9.2) unzulässig begünstigt. Hier kommen Zumischungen wie Tricresylphosphat (TCP) in Betracht. Diese reaktiven Zusätze sind in der Lage Mikroschäden an Gleitschichten 'auszuheilen'. Es besteht aber bei längerer Einwirkung die Gefahr unerwünschter Reaktionen und Schädigungen (z.B. Korrosion).

Fortsetzung auf Seite 5.3-9



#### Fortsetzung von Seite 5.3-7

Über Langzeit stellt sich auch immer die Frage nach der Gefahr einer Wasserstoffversprödung (Kapitel 5.7). Diese erfordert Wasserstoff im atomaren Zustand, das Flüssiggas liegt jedoch molekular vor. Treten durch Reaktionen, möglicherweise unterstützt von tribologischen Vorgängen (Gleiten), auf bei denen Wasserstoff entsteht ist eine Versprödung und Diffusion atomaren Wasserstoffs möglich. Dies dürfte sich jedoch erst nach einer gewissen Zeit bemerkbar machen. Das könnte erklären warum man von kurzzeitigen Schädigungen, z.B. in Raketenpumpen bisher nichts hört.

Flüssiger Sauerstoff kann dagegen **Metallbrände** ermöglichen (Kapitel 5.10). Durch **Oxidation können Gleitschichten** sich zu einem höheren Reibbeiwert verändern, geschwächt werden oder ganz verschwinden.

Eine weitere Herausforderung tiefer Temperaturen kommt auf den Konstrukteur bei der Realisierung von Maschinen zu, die sich unter Weltraumbedingungen befinden. Hier interressieren uns besonders die niedrigen Betriebstemperaturen. Deren Auswirkung kann von Besonderheiten wie extremes Vakuum und hochenergetische Strahlung zusätzlich beeinflusst sein. Die Problematik soll am Beispiel (mittlere Skizze) eines Rads verdeutlicht werden. Elastomere für die Bereifung scheiden aus Gründen der Versprödung und Alterung aus. Deshalb weden elastische Metallstrukturen genutzt. Frühere Varianten verwenden statt einem Gummireifen geometrisch ähnliche hochelastische Metallgewebe aus feinen Drähten. Im dargestellten Fall wurde eine federnde Abstützung der dünnwandigen elastischen Lauffläche gewählt. Es ist anzunehmen, dass es wegen Steifigkeitsunterschieden an den Auflageflächen zu Schwingverschleiß (Kapitel 5.9) mit der Gefahr von Fressen (Kapitel 5.10) kommt. Damit erscheint eine Versteifung und die Gefahr einer Schädigung mit (Bild 5.9.3-7) Schwingrissen realistisch. Eine betriebsnahe Erprobung erscheint so unerlässlich.

Ein besondererProblembereich ist die Vereisung von Flüssigkeitssystemen. Dazu gehören

- Flüssigkeitsgekühlte Motoren.
- Heizungssysteme (Band 2 Bild 6.1.1.1.4-14).
- Klimaanlagen in Gebäuden und Fahrzeugen.
- Kraftstoffsysteme durch Wasser im Kraftstoff, insbesondere in Flugzeugen (Band 2 Kapitel 8.3).

- Schädigung von Maschinen und Anlagen beim **Transport**. Typisches Beispiel ist ein Transport von gefüllten Maschinen mit dem Flugzeug.

Die Folgen einer Vereisung sind

Blockieren einer funktionsnotwendigen
Strömung. Beispiele sind Kraftstoffleitungen, Filter, Siebe, Ventile und Regler.
Sprengen von Leitungen und Gehäusen.



**Bild 5.3-1.4** (Lit. 5.3-18): Bei kryogenen Systemen muss der Konstrukterur dem Verdampfer besondere Aufmerksamnkeit widmen. Schäden und Fehlfunktionen dieser Komponenten sind sicherheitsrelevant. Dabei ist zu vermeiden:

- Ein gefährlicher, insbesondere **explosiver Druckanstieg**. In diesem Fall können Schockwellen Bauteile zerstören, deren Werkstoff nicht ausreichend sicher gegen **Tieftemperaturversprödung** (niedrige Kerbschlagzähigkeit, Bild 5.4.4-5) ausgewählt wurde.

- Versagen der Wärmetauscherfunktion durch Vereisung. Diese Gefahr besteht besonders bei

einer Fehlfunktion der Beheizung des Wärmetauschers. Diese sorgt für Wärme zur Verdampfung. Entsprechend sicher sind die potenziell dafür verantwortlichen Komponenten wie Ventile und Regler auszulegen.

Ist das Medium brennbar können Lecks zur **Detonation** von Gaswolken und/oder **Stichflammen** führen. Für die Sicherheit sind die einschlägigen Vorschrifte anzuwenden.

> Bild 5.3-2: Der äußere Befund geschädigter, thermisch beanspruchter Bauteile kann helfen, Rückschlüsse auf Ursachen, Abläufe sowie Schädigungsart und -ausmaß zu ziehen. Daraus lassen sich Maßnahmen für weitere Untersuchungen oder Abhilfen ableiten.

Rissbildung: Das Aussehen der Risse kann viel über Entstehung und schädigende Einflüsse aussagen. Ein erstes Merkmal ist der Rissverlauf im Gefüge. Handelt es sich um einen interkristallinen Riss (entlang der Korngrenzen), spricht dies für einen Kriecheffekt und/oder eine Schädigung infolge Korrosion und/oder Oxidation. Verläuft der Riss transkristallin (durch die Körner) ist eine dynamische Ermüdung (Schwingbruch, Thermoermüdung, LCF) wahrscheinlicher. Ein nicht "ausgewaschener" klaffender Riss (Rissufer passen zusammen) ohne deutliche plastische Verformungen weist auf sprödes Verhalten unter Eigenspannungen hin. Zu prüfen ist, ob versprödende Medien wie Metallschmelzen (Bild 5.3-7) eingewirkt haben. Plastische Verformungen sind Merkmale hoher Dehnungen bei Uberlastung. Aufgestauchte und klaffende Rissufer sind ein Zeichen für zeitweise hohe Druckspannungen oberhalb der Fließgrenze (z.B. Thermoermüdung, Bild 5.4.2.1-10). Fest geschlossene Risse lassen auf vorhandene hohe Druckspannungen schließen, z.B. als Folge einer Eigenspannungs-Verlagerung durch eine plastische Verformung. Von besonderer Bedeutung kann der Rissgrund sein (Bild 4.4-13,. Bild 4.4-14 und Bild 5.4.2.1-10). Ausrundung, Oxidation, Verästelung, Rissfelder sind wichtige Merkmale für die Fortschrittsgeschwindigkeit des Risses und eventueller Umgebungseinflüsse. Die Risslage am Bauteil und die **Rissorientierung** gibt Hinweise auf die Richtung der schadensursächlichen Belastung. Einflüsse, die vor oder nach der Rissentstehung datierbar sind (z.B. Bearbeitungsriefen, Kratzer, aufgespritztes Material), können wichtige Informationen über zeitliche Abläufe enthalten.



**Bruchbild:** Meist ist trotz Oxidation das Bruchbild makroskopisch ähnlich bewertbar wie von Brüchen und Rissen die bei "nicht oxidierenden" Temperaturen entstanden sind. Einen Vorteil können sogar Anlauffarben bieten, die auf zeitliche Abläufe und den Rissfortschritt hinweisen.

Obwohl heiße Bruchoberflächen, insbesondere reaktive frische Bruchflächen, Oxidschichten aufweisen, zeigt die Erfahrung, dass eine erfolgreiche mikroskopische Auswertung (REM) meist noch möglich ist (Bild 5.3-4).

Anschmelzungen und Aufreißen von Lötungen: Der Schmelzpunkt von Hochtemperaturloten steigt beim Lötvorgang mit der Abdiffusion der Schmelzpunkt absenkenden Bestandteile (z.B. Bor). Auf Grund der gegenüber dem Grundwerkstoff niedrigeren Festigkeit und Sprödigkeit ist trotz des ausreichend hohen Schmelzpunkts mit einem Aufreißen der Lötung bei sehr hohen Temperaturen zu rechnen. Wird die Liquidustemperatur des Lotes überschritten, können, wegen der damit verbundenen Volumenvergrößerung, Lotperlen an der Oberfläche austreten ("ausschwitzen"). Eine mikroskopische Untersuchung solcher Bruchflächen hat die Chance, anhand von Schmelzstrukturen und einem teigigen Verhalten (im REM sind "kaugummiartige" Bruchstrukturen erkennbar), Rückschlüsse auf Übertemperaturen zu ziehen. Ähnliche Ausschwitzungen kann man an infiltrierten Sinterwerkstoffen (z.B. bei Gleitlagern und Andruckscheiben) oder sehr inhomogenen Werkstoffen oder im Bereich von Seigerungen bei Ni-Basis-Gusslegierungen finden.

Aufgespritzte Schmelzperlen: Auch dies ist eine Form örtlicher Überhitzung und Schädigung. Schmelzperlen von Schweißungen und Bearbeitungsverfahren können die Festigkeit der Auftrefffläche beeinträchtigen, sowie Zugeigenspannungen induzieren. Die Schwingfestigkeit wird so deutlich abgesenkt. Bekannt sind Fälle an elektronenstrahlgeschweißten Titanteilen (Verdichterleitapparate, Trommelläufer). Aber auch beim Reibschweißen oder bei Fräs-, Trenn- und Schleifarbeiten können schädigende heiße Partikel abgeschleudert werden. Titanteile sind für Schweißspritzer auf doppelte Weise empfindlich: Schmelztropfen von Titanlegierungen brennen während des Flugs an Luft und sind deshalb sehr heiß. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Titanlegierungen verzögert zusätzlich die Abkühlung.

Titanwerkstoffe oxidieren stark und verspröden so im Bereich des Tropfens. Zusätzlich sind Titanlegierungen kerbempfindlich. Die Versprödung begünstigt Mikrorisse bei Verformung und damit von diesen Anrissen ausgehende Schwingbrüche.

Hinweise auf Oberflächenversprödung: Rissbildung, insbesondere als konzentrische Ringe um Eindrücke oder Ausplatzungen, weist auf eine Versprödung der Oberfläche hin. Bei Titanlegierungen handelt es sich meist um eine Oxidschicht, die sich unter Sauerstoffzutritt (Luft) und Temperaturen über 600°C bildet. Anlauffarben sind ein Hinweis, grau matte Oxidationsflächen ein sicheres Zeichen für eine gefährlich versprödete Titanoberfläche. Versprödungsverdacht besteht generell auch für Nickellegierungen, wenn Fremdmetall auf der Oberfläche geschmolzen ist (spröde Phasen, Versprödung der Korngrenzen durch Lötrissigkeit, Bild 5.3-3).

Anlauffarben: Anlauffarben sind gewöhnlich ein Zeichen für Sauerstoffzutritt an einer heißen Oberfläche. Die Farben hängen lediglich von der Schichtdicke ab ("Farben dünner Plättchen"). Die Oxidschichtdicke wird außer von der Temperatur von vielen anderen Einflüssen wie Reaktivität der Oberfläche (z.B. Werkstoff, Bruchflächen), Atmosphäre, Verunreinigungen und der Reaktionszeit beeinflusst. Deshalb sind nur sehr vage Aussagen zur maximalen Temperatur möglich. Für eine einigermaßen verlässliche Temperaturabschätzung sind viel Erfahrung und zusätzliche Informationen (z.B. Zeit) notwendig. Besondere Vorsicht ist bei Titanlegierungen geboten. Deren Anlauffarben verändern sich schon unter der Einwirkung kleinster Verschmutzungen entscheidend.

Verunreinigungen und Ablagerungen: Besondere Aufmerksamkeit ist auf Flecken, Spritzer oder Aufschmierungen zu richten, die offenbar das Oxidationsverhalten der Oberfläche verändert haben. Hier besteht die Möglichkeit einer schädigenden Oberflächenreaktion wie Korngrenzenangriff und Diffusion. So entsteht die Gefahr, dass sich in dieser Zone keine schützende Oxidschicht aufbauen kann.

Verzug eines Bauteils kann als reine Kriechverformung unter äußeren Belastungen und/ oder die Folge frei werdender oder umgelagerter Eigenspannungen sein. Dafür können auch ausreichend hohe Bauteiltemperaturen bei normalem Betrieb ausreichen. Eine weitere Möglichkeit für Verzug sind ungewöhnlich große behinderte Wärmedehnungen als Folge von Temperaturgradienten. Verformungen sind immer im Zusammenhang mit hohen Eigenspannungen zu sehen. Diese lassen sich bei Zugänglichkeit und geeigneten Bedingungen in Höhe und Verlauf vor Ort oder im Labor messen. Verfahren mit Röntgenstrahlen können nur Eigenspannungen in einer dünnen Oberflächenzone messen. Für den Spannungsverlauf auch unter der Oberfläche ist die Bohrlochmethode zu bevorzugen. Aufwändig (teuer) aber sehr aussagefähig sind "tomografieähnliche" Verfahren mit Neutronen, die auch in dicken Querschnitten Aussagen über den Spannungszustand und die Spannungsverteilung zulassen. Sie bewegt sich an der Grenze zur zerstörenden Prüfung, denn das Teil muss angebohrt werden. Unbehinderte Kriechverformungen bauen keine nennenswerten Eigenspannungen auf.

Härte: Härteänderungen lassen sich in verdächtigen Bauteilzonen messen. Deutliche Härteveränderungen außerhalb der für das Bauteil spezifizierten Werte sind ein Hinweis auf eine Gefügeveränderung. Hohe Betriebstemperaturen können eine Erklärung für diesen Befund sein. Dies gilt sowohl für zu hohe Härten als auch für einen Härteabfall.

Metallografische Untersuchung (siehe hierzu Bild 5.3-3 und Bild 5.3-5): Wird die Oberfläche eines Bauteils wie ein metallografischer Schliff behandelt (polieren, ätzen), lässt sie sich, bei Zugänglichkeit, direkt mikroskopisch untersuchen. Andernfalls ist eine indirekte Untersuchung über einen Kunststoffabdruck (aushärtende Abdruckmasse oder Abdruckfolie) möglich.

Bild 5.3-3 (siehe auch Bild 5.3-4, Bild 5.3-5): Der metallografische Befund thermisch beanspruchter Bauteile ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Bewertung des Schädigungsausmaßes und der Klärung von Schadensmechanismen,abläufen und -ursachen. Auch elektronenmikroskopische Untersuchungen (Raster-Elektronen-Mikroskop = REM, engl. scanning electron microscopy = SEM) haben diese Untersuchungsmethode nicht entwertet. Beide können sich hervorragend ergänzen. Dies gilt besonders für Mikroanalysen und die Bewertung sehr kleiner Partikel wie Aushärtungsphasen oder Korngrenzenbelegungen.

Gefügeänderungen: Vorgänge wie Lösungsglühen, Aushärten (z.B. Ni-Legierungen), Härten, Anlassen (z.B. C-Stähle, Cr-Stähle) und Sensibilisieren (z.B. CrNi-Stähle) können erkannt bzw. nachgewiesen werden. Von besonderer Bedeutung ist die Auswertung des Erscheinungsbilds der  $\gamma$  **'-Phase** in Ni-Legierungen der Heißteile (Bild 5.3-4). Die Aushärtungspartikel sind für eine befriedigende lichtoptische Bewertung gewöhnlich zu klein. Diese erfolgt bei ausreichender Erfahrung und Hintergrundinformation vorzugsweise durch eine Kombination von metallografischer Schliffherstellung und Präparation in Kombination mit einer REM-Untersuchung. Größe, Form, Volumenanteil, Anordnung und Orientierung (Floßbildung, engl. raftening siehe Lit. 5.3-6) sind wichtige Merkmale für betriebsbedingte Veränderungen und geben Hinweise auf Temperaturen, Zeiten und Belastungsrichtung.

Kriechporen: Die Chance des Nachweises einer Lebensdauer bestimmenden Kriechbelastung bieten Kriechporen. Verbrauchte Lebensdauer bzw. die **Restlebensdauer** lassen sich damit abschätzen (Bild 5.3.2-7 und Bild 5.3.2-9). Ausreichend sichere Lebensdauerabschätzungen sind trotz viel Erfahrung allenfalls dann möglich, wenn die Porenbildung noch nicht zu intensiv ist. Dann kann über einen erneuten Einbau und/oder eine Regeneration entschieden werden.

Die Orientierung der mit Poren belegten Korngrenzen ermöglicht Rückschlüsse auf kriechbelastete Bauteilzonen und die Belastungsrichtung. Der angeregte Kriechmechanismus kann etwas über Art und Höhe der Belastung aussagen (Bild 5.3.2-8).

Korngrenzen: Lage und Ausmaß geschädigter Korngrenzen (z.B.Kornausbrüche) in Oberflächennähe oder im Querschnitt können bereits wichtige Hinweise auf schädliche Einflüsse geben. Anreicherung oder Verarmung von Legierungsbestandteilen und Fremdelementen weisen auf Werkstoffschwächen und/oder Schadensmechanismen hin. Es kann sich dabei um Oxidation oder um Reaktionen mit Oberflächenverschmutzungen handeln. Ein typischer Fall ist die sog. Lötrissigkeit (Bild 5.3-7).

Die Sensibilisierung von Korngrenzen (Bild 5.6.1-6 und Bild 5.6.1-7), wie sie bei nicht ausreichend stabilisierten CrNi-Stählen in bestimmten Temperaturbereichen (Bild 5.6.1-8 und Bild 5.6.1-9) z.B. neben Schweißnähten auftritt, kann zu einer unzulässigen Korrosionsanfälligkeit führen. Ist das Bauteil beschichtet (z.B. Diffusionsschicht oder Auflageschicht), können Veränderungen wichtige Indikatoren für Schädigungen sein. Korngrenzen unterliegen bevorzugt Oxidation und Heißgaskorrosion (z.B. Sulfidation). Diese Schädigungen sind im Schliff gut erkennbar und bewertbar. Eine solche Bewertung wird für die Abschätzung erforderlicher Nacharbeit bei einer Reparatur benötigt. Korngrenzenbeläge oder -verarmungen geben wichtige Hinweise auf die Empfindlichkeit des Werkstoffs gegenüber Schadensmechanismen. Anschmelzungen der Korngrenzen lassen auf Temperaturen im Solidusbereich schließen. In diesem Zusammenhang sind Warmrisse (Bild 4.4-15) zu nennen die bei Schweißungen, Anstreifvorgängen (Bild 5.3-5) und Schleifüberhitzungen beobachtet werden.



Flächige Schädigungen: Werkstoffe die bei Temperaturen mit lebensdauerbestimmender Oxidation zum Einsatz kommen "leben" gewöhnlich von der Ausbildung einer schützenden dichten Oxidschicht. Besonderheiten und Störungen der erwünschten Oxidationsschicht wie Al-Spritzer nach einem Verdichterschaden, sind deshalb als schadensrelevant anzusehen. Hierzu gehören **Reaktionszonen mit** Verschmutzungen. Ein Beispiel sind Fremd-
metalle wie Silber aus Labyrinthbelägen und versilberten Bauteilen. Solche Ablagerungen können die Sulfidation erheblich begünstigen (Bild 5.6.1.4.1-3). Besonders gefährlich sind **Reaktionen mit Metallschmelzen**, welche den Grundwerkstoff entfestigen und verspröden. Typische Beispiele sind **Blei aus vergessenen Röntgenmarkierungen**, **Strahlgut-Verunreinigungen von ungeeigneten Abdeckbändern** oder niedrig schmelzende Eingießlegierungen (z.B. Zinn/Wismut).

Oxidschichten wachsen an Titanlegierungen bei Temperaturen über 600°C schnell auf. Dies führt zusammen mit Gefüge-Veränderungen zur Versprödung mit der Gefahr einer Rissbildung und Schwingfestigkeitsabfall. Geschädigte bzw. nicht ausreichend gegen fortschreitende Oxidation schützende Oxidschichten können sich unter Einwirkung äußerer Einflüsse (Atmosphäre, Verunreinigungen) bilden. Sulfidation wird besonders von Oxidschichten begünstigt, die sich wegen fehlenden Sauerstoffangebots (z.B. in schlecht belüfteten Hohlräumen, Bild 5.6.1.4.2-1) nicht ausreichend dicht ausbilden können.

Rissbild: Ob ein Riss klaffend oder geschlossen ist, seine Rissufer im Anrissbereich gestaucht oder gedehnt wirken, hängt von plastischen Verformungen und induzierten Eigenspannungen ab. Umgekehrt kann kaum von solchen Merkmalen auf diese Vorgänge (bestenfalls qualitativ) rückgeschlossen werden. Der trans- oder interkristalline, durchlaufende oder verästelte Rissverlauf lässt sich im günstigen Fall Schadensmechanismen und der Belastungshöhe zuordnen (z.B. Kriechen oder Schwingungen). Die Anrisslage und der Rissverlauf, relativ zu Schwachstellen, sagen etwas über weitere schadensrelevante Einflüsse aus. Solche Schwachstellen können eine besondere Kornorientierung, Lunker oder fertigungsbedingte Kerben wie Bearbeitungsriefen und Funkenerosionsflächen sein.

Besonders aussagekräftig kann die Ausbildung der Rissspitze für die **Rissfortschrittsgeschwin**-

digkeit sein (Bild 4.4-13). Starke Oxidation mit Ausrundung des Rissgrunds weist auf eine sehr langsame Fortschrittsgeschwindigkeit hin. Umgekehrt lässt eine scharfe Rissspitze ohne Oxidation einen schnellen und damit gefährlichen Rissfortschritt vermuten.

Kornausbildung: Rekristallisation zeigt sehr hohe Betriebstemperaturen (dicht unter der Solidustemperatur) an. Neue Körner entstehen an Einkristallen im Bereich kritischer plastischer Verformung. Solche Gefügeveränderungen lösen Fremdkörpereinschläge oder eine verfestigungsgestrahlte Oberfläche aus. "Fehlkörner" in Einkristallen sind auf Abweichungen im Gießprozess zurückzuführen. Typisch sind plastische Verformungen infolge der Schrumpfung beim Abkühlvorgang in einer zu steifen Formschale.

In Schmiedematerial kann eine ungewöhnliche Korngröße (zu groß oder zu klein) mit einer Wärmebehandlung in Zusammenhang stehen. Kornwachstum weist auf zu lange Glühzeiten in der Fertigung oder ungewöhnlich hohe Betriebstemperaturen über längere Zeit hin. Dies dürfte eher für statische Bauteile wie Brennkammer-Komponenten gelten, deren mechanische Belastung relativ niedrig ist.

Härte: Absolutwerte und Verläufe von Mikrohärten bei metallografischer Untersuchung lassen werkstoffspezifisch in Kombination mit anderen Befunden (z.B. Gefügebesonderheiten) schädigende Einflüsse bewerten. So zeigt sich eine gefährliche Überhitzung des Kranzbereichs von Turbinenscheiben (Heißgaseinbruch) bei der Überholung in einem Härteabfall gegenüber spezifizierten Mindestwerten.

Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Temperatur- und Umgebungseinflüsse



**Bild 5.3-4:** Thermisch beanspruchte Bauteile können in vielen Fällen erfolgreich mit dem **Raster-Elektronen-Mikroskop** (REM, engl. Scanning Electron Microscopy = SEM) untersucht werden. Im REM lassen sich sowohl die Bruchflächenstrukturen auswerten und dokumentieren als auch Analysen der Zusammensetzungen durchführen.

Dazu ist es nicht immer notwendig, das Bauteil selbst oder eine zerstörend entnommene

Probe für die Probenkammer des REM zu präparieren. In manchen Fällen genügen Abdrücke mit Folien oder Abdruckmassen, die zur Untersuchung mit Gold bedampft werden.

Abgelöste Partikel und Schichten können im REM auf ihre Zusammensetzung hin analysiert werden. Zusätzlich kann die Struktur (z.B. Porosität) von Ablagerungen und Partikeln Rückschlüsse auf Entstehungsort (z.B. Verdichterabrieb) und -zeit (z.B. bestimmte angesaugte Stäube) ermöglichen.

Bruchflächenauswertung: In vielen Fällen, ist die Oxidation der Bruchfläche nicht so weit fortgeschritten, dass dies eine Auswertung im REM verhindert. Falsch ist es in jedem Fall zu versuchen, die (aufgewachsene!) Oxidschicht abzulösen, im irrigen Glauben darunter die unbeschädigte auswertbare Bruchfläche zu finden.

Eine andere Situation liegt vor, wenn sich aufgespritzte Beläge, z.B. nach intensiven Anstreifvorgängen, auf der Bruchfläche befinden. Es ist eine Frage des Mediums, das unter geeigneten Bedingungen einwirkt (z.B. im Ultraschall-Bad), ob die Beläge ohne Beschädigung der Bruchfläche entfernt werden können.

Rissfortschrittslinien (engl. striations), die im HCF-Bereich entstehen (Bild 4.3-6.2) sind gewöhnlich so fein, dass sie nach kurzen Oxidationszeiten nicht mehr erkennbar sind. Der Rissfortschritt von Thermoermüdungsrissen (LCF) lässt sich dagegen häufig noch anhand der Rissfortschrittslinien gut erkennen, der Ausgangspunkt identifizieren (eventuelle Initialschwachstelle) sowie Geschwindigkeit und Zyklenzahl bewerten. Auch der Anrissbereich lässt sich oft noch auf ursächliche Schwachstellen (z.B. Lunker) untersuchen. Stärke und Verlauf der Oxidationsschicht können über zeitliche Abläufe Auskunft geben. Schmelzperlen oder Poren (Kriechporen) sind kennzeichnende Merkmale. Es sei hier noch erwähnt, dass im Labor hergestellte Brüche (vorteilhaft nach Abkühlung der Probe in flüssigem Stickstoff) im Bereich vermuteter Kriechschädigung erzeugt werden sollten. Auf diesen nicht oxidierten Bruchflächen ist gegebenenfalls eine hervorragende Auswertung auf Kriechporen möglich. Zu beachten ist, dass zusammengewachsene Kriechporen "weiche" Bruchstrukturen zeigen, die leicht mit angeschmolzenen Zonen bei extremer Überhitzung verwechselt werden können.

Auswertung von metallografischen Schliffen oder metallografisch präparierten Oberflächen: Mit Hilfe einer geeigneten Folge von Poliervorgängen und Ätzungen gelingt es, die Aushärtungsphase ( $\gamma$ '-Phase ) auswertbar zu machen. Dies ist auf Grund der geringen Partikelgröße lichtoptisch nicht befriedigend möglich und muss im REM erfolgen. So lassen sich Rückschlüsse auf überschrittene Grenztemperaturen (Lösungsglühen, Bild 5.3-3), Beanspruchungsrichtung und Langzeitveränderungen ziehen. Ähnliche Techniken haben sich auch in der Auswertung von Kriechporosität bewährt. So wurde eine Abschätzung der Schädigung bzw. Restlebensdauer (Bild 5.3.2-9) und der Beanspruchungsrichtung möglich (Bild 5.3.2-7).

Mikroanalysen: Neben der Untersuchung von Oberflächen und abgelösten Partikeln besteht auch die Möglichkeit, die Verteilung bzw. den Verlauf von Element-Konzentrationen zu bestimmen. Dies kann z.B. für die Bewertung der Veränderung von Diffusionsschichten sehr hilfreich sein. Auch die Identifikation der Diffusion schädigender Elemente wie Silber oder Schwefel (bei Sulfidation, Bild 5.3-8), ist in der Schadensklärung von erheblicher Bedeutung.



Bild 5.3-5: Anstreifvorgänge und Heißlauf können mit gefährlichen Überhitzungen ablaufen. Dabei erweichen oder schmelzen die Korngrenzen und reißen unter den gleichzeitig auftretenden Wärmespannungen auf (Warmrisse, Detail oben). Diese Rissbildung ist vorzugsweise quer zur Gleit-Anstreifrichtung orientiert. In der oberen Skizze ist das Beispiel eines Turboladerrads dargestellt.

Je nach Werkstoff kommt es spontan zu **Warm**rissen/Heißrissen (Detail oben rechts, typisch für Ni-Legierungen) oder mikrospröden 'Härterissen'. Ähnliche Schäden treten bei der Bearbeitung im Fertigungsprozess (Schleifen, hochtouriges Fräsen, Trennen) auf, wenn die Verfahrensparameter ungünstig gewählt wurden. Weil die bearbeitete Oberfläche oft verschmiert ist, werden die Risse erst nach einem Wärmebehandlungszyklus in der Fertigung oder nach einiger Betriebszeit (z.B. bei der Überholung) oder nach einem Ätzen erkannt. Handelt es sich um einen Festigkeits- bzw. Härteabfall, können im weiteren Betieb von hier Schwingbrüche ausgehen. Bei marten-

sitischen Stählen kann es zu einer **Neuhärtung** mit Versprödung und Gefügekerbe ohne spontane Rissbildung kommen. Auch an diesen Fehlstellen bilden sich Schwingrisse, insbesondere wenn **Zugeigenspannungen** induziert wurden.

Außergewöhnliche **Anlauffarben** sind ein Hinweis auf schädigend hohe Betriebstemperaturen.

Überhitzungen können auch die Ursache von Deformationen wie Verzug durch Eigenspannungen und/oder gefügebedingte Volumenveränderungen sein. Diese machen sich bei engen Toleranzen durch Klemmen (z.B. bei Einspritzsystemen) oder zu großes Spiel (z.B. Leckagen bei Ventilen) bemerkbar. Verzug kann darüber hinaus bei rotierenden Bauteilen zu gefährlichen Unwuchten führen. Diese können Ursachen von weiteren Schäden wie Schwingbrüchen und Lagerschäden sein. **Bild 5.3-6** (Lit. 5.3-14): Diese Tabelle gibt denkbare **Metallkombinationen** des Triebwerksbaus an, bei denen es unter ungünstigen Umständen zur Lötrissigkeit (LME) und zur Schädigung bei Festkörperberührung (SMIE) kommen kann. Es handelt sich in erster Linie um Titanlegierungen, Nickelbasislegierungen und hochlegierte Stähle. Besonders gefährlich sind niedrigschmelzende metallische Oberflächenverunreinigungen aus oder mit Anteilen von Kadmium (Cd), Silber (Ag), Blei (Pb) und Wismuth (Bi).

Kadmium wurde bevorzugt in älteren Maschinen als Korrosionsschutz für rostende Stähle verwendet (Lit. 5.3-14). Auf korrosionsfeste Werkstoffe wurde Kadmium über Bäder oder als Aufschmierung verschleppt. In selteneren Fällen handelte es sich um eine beabsichtigte Beschichtung. Heute wird Cd wegen seiner Giftigkeit und seiner Rolle im Zusammenhang mit Wasserstoffversprödung nach Möglichkeit nicht eingesetzt.

Silber und Silberlegierungen werden an Verschraubungen zur Verbesserung der Reibbedingungen (niedriges Reibmoment bei Gewinden) beim Anziehen und zum besseren Lösen angewendet. Im Betrieb kann Silber über Korrosionsvorgänge während des Stillstands auf anderen Bauteilen abgelagert werden. Gleit- und Passflächen können Silber auf andere Bauteile übertragen.

Blei und Wismut: In weitgehend reiner Form kommt Blei in Beschichtungen und Bleibändern für Abdeckungen (Galvanik, Strahlen) und Kennzeichnungen (Röntgen) vor. Es kann von Beschichtungen auf Sitz- und Gleitflächen (z.B.Wellen) übertragen werden. Von Blei-Abdeckbändern verunreinigtes Strahlgut oder Reste dieser Bänder können ebenfalls Oberflächen verunreinigen.

Blei tritt mit Wismut in niedrig schmelzenden Legierungen zum Eingießen für das Spannen von Bauteilen auf. Hier besteht die Gefahr zurückgebliebener Reste, insbesondere in Hohl-



Kupfer, Messing und Bronzen: sind als Auslöser von Lötrissigkeit in Stählen bekannt. Das (*Lit 5.3-15*).

Kupfer wird auch als Lot für tragende Strukturen (z.B. Fahrräder) und Leitungen aus Stäh-

len verwendet. **Schlagdorne** aus Kupfer oder Bronze können bedenkliche Aufschmierungen hinterlassen.

Gold wird in Triebwerken, wenn auch selten, als Reflexionsschicht angewendet, um Betriebstemperaturen in akzeptablen Grenzen zu halten. Für gebaute Leitkränze aus Nickellegierungen im Bereich des Verdichteraustritts wird, wegen der hohen Zähigkeit bei moderaten Löttemperaturen in einigen Fällen Goldlot angewendet.

Eine besondere, wenn auch scheinbar abwegige Gefahr, geht von Aufschmierungen durch Schmuck aus. Fingerringe aus Gold können beim Handling empfindlicher Bauteile in bedenklicher Weise Gold übertragen. Aus diesem Grund sollten bei derartigen Arbeiten keine Fingerringe getragen werden.

Bild 5.3-7: Lötrissigkeit (engl. Liquid Metal *Embrittlement = LME*, Kapitel 5.8) hat in seinen Voraussetzungen gewisse Ähnlichkeiten mit Spannungsrisskorrosion (Kapitel 5.6.3.1). Die Gefahr der Lötrissigkeit besteht bei Kontakt einer benetzenden Metallschmelze mit einem metallischen Bauteil unter ausreichend hohen Zugspannungen. Voraussetzung für eine gefährliche Benetzung ist der metallische Kontakt ohne störende Oxidschicht. Dies erfordert z.B. Neuteiloberflächen oder bis zum Grundmaterial frisch aufgerissene Oxidschichten. Für solche Bedingungen kann eine LCF-Beanspruchung sorgen, die definitionsgemäß unter merklichen plastischen Verformungen abläuft. Die Metallschmelze "schießt" auf den Korngrenzen in den Werkstoff. Sie wirkt auf diese Weise versprödend und rissbildend. Diese Schädigungen können sowohl unmittelbar beim Kontakt mit der Schmelze als auch später, z.B. während des Aufschmelzens von Oberflächen-Verunreinigungen unter Betriebstemperaturen entstehen. Die Skizze oben links zeigt einen Fall, in dem während der Wärmebehandlung eines Neuteils (metallische, nicht oxidierte Oberfläche) in einem Vakuumofen (Skizze oben rechts) Silber auf die Bauteiloberfläche tropfte. Der Ofen war vorher für Lötungen mit Silberlot verwendet worden. Offenbar waren dabei Lotreste in den isolierenden Grafitmatten oberhalb des Bauteils verblieben. Ein winziger Lottropfen (kleiner als ein Stecknadelkopf) drang dabei durch die Scheibe von über einem Zentimeter Dicke. Diese stand unter ausreichend hohen Zugspannungen (wahrscheinlich Schmiedespannungen und/oder Wärmespannungen, Skizze oben Mitte).

Die unteren Bilder entsprechen REM-Aufnahmen (Lit 5.3-2). Links erkennt man den Rissverlauf im Bereich des bereits ausgelaufenen Silbertropfens der von kleinen Spritzern umgeben ist. Dieses Merkmal ist typisch für einen benetzenden Tropfen und unterscheidet sich von ebenfalls gefährlichen Aufschmierungen.



Das Bild rechts lässt die für Lötrissigkeit typische "**Röschenbildung**" erkennen. Es handelt sich um kleine Lotansammlungen auf den klaffenden, interkristallinen Bruchflächen (Korngrenzen) am Rissbeginn.

Gefährliche metallische Verunreinigungen können auf vielfältige Weise auf Bauteiloberflächen geraten. Hier sei besonders auf Fertigung und Montage hingewiesen. Bild 5.3-8 (Lit. 5.3-16): Silber wird bei Heißteilen aus Ni-Basis-Werkstoffen und hochlegierten Stählen verwendet, um "Fressen" (Verschweißen) und Fretting (Schwingverschleiß) zu vermeiden und einen kontrollierbaren Reibbeiwert zu erhalten. Deswegen werden besonders Schrauben, Muttern und Passflächen von Bolzen versilbert. Silber kann Bauteile aus Nickel- und Titanlegierungen auf gefährliche Weise schädigen (Bild 5.3-7).

Skizze1: Auslösen und Unterstützen von Sulfidation durch eine Art katalytische Wirkung von Silber auf Heißteiloberflächen (siehe auch Bild 5.6.1.4.1-4).

Skizze 2: Bei erhöhten Bauteiltemperaturen (vermutlich >700 °C) kann Silber gefährlich in Ni-Legierungen und hochlegierte Stähle eindiffundieren. Besonders wenn diese, wie bei Schrauben und Bolzen üblich, unter hohen Zugspannungen stehen. Solche Schäden bevorzugen den Gewindebereich. Es kommt zu Versprödung, unzulässigem Festigkeitsabfall und zum Bruch. Die Diffusion wird bei versilberten Bauteilen vom metallischen Kontakt des Silbers mit dem Grundmaterial begünstigt. Eine Schädigung durch Diffusion ist an Bauteilen mit schützenden oxidierten Oberflächen bei Kontakt mit Silber weniger wahrscheinlich.

Skizze 3: Auslösen von Sulfidation an Heißteilen aus Ni-Legierungen im Kontakt mit versilberten Flächen. Dadurch kann auch die Ermüdungsfestigkeit unzulässig verringert werden (Lit 5.3-5; Lit 5.3-11)

Skizze 4: In Literatur 5.3-5 wird beschrieben, dass zwei Verdichterscheiben aus der Titanlegierung Ti-7Al-4Mo barsten, nachdem Risse in den Bolzenbohrungen der Verschraubung des Rotorverbands auftraten. Die Rissbildung wird auf den Kontakt der Titanlegierung mit gegen Fretting versilberten Bolzen aus hochlegiertem Stahl (A-286) zurückgeführt. Clhaltiges Schwitzwasser hat offenbar zur Bildung von Silber-Chlorid bei den erhöhten Betriebstemperaturen geführt und daraus Silberablagerungen in den Bolzenbohrungen entstehen lassen. Mit derartigen Verunreinigungen, insbesondere Chloriden, ist in Meeresatmosphäre immer zu rechnen. In Lit. 5.3-7 wird erwähnt, dass bei Langzeiteinwirkung von Ag Schädigungen am Scheibenwerkstoff Waspaloy beobachtet wurden. Es wurde auch beobachtet, dass sich Ag von den Verschraubungen ablöst und benachbarte Bauteile schädigen kann.

Skizze 5: Im Rotor einer Niederdruckturbine aus einer Ni-Legierung trat Lochfraß im Bereich von Silberablagerungen auf. Die Ablagerungen entstanden wahrscheinlich aus eingedampftem Schwitzwasser in dem Silberverbindungen gelöst waren. Das aggressive Wasser (Meeresatmosphäre?) hatte anscheinend die Verschraubung im Stillstand entsilbert und wurde dann beim Anfahren des Triebwerks nach außen in die Flanschansätze geschleudert, wo es verdampfte.Es handelt sich also um eine Kombination der Schadensmechanismen aus Skizze 1 und 4.

Skizze 6: Diese HDT-Scheibe eines Kampfflugzeugtriebwerks besteht aus einer Ni-Legierung. An beiden Flanschen entstanden nach längeren Versuchsläufen Risse. Sie wurden von Silber der Verschraubung ausgelöst.

Um derartige Schäden in Verbindung mit Silber zu vermeiden, muss auf ein Versilbern der Kontakt- und Gleitflächen verzichtet werden. Dies hat den zu akzeptierenden Nachteil, dass lösbare Verbindungen (z.B. Schrauben) bei der Demontage so geschädigt werden, dass eine Wiederverwendung nicht mehr möglich ist.



Merksatz: Versilberte Befestigungselemente wie Schrauben und Muttern sollten im Heißteilbereich nicht verwendet werden.

## Literatur zu Kapitel 5.3

- **5.3-1** A.Rossmann, "Untersuchung von Schäden als Folge thermischer Beanspruchung", Beitrag aus J.Grosch "Schadenskunde im Maschinenbau", Band 308, aus der Reihe "Kontakt & Studium Maschinenbau", Expert Verlag, ISBN 3-8169-1202-8, 2. Auflage 1995, Seite 162-187.
- **5.3-2** L. Engel, H. Klingele, "Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden", Carl Hanser Verlag München Wien, ISBN 3-446-13416-6, Seite 58.
- **5.3-3** T.E. Strangman, J.F. Neumann, A. Tasooji, "Thermal Barrier Coating Life Prediction, Model Development", NASA Host Program (NAS3-23945). Proceedings N88-11183.
- 5.3-4 P.A. Langjahr, R. Oberacker, M.J. Hoffmann, "Langzeitverhalten und Einsatzgrenzen von plasmagespritzten CeO<sub>2</sub>- und Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-stabilisierten Zr O<sub>2</sub>-Wärmedämmschichten", Zeitschrift "Materialwissenschaft und Werkstofftechnik", 32, (2001), Seite 665-668.
- **5.3-5** ASM Handbook, Formerly Ninth Edition, Metals Handbook, Volume 13, Corrosion, Kapitel ,,Corrosion in Aircraft Industry", Seite 1041.
- **5.3-6** Ch.W. Siry, H. Wanzek, C.-P. Dau, "Aspects of TBC service experience in aero engines", Zeitschrift "Materialwissenschaft und Werkstofftechnik", 32, 2001, Seite 650-653.
- **5.3-7** Rabi.S.Bhattacharya, S.Krishnamurthy, A.K. Rai, J.A.Kramer, "Threaded Fastener Coatings for Aerospace Applications", Zeitschrift "Lubrication Engineering", Volume 52, 3, Seite 237-242.
- **5.3-8** A.K.Koul, "Hot Section Materials for Small Turbines", Proceedings des AGARD Meeting "Technology Requirements for Small Gas Turbines", October 1993, Seite 40-1 bis 40-9.
- **5.3-9** C. Sommer, M. Bayerlein, W. Hartnagel, "Deformation and Failure Mechanisms of DS CM 247 LC Under TMF and LCF Loading", Proceedings CP-569 des AGARD Meeting "Thermal Mechanical Fatigue of Aircraft Engine Materials", 2-4 October 1995, Seite 11-1 bis 11-11.
- **5.3-10** Fa. Inco, Prospektangaben aus "High Temperature High Strength Nickel Base Alloys", July 1977.
- **3.5.3-11** "F110 Disk Crack Traced to Coating", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", August 6, 1984, Seite 18.

- **5.3-12** J.M. Aurrecoechea, W.D. Brentnall, J.R. Gast, "Service Temperature Estimation of Turbine Blades Based on Microstructural Observations", Zeitschrift "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power", April 1991, Vol.113, Seite 251-259.
- **5.3-13** D.M. Nissley, "Thermal Barrier Coating Life Modeling in Aircraft Gas Turbine Engines", Zeitschrift "Journal of Thermal Spray Technology", Volume 6 (1), March 1997, Seite 91-98.
- **5.3-14** AMS, Metals Handbook Ninth Edition, "Volume 11, Failure Analysis and Prevention", M.H.Kamdar, "Liquid Metal Embrittlement", "Embrittlement by Solid-Metal Environments", ISBN 0-871170-007-7 (v.1), Seite 225 244.
- 5.3-15 W.Shih, J.King, C.Raczkowski, "Liquid-Copper/Zinc Embrittlement in Alloy 718", Welding Research Supplement, Seite 219-s bis 222-s, zum "Welding Journal", June 1998.
- **5.3-16** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 4", Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-017734-5, 2000, Seite 12.2-1 bis Seite 16.2.2.3-23 bis 16.2.2.3-27.
- 5.3-17 "ABC der Stahlkorrosion", Mannesmann-AG Düsseldorf 1958, Seite 155-157.
- **5.3-18** "Kryogene Verdampfer-Systeme Verhütung des Sprödbruchs von Ausrüstungen und Rohrleitungen", IGC Dic. 133/05/D, European Industrial Gases Association (EIGA), Seite 1-9.
- **5.3-19** "Anwendung der Wasserstoff-Technologie Eine Bestandsaufnahme", Bericht SFK-GS-37 der Störfall-Kommission (SFK) des Arbeitskreises Wasserstofftechnologie 22. vom Mai 2002, Seite 1-44.
- **5.3-20** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 1", Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-005842-7, 2000, Kapitel 5.4.5.
- **5.3-21** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Band 3", Eigenverlag (turboconsult.gmx.de), ISBN 3-00-017733-7, 2000, Seite 12.4-9 und seite 12.4-30.



Müllverbrennung

Technologien die in Zukunft immer mehr Bedeutung bekommen stehen im Zusammenhang besonders intensiver Umwelteinwirkung und mit Prozessgasen. Aber bereits der Sauerstoff und/ oder die Feuchtigkeit in der Umgebungsluft können sich gefährlich auswirken (Bild 5.3.1-0). Typische Beispiele sind Offshore-Windanlagen die Meeresatmosphäre (Bild 5.6.1.2-10) ausgesetzt sind und Müllverbrennungsanlagen (Bild 5.3.1-3). Dazu gehören aber auch Technologien alternativer Kraftstoffe und neue Antriebssysteme wie Brennstoffzellen. Beispielsweise ist hier das Verhalten in einer Wasserstoffatmosphäre von großem Interesse. Das fordert den Konstrukteur bei Herstellung, Speicherung, Transport, Regelung und Umsetzung der Energie heraus. Nicht zu unterschätzen ist die Verkehrstechnik zu Land, zu Wasser und in der Luft (Bild 5.3.1-1). Nicht immer sind die wirksamen Effekte bewusst (Bild 5.3.1-2). Sie bestimmen aber das Verhalten und die Sicherheit der Bauteile und sind bei Auslegung und konstruktiver Gestaltung der Bauteile zu berücksichtigen.

- Korrosive und/oder oxidierende Wirkung (Bild 5.1-2 und Kapitel 5.6.1).
- Beschleunigung von Erosion (Bild 5.1-2, Bild 5.1-3 und Bild 5.5.1.1-6).
- Benetzbarkeit (z.B. von Metallschmelzen, Bild 5.3-6)
- **Diffusion** (Bild 5.3-8).
- Versprödungen (z.B. Wasserstoffversprödung, Kapitel 5.7.1)
- Beeinflussung von **Tribosystemen** (z.B. Fressen, Blockieren, Kapitel 5.9.2; Reibverschleiß, Kapitel 5.9.3)
- **Reaktionen** mit anderen Medien wie Hilfsstoffen (z.B. Schmieröl, Schmierfett, Bild 5.6.1.4.1-4).
- Schädigung von Polymeren (z.B. Dichtungen, Bild 5.6.3.1.1-12).
- **Bruchmechanisches Verhalten**: Anriss, Rissfortschrittsgeschwindigkeit (Bild 4.3-12, Bild 5.3.1-0, Lit.5.3.1-7), Restbruchgröße, Riss-/Bruchzähigkeit (Bild 5.3.1-5).

In diesem Kapitel wird versucht, mögliche Probleme und Risiken einer "Gastechnologie" bewusst zu machen. Dabei ist eine umfassende Behandlung nicht möglich. Hier muss sich der Konstrukteur im Einzelfall anhand von Fachliteratur und, wenn möglich, durch Konsultation von Fachleuten einarbeiten. Weil die Wirkung der Gase von einem **Zusammenwirken vieler, auch scheinbar nebensächlicher Effekte**, beeinflusst sein kann, sind betriebsnahe Tests an aussagefähigen Bauteilen oft unumgänglich. Das gilt neben den Betriebsparametern auch für "Hilfsmedien" wie Schmierstoffe, Werkstoffe wie Elastomere in Dichtungen und mögliche Veränderungen der Gase durch Abrieb oder Reaktionsprodukte. Das heißt, es können Versuche die Langzeiteffekte simulieren notwendig werden.



**Bild 5.3.1-0** (Lit. 5.3.1-8): Bereits Luftsauerstoff und/oder -feuchtigkeit kann das bruchmechanische Verhalten gefährlich verändern ("dynamische Versprödung"). Betroffen sind Anrissphase (Stadium I, "B", siehe Bild 4.3-6.1) und makroskopische Fortschrittsphase ("A") metallischer Werkstoffe gefährlich verändern (siehe hierzu auch Bild 5.3.2-5). Der

dargestellte Fall zeigt die Reaktion einer hochfesten Schmiede-Superlegierung bei 650°C bei statischer Biegung bei unterschiedlichem Sauerstoffangebot. Auch das Relaxationsverhalten ("C") ist gravierend betroffen. Im Vakuum findet am angerissenen Bauteil unter einer bestimmten Last keine weitere Relaxation statt.

**Bild 5.3.1-1**: Die **Betriebsatmosphäre** kann eine für den Konstrukteur schwer durchschaubare Beeinflussung der **Auslegung** sein (Bild 5.3.1-4). Sie ist ohne ausreichende Erfahrung nicht ausreichend sicher einschätzbar.

Dabei geht es nicht immer um bekannterweise aggressive Gase bzw. von einer Strömung mitgeführte Verunreinigungen. Gerade Gase, Atmosphären und Umgebungsbedingungen von denen man auf Grund von Angaben zur Reaktionsfreundlichkeit mit Konstruktionswerkstoffen keine Gefahr erwarten würde, können sich als äußerst schädlich erweisen.

Meeresatmosphäre ist nahezu überall zu erwarten, nicht nur in unmittelbarer Meeresnähe. Das sollte beispielsweise vorsichtshalber für ganz Europa gelten. Als äußerst korrosiv verhält sich ein Elektrolyt mit Kochsalz (NaCl) in wässriger Lösung. Dieser kann sich mit der Lösung trockener Salzablagerungen in Schwitzwasser oder Luftfeuchtigkeit bilden. Es ist also nicht notwendig, dass Meerwasser direkt (z.B. als Gischt) einwirkt.

Eine Meersalzlösung kann werkstoffspezifisch nahezu alle Korrosionsformen auslösen. Auch nach einer Verdampfung kann das zurückbleibende Salz als Schmelze Heißgaskorrosion auslösen (Bild 5.3.1-3 und Kapitel 5.6.3). Besonders bemerkenswert ist, dass mit der Festigkeit martensitischer (Vergütungs-) Stähle der absenkende Einfluss auf die statische und dynamische Festigkeit immer gefährlicher wird. Es ist mit Spannungsrisskorrosion (Kapitel 5.6.3.1 und Schwingungsrisskorrosion (Kapitel 5.6.3.2) zu rechnen. Dabei spielt häufig eine Versprödung durch Wasserstoff als Reaktionsprodukt eine Rolle (Bild 5.7.1-4).

#### Merke:

Je höher die Festigkeit/Härte (über 30 HRc) eines martensitischen Stahls, umso gefährlicher ist Risskorrosion.

Wasserstoff ist aus der Sicht einer Korrosionsgefahr eher unbedenklich. Es sind jedoch andere Auswirkungen die Anlass zur Sorge geben. Gefährlich ist die Diffusion atomaren Wasserstoffs in Metalle. Weil durch Rekombination sofort Wasserstoffmoleküle entstehen die zu groß für eine solche Diffusion sind, scheint das Risiko gering. Es reicht jedoch aus, dass atomarer Wasserstoff an der Metalloberfläche als Reaktionsprodukt entsteht (Korrosion, Atzen). Er kann besonders in einerRisspitze versprödend wirken und katastrophales Bauteilversagen unterstützen (Bild 5.7.1-4). Atomarer Wasserstoff kann ebenfalls bei hohen Temperaturen (z.B. Schweißen "D") in feuchtem Schutzgas entstehen. Er wird von der Schmelze begierig aufgenommen (Bild 5.7.1-3) und wirkt sich nach dem Abkühlen auch nach längerer Zeit versprödend aus.

Atomarer Wasserstoff steht auch in dem Verdacht sich an frischen, hoch reaktiven Metalloberflächen zu bilden (Katalysatoreffekt, "C") und einzudiffundieren.

Dabei kann sich nicht nur Wasserstoffgas zersetzen, sondern auch wasserstoffhaltige Gase (z.B. Erdgas, "E"). Diese Bedingung ist im Bereich plastischer Verformungen (z.B. an kleinen Kerben) gegeben, also gerade in besonders hochbeanspruchten Zonen die wegen der Aufweitung die Diffusion begünstigen. Dieser Effekt darf bei Konstruktionen wie Brennstoffzelle ("F") und Wasserstofftanks nicht vergessen werden. Gegebenenfalls können besondere Oberflächenbehandlungen wie Verfestigen oder Beschichtungen notwendig werden. Weil Wasserstoff reduzierend wirkt, kann er schützende Oxidschichten schädigen oder den Aufbau verhindern. Damit ist das Gleitverhalten betroffen. So ist ein Kaltverschweißen (Fressen) leichter möglich (Kapitel 5.9.2).

**Edelgase**, (Schutzgas) wirkt selbst nicht korrosiv. Trotzdem besteht auch hier die Möglichkeit, dass funktionsnotwendige Oberflächeneigenschaften (Gleitfähigkeit), insbesondere durch Oxidbildung nicht auftreten.



Die Erfahrung hat gezeigt (**Heliumturbine** und Heliumkreisläufe in **Kernreaktoren**, "**B**"), dass offenbar selbst kleine Mengen von **Verunreinigungen** (z.B. Eisenoxide) in Edelgasen (z.B. Helium) Rissbildung zumindest unterstützen (an hochfester Nickel-Schmiedelegierung), wenn nicht im Bereich kleiner Kerben auslösen kann.

Vakuum: Dafür gilt Ähnliches wie für Edelgase. Es verhindert die Bildung schützender Oxide und unterstützt so Kaltverschweißen. Der Angriff von Verunreinigungen wird begünstigt.

Seite 5.3.1-4



Bild 5.3.1-2: Zunächst denkt man gewöhnlich an einen Abfall der statischen Festigkeit (Spannungsrisskorrosion, Kapitel 5.6.3.1) und Schwingfestigkeit (Schwingungsrisskorrosion, Kapitel 5.6.3.2) durch korrosive Schädigung. Darüber hinaus wird das bruchmechanische Verhalten (Skizzen unten) verschlechtert. Es kommt früher zum Anriss, der Rissfortschritt wird beschleunigt und der Bruch erfolgt bei einer kleineren (kritischen) Risslänge (Bild 4.3-3). Jedoch auch ohne Korrosionseinfluss treten in manchen Umgebungen (Bild 5.3.1-0 und Bild 5.3.1-1) Effekte auf, die der Konstrukteur unbedingt zu berücksichtigen hat.

Können sich keine erwünschten Schutzschichten (korrosionshemmend, Skizze unten rechts; reibungsmindernd) bilden, ist mit funktionellem Versagen zu rechnen. Damit ist im Schutzgas, Wasserstoff oder Vakuum zu rechnen.

Kaltverschweißen (Fressen, Kapitel 5.9.2) führt zum Blockieren beweglicher Teile wie Gelenkverbindungen oder Kolben (Skizze oben links).

Verschleißvorgänge können sich beschleunigend und/oder verstärkend schädigend auswirken. Damit wirkt sich auch die Kerbwirkung und der Schwingfestigkeitsabfall in Zonen mit Schwingverschleiß (Fretting, Kapitel 5.9.2) gefährlich aus.



Bild 5.3.1-3 (Lit. 5.3.1-2): Die mit dem Verbrennungsvorgang in Kontakt stehenden Komponenten ("A" bis "E") von Müllverbrennungsanlagen sind extremen korrosiven und erosiven Einflüssen ausgesetzt (Bild 5.6.1.4.2-3). Die Vorgänge sind äußerst komplex (Bild 5.3.1-4). Erschwerend ist das Zusammenwirken bzw. die gegenseitige Beeinflussung der Effekte (Korrosion, Erosion, Kapitel 5.6.2). Sie können vom Konstrukteur nur mit ausreichender **produkt- bzw. anlagen**spezifischer Erfahrung befriedigend berücksichtigt werden.

Bild 5.3.1-4 (Lit. 5.3.1-2 und Lit. 5.3.1-3): Hier soll ein Eindruck von der Komplexität der Abläufe und des Zusammenwirkens der Einflüsse auf die Heißgaskorrosion in einer Müllverbrennungsanlage vermittelt werden. Es han-

Dieses Schema soll einen Eindruck der komplexen chemischen Vorgänge der Heißgaskorrosion in einer Müllverbrennungsanlage vermitteln.



delt sich um ein dampfführendes Rohr im Feuerraum (Bild 5.3.1-3). Interessant ist die Dickenverteilung der Ablagerungen. Auf der Beaufschlagungsseite ist die Schicht besonders dick mit charakteristischer Zerklüftung. Sie bildet sich aus den von der Heißgasströmung mitgeführten Verunreinigungen. Die chemischen Vorgänge sind in Bild 5.6.1.4.2-3 dargestellt.

## 5.3.1.1 Einfluss der Betriebsatmosphäre auf Kunststoffe und Verbunde, insbesondere FVK.

Unter dem Begriff **Chemische Beständigkeit** als einer Bewertung **versteht man** das Verhalten eines Werkstoffs auf die chemische Wirkung der Betriebsatmosphäre. Darüber gibt es für den Konstrukteur brauchbare frei zugängliche Literatur (Lit. 5.3.1-6 und Lit. 5.3.1-7). Kunststoffe erleiden dabei im Gegensatz zu Metallen keine entsprechende Korrosion. Sind sie chemisch beständig, unterliegen sie jedoch anderen Schäden bzw. Schadensmechanismen.

- Zeitlicher Festigkeitsabfall (Bild 3-23),
- Auflösung/Materialabtrag,
- Werkstoffveränderung,
- Volumenveränderung (Quellen oder Schrumpfen). Hier ist besonders auf Maßänderungen eng tolerierter Bauteile wie Lagerbuchsen zu achten (siehe Band 2 Kaptel6.3.2 und Kapitel 6.3.3).
- Spannungsrissbildung (Bild 5.6.3.1.1-11 und Bild 5.6.3.1.1-12)
- Versprödung.

Kunststoffe unterliegen besonders **physikalischen Schädigungsmechanismen** (Bild 5.3.1-5). Dazu gehören zunächst Eigenschaftsänderungen durch **Temperatur** und **Feuchtigkeit**. Auch **Licht**, insbesondere **UV-Strahlung** und **Röntgen-/Gammastrahlen** wirken schädigend (Versprödung). In diesem Zusammenhang spielen **Auslagerungsversuche** (Bewitterung) ene wichtige Rolle. Insbesondere hat sich die Feuchtigkeitswirkung von **Tau** als einflussreich erwiesen. Sie sind zumindest für 'Außenteile' unbedingt anzuraten.

Zusammenstellung konstruktionswichtiger Eigenschaften und des schadensrelevanten Verhaltens ausgewählter Kunststoffe:

**PMMA** (Polymethylmethacrylat = **Plexiglas** ®/Acrylglas): Witterungs- und alterungsbeständig. Tolerant gegen Säuren und Laugen, Benzin, Öl, Rissbildung (Craquellée) bei Einwirken von Alkohol, Lösungsmitteln wie Aceton, Benzol. Versprödet und vergilbt bei längerer Einwirkung intensiven UV-Lichts, sehr spannungsrissempfindlich bei Kontakt mit **Alkohol und Lösungsmitteln**. Durch gezielte Variation lassen sich diese Probleme minimieren.

**PC** (Polycarbonat): Es handelt sich um eine weitgehend witterungs- und strahlungsbeständige Werkstofffamilie mit hoher Festigkeit, Steifigkeit und Schlagzähigkeit. Unbeständig gegen **Chlorierte Kohlenwasserstoffe** (z.B. Methylenchlorid) und **alkalisch wässrige Lösungen** (Amine, **Ammoniak**).

**PA** (Polyamid = als Fasern Nylon, Perlon): Thermoplast. Hochfest, steif und zäh mit guten Gleitund Verschleißeigenschaften. Das nutzt man z.B.bei Schrauben, Zahnrädern, Lagern, Laufrollen und Motorkomponenten. **Nimmt aus Umgebungsfeuchtigkeit reversibel Wasser auf**. Das senkt die **Schlagzähigkeit** und führt zum **Quellen**. Diese **Volumenvergrößerung** kann zum **Blockieren von Gleitlagern** führen. **Glasfasern und Kohlefasern** erhöhen durch Mikrospalte mit Kapillarwirkung eine **Hydrolyse**.





**PVC** (Polyvinylchlorid) ist ein Thermoplast mit guter Chemikalienbeständigkeit, insbesondere bei Ölen. Lichtbeständig. Weiter Anwendungsbereich durch Beeinflussung von Härte und Zähigkeit mit **Weichmachern**. Beständig gegen Säuren, Laugen, Alkohol und Benzin. Unbeständig gegen konzentrierte **Salzsäure, Aceton, Chloroform, Benzol und Äther**. Der Cl-Gehalt kann bei Erhitzung /Verbrennen frei werden (umweltbedenklich).

**POM** (Polyoxymethylen) ist ein Thermoplast. Ausgezeichnet durch Festigkeit, Härte, Zähigkeit (bis -40°C) und Steifigkeit (dimensionsstabil) und thermische Stabilität (Betriebstemperaturen bis 130°C). Geeignet für Zahnräder, Federn, Ketten, Schrauben, Muttern, Lüfter-/Pumpenräder und Ventile (Bild 3-23). Problematisch ist die Freisetzung von Formaldehyd bei zu hohenVerarbeitungstemperaturen.

**PE** (Polyethylen): Man unterscheidet in Abhängigkeit von der Dichte **PE-LD** und **PE-HD**. Die chemische Beständigkeit gegenüber Säuren, Laugen und vielen Chemikalien und Lösungsmitteln bei Raumtemperatur ist gut, die Wasseraufnahme gering. Anwendung in Pumpen, Zahnrädern und Gleitlagern (Buchsen). Probleme: Versprödung bis zum Zerfall durch Sonneneinstrahlung Durchlässig für Sauerstoff, CO<sub>2</sub> und Aromastoffe. Deshalb z.B. für Schutzgasleitungen an Schweißanlagen nicht geeignet.

**PP** (Polypropylen): Thermoplast mit hoher Temperaturbeständigkeit (bis ca. 120°C) dessen Eigenschaften sich bei der Herstellung weit einstellen lassen. Bei Raumtemperatur beständig gegenüber den meisten organischen Lösungsmitteln, Säuren, Laugen und Chemikalien. Angriff durch stark oxidierende Chemikalien. Bei **höheren Temperaturen Löslichkeit in polychlorierten**  Kohlenwasserstoffen und Xylol. Umfangreiche Anwendungen, insbesondere Gehäuse und Schalengeometrien im Maschinen- und Fahrzeugbau.

**PTFE** (Polytetrafluorethylen), **FEP** (Tetrafluorethylen-Perfluorpropylen) und **PFA** (Perfluorkoxpolymer):Betriebstemperaturbereich von PTFE -200°C bis +300°C, FEP und PFA -100 °C bis + 200°C. Oberfläche ist nicht adhäsiv, damit herausragende Gleiteigenschaften (Reibbeiwert, Verschleiß). Hervorragende Chemikalienbeständigkeit außer gegenüber Fluor. Vollkommen inert zwischen -270 °C bis +260 °C. Kein Quellen und Schrumpfen. Anwendung besonders in der Dichtungstechnik (z.B. 'Kolbendichtungen' und Radialwellendichtringe für die Nahrungsmittelindustrie) und **Lagerbuchsen** (Lit. 5.3.1-14 und Band 2 Kapitel 6.3.2 und Kapitel 6.3.3).

Probleme bei der Enwirkung der Betrierbsatmosphäre auf **Faserverstärkte Kunststoffe** (FVK) behandelt Bild 5.3.1-6.



**Bild 5.3.1-5.1** (Lit. 5.3.1-16 und Lit. 5.3.1-17): Die Durchdringung (**Permeation**) von Gasen und Flüssigkeiten durch Kunststoffe/Polymere kann vielerlei schädliche Auswirkungen auf technische Systeme haben. Typisch sind

- Verunreinigungen mit Eigenschaftsveränderungen von Medien. Dazu gehören auch Lebensmittel.
- *Korrosion* (z.B. bei Sauerstoffanreicherung in Wasser).
- Umweltbedenkliche Leckagen (Gifte, Klimaschädigung).
- Sicherheitsrelevante Lecks (z.B. Wasserstoff und andere brennbare Gase).
- Gasleitungen (Erdgas, Biogas, Prozessgase, Schutzgase, Kraftstoffdämpfe).
- Nahrungsmittel in Verpackungen und Behältern (z.B. Kunststoffflaschen).
- Chemikalien wie in **Sprays** (z.B. Lacke, Reinigungs-/Lösungsmittel).
- Leitungen (z.B. PE-Schläuche) von Schutzgasen (z.B. Argon). Hier kann es zur Verunreinigung durch Wasserdampf aus der umgebenden Luftfeuchtigkeit kommen (Gasosmose). Damit entsteht die Gefahr einer Wasserstoffversprödung beim Schweißen martensitischer Stähle (Bild 5.7.1-3).
- Sauerstoffanreicherungen in Fußbodenheizungen (Gasosmose).

Die Permeation wird vom **Permeationskoeffi**zient charakterisiert. Sie erfolgt in den 4 dargestellten **Phasen**. Zunächst sammelt sich das Permeat an der unter höherem Druck stehen-

den Membranoberfläche und dringt dann in diese ein. Darauf erfolgt eine Diffusion durch die Membrane. Zuletzt kommt es zum Austritt auf der Seite niedrigeren Drucks. Nach einiger Zeit stellt sich ein Permeationsgleichgewicht ein. Dabei tritt die gleiche Menge aus wie in die Membrane ein (Diagramm). Bei Flüssigkeiten kann diese als semipermeable Membrane wirken. Sie ist für das Permeat nur in Richtung eines Konzentrationsausgleichs durchlässig. Das gilt auch gegen erhöhten Druck. Man spricht von Osmose (Lit. 5.3,1-18). Die Unterscheidung in der **Definition** gegenüber Permeation ist offenbar nicht einfach. Sicher ist, beide Vorgänge beruhen auf Diffusion.

In der Literatur findet man das folgende **Beispiel**: Eine, **Methan** mit 5 bar führende Erdgasleitung aus PE (Polyethylen) mit 10 cm Nennweite verliert auf eine Länge von 1 km in einem Jahr ca. 3,5 m<sup>3</sup> Gas. Das ist offenbar bei langen Leitungsnetzen eine bereits nicht mehr tolerierte Menge (z.B. Klimaschädlichkeit). Sammelt sich das Gas in ötlich an kann durchaus ein gefährlich explosives Gemisch entstehen.

**Bild 5.3.1-6** (Lit. 5.3.1-9 bis Lit. 5.3.1-13): Faserverstärkte Kunststoffe werden besonders im Leichtbau immer wichtiger. Besonders die Eigenschaften der **Matrix** (Kunsdtharz, sowohl Thermo- als auch Duroplaste) werden von Umgebungseinflüssen, besonders **Feuchtigkeit** und **Temperatur** verändert (Ausnahmern Aramid- und Naturfasern).

#### Feuchtigkeitseinfluss:

-Gewichjt. Dies ist auch bei geringer Wasseraufnahme von großen Leichtbau-Bauteilen wie Flugzeugzelle und -flügel, auch wenn reversibel zu berücksichtigen.

- Absinken der Glasübergangstemperatur (Erweichungstemperatur) von Kunststoffen mit kristallinem Anteil (Insbesondere die Duroplast Epoxid- und Polyesterharz). Er trennt den spröden 'Glasbereich' vom gummieleastischen (Fließ) Bereich. Besonders Feuchtaaufnahme (hot-wet-Klima) 'erweicht' die Matrix.Als Test dient der sog. 'Boiltest' bei dem dass Bauteil mehrere Stunden in kochendem Wasser verbleibt.

- Abfall desw Elastizitätsmoduls
- Eigenspannungen durch Quellen.

Das ist vom Konstrukteur zu berücksichtigen. Besonders Glasfaserverstärktes Polyester (GFK) kann durch Osmose (Wasserdampfdiffusion) und nachfolgend Reaktionen mit Wasser swchwer geschädigt werden ('Bläschenkrankheit', 'GFK-Pest', Lit. 5.3.1-9).Im fortgeschrittenen Stadum bilden sich erkennbare Bläschen an der Oberfläche. Zunächst diffunbdiert das Wasser ein und wandert den Glasfasern entlang wobei sich das Harz ablöst. Die Biegefestigkeit kann bis zu 25 % abfallen wobei auch die Steifigkeit signifikant abnimmt.. Beispielsweise kann sich dies deutlich in einer größeren Durchbiegung des Bauteils unte Eigengewicht(Boote) und/oderäußerer Krafteinwirkung (z.B. Transport) Dieser Vorgang wird bei höherer wassertemperatur (z.B. Tropen) deutlich beschleunigt. Ein sicherer Nachweis von Osmoseschäden im Frühstadium ist nicht enfach und erfordert Erfahrung. Prüfverfahren sind:

- Feuchtigkeitsprüfung mit Feuchtigkeitsmessgerät.
- Röntgenrückstreutechnik.
- Thermogrrafie mit Ultraschall, Wärmebildkamera und dynamisch.
- 'Endoskopie' durch absaugen der Flüssigkeit und anschließende Laboruntersuchung.
- -Haftfestigkeitsabfall Faser-Matrix (siehe unten 'Osmose').
- Festigkeitsabfall der Matrix.
- Anstieg der inneren Dämpfung.
- Zunahme der Bruchehnung der Matrix. Osmoseschäden.

**Temperatureinfluss**: Von Veränderungen und Schädigungen ist in erstzer Linie die Matrix betroffen. Zu den Veränderngen mit ansteigender Temperatur zählt ein Anstieg der

- Feuchteaufnahme (siehe vorher).
- Diffusionsgeschwindigkeit von Medien.
- Reaktion/Angriff durch Medien.



- Alterung.
- Dämpfung-
- Schlagzähigkeit (!).
- Bruchdehnung (!).

- Ablösung der Faser von der Matrix.

Im Mikrobereich treten Wärmespannungen zwischen Faser (kleine Wärmedehnung, z.B. Kohlefaser, Glasfaser) und Matrix/ Kunstharz(große Wärmedehnung) auf. Sie schwächen den Verbund.

Makrospannungen entsehen zwischen Schchten eines Verbunds (Laminat). Die unterschiedli-

che **Wärmedehung längs** und **quer** zur Faserorientierung ist der Grund für die Zunahme mit dem **Winkelunterschied**.

Das Erweichen der Matrix mit der Temperatur macht sich besonders in den **matrixbestimmten Steifigkeiten** quer zur Faserorientierung bemerkbar. Auch insbesondere die Druckfestigkeit quer zur Faser ist betroffen. Die **Einsatzgrenze des Verbunds** wird harzspezifisch vom Glasübergang, Schmelzen oder Zersetzen bestimmt.

## Literatur zu Kapitel 5.3.1

- 5.3.1-1 A.Rossmann, "Untersuchung von Schäden als Folge thermischer Beanspruchung", Beitrag aus J.Grosch "Schadenskunde im Maschinenbau", Band 308, aus der Reihe "Kontakt & Studium Maschinenbau", Expert Verlag, ISBN 3-8169-1202-8, 2. Auflage 1995, Seite 162-187.
- 5.3.1-2 C.Schroer, J.Konys, "Rauchgasseitige Hochtemperatur-Korrosion in Müllverbrennungsanlagen - Ergebnisse und Bewertung einer Literaturrecherche", Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Technik und Umwelt, Wissenshaftlicher Bericht FZKA 6695, ISSN 0947-8620, 2002, Seite 1-85.
- **5.3.1-3** W.Spiegel, W.Schmidt, T.Herzog, "Korrosion in bayerischen MVA Bewertung von Korrosionsprozessen als Bestandteil einer vorausschauenden Instandhaltung", Beitrag der Fachtagung: Optimierung der Abfallverbrennung, www.chemin.de, 2002, Seite 1-20.
- **5.3.1-4** M.Rudschuck, "Spannungsrisskorrosion bei Kunststoffen Ursachen und Strategien zur Vermeidung", DKI Darmstadt, 2010, Seite1-7.
- **5.3.1-5** "Die chemische Beständigkeit der Kunststoffe Einflüsse und Verhalten", HERAAG Kunststofftechnologie, www.heratech.ch, Stand 2010, Seite 1-23.
- **5.3.1-6** "Chemische Beständigkeit von Kunststoffen", Tabellen, Bürkle GmbH, www.buerkle.de, Version 2.0e (29.07.2003), Seite 1-35.
- **5.3.1-7** "Spannungsrissprüfung Makrolon® Formteile", Global Innovations Polycarbonates - Bayer MaterialScience AG, www.bayermaterialscience.de, Ausgabe 2007-10-17, Seite 1-4.
- **5.3.1-8** U.Krupp, "Mikrostrukturelle Aspekte der Rissinitiierung und -ausbreitung in metallischen Werkstoffen", Habilitationsschrift, Universität Siegen, urn:nbn:de:hbz:467-922, Februar 2004, Seite 172-194.
- **5.3.1-9** H.D.Scharping, "Osmose immer wieder? Neue Erfahrungen", www.gutachterbootsdbau.de, Stand Jan. 2011, Seite 1-6.
- **5.3.1-10** "Die Masshaltigkeit von Kunststoff-Formteilen", Fa. Hera AG Kunststofftechnologie, www.heratech.ch, Stand Jan. 2011, Seite 1-16.
- **5.3.1-11** "Wasseraufnahme", Lexikon Kunststoffprüfung, http://polymer.joppnet2.biz/, Stand Jan 2011, Seite 1 und 2.

- 5.3.1-12 "Glasübergangstemperatur", de.wikipedia.org, Stand Februar 2011, Seite 1 und 2.
- 5.3.1-13 "Faser-Kunststoff-Verbund", de.wikipedia.org, Stand Nov.2010, Seite 1-12.
- **5.3.1-14** M.Tschacher, F.Gübitz, "PTFE im Maschinenbau", Zeitschrift "Werkstatt und Betrieb", 101.Jahrgang 1968 Heft 12, Seite 717-725.
- **5.3.1-15** H.Walter, "Morphologie-Zähigkeits-Korrelationen von modifizierten Epoxidharzsystemen mittels bruchmechanischer Prüfmethoden an Miniatureprüfkörpern", Dissertation 2003, http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de Seite 93-106.
- **5.3.1-16** G.Müller-Syring, "Permeation von Gasen durch Kunststoffrohrleitungen", Zeitschrift "Energie / Wasserpraxis" 12,/2006 DVGW Jahresrevue, www.dbi-gut.de, Seite 70-73.
- **5.3.1-17** M.Orzinski "Untersuchung der Permeation nvon anorganischen Gasen und organischen Verbindungen durch barriereverbesserte Kunstsdtoffflaschen und ihre messtechnische Erfassung", Dissertgtation, Berlin 2007 D83, opus.kobv.de/tuberlin/ volltexte/2007/1491/pdf, Seite 1-102.
- 5.3.1-18 "Osmose", http://de.wikipedia.org/wiki/Osmose, Stand 16. 04. 2012, Seite 1-16.

# 5.3.2 Zeitstand und Kriechen (Statische Belastung unter Temperatureinfluss)



Die Temperatur, ab der von **Zeitstandbeanspruchung** gesprochen werden kann, ist werkstoffspezifisch (Bild 5.3.2-1). Ist diese erreicht, muss auch die **Belastungszeit** berücksichtigt werden. Damit wird das **Werkstoffverhalten sehr viel komplexer**. Zusätzlich verändern sich nahezu alle Auslegungskennwerte (Bild 5.3.2-2).

Werden Werkstoffe zeitstandbelastet, ist neben der Festigkeit (Zeitstandfestigkeit) auch das zeitabhängige **plastische Dehnverhalten** (Kriechen, Bild 5.3.2-3) zu berücksichtigen. Zeitstandfestigkeit und Kriechdehnung sind somit wichtige Auslegungsparameter. Nach Lit. 5.3.2-10 wird **Zeitstandfestigkeit** als die Prüfspannung definiert, die bei der Prüftemperatur und Beanspruchungsdauer zum Bruch führt. Die **Zeitdehngrenze** ist entsprechend definiert. Sie gibt die Belastungsdauer an, bei der eine festgelegte plastische Dehnung (Kriechen) auftritt. Man kann davon ausgehen, dass die Heißteile in einer Maschine dieser kombinierten Beanspruchung aus Temperatur und mechanischen Spannungen unterliegen. Selbst wenn keine äußerlich erkennbaren Kräfte vorhanden sind, induziert doch ein Temperaturgradient unterschiedliche Wärmedehnungen und, wenn diese behindert werden, Spannungen im Bauteil (Bild 5.4.2.1-2 und Bild 5.4.2.1-3).

Zeitstandeffekte treten vielfältig auf. So beruht die **Relaxation** (Spannungsabbau eines dehnungsgesteuerten Systems, Bild 5.4.2.1-2) von Eigenspannungen auf Kriecheffekten. Sie wird beim Spannungsarmglühen und thermischen Richten bei örtlicher Erwärmung genutzt (Bild 4.5.1-3). Relaxation kann durchaus bereits bei Raumtemperatur auftreten, obwohl der Werkstoff für Betriebstemperaturen von mehreren hundert °C geeignet ist. Ein solches Verhalten zeigen kugelgestrahlte Titanlegierungen. Trotzdem bleibt ein ausreichender Teil der gewünschten induzierten Druckeigenspannungen. Kriechen bei Betriebstemperatur erfordert jedoch ein regelmäßig wiederholtes regeneratives Kugelstrahlen.

## 5.3.2.1 Grundlagen des Zeitstandverhaltens (Werkstoffeigenschaften, Schadensmechanismen, Merkmale)

Metallische Werkstoffe, die bei gleich bleibender, werkstoffspezifischer erhöhter Temperatur (ca. 0,2 bis 0,3 x Schmelztemperatur; Bild 5.3.2-1) unter mechanischer Beanspruchung stehen, erfahren eine zeitabhängige plastische Verformung, sie kriechen. Diese **Kriechdehnung** hält an bis es zum Zeitstandbruch kommt (Bild 5.3.2-3).

Der Konstrukteur orientiert die Auslegung kriechbeanspruchter Bauteile nicht an der **Warmzerreißfestigkeit** die im Kurzzeitversuch ermittelt wird. Diese Kurzzeitfestigkeit ist eher für Abschätzungen des **Versagens bei Kurzzeitüberlastungen** wie Berstdruck oder -drehzahlen interessant. Die lebensdauerrelevante Werkstoffeigenschaft ist die **Zeitstandfestigkeit** (z.B. 1000 h, Bild 5.3.2-2) und/oder die **Kriechdehngrenze** (z.B. 0,1%) bei einer bestimmten Temperatur und Zugbelastung. Für die Darstellung dieser Kennwerte verwendet man Zeitstand-Diagramme mit den drei Parametern, Temperatur, Belastung und Zeit.

Natürlich wird man zur Erzielung eines hohen thermischen Wirkungsgrads hohe Prozesstemperaturen anstreben und dazu möglichst kriechfeste Werkstoffe nutzen. Im Extremfall kommen Superlegierungen auf Ni-Basis zum Einsatz. Sie verdanken ihre hohe Kriechfestigkeit der  $\gamma$  **'-Aushärtungsphase** (Ni<sub>3</sub>Al). Allgemein lässt sich sagen, dass Gusswerkstoffe bei hohen Betriebstemperaturen auf Grund ihrer Gefügemerkmale und/oder der Legierungszusammensetzung die bessere Kriechfestigkeit aufweisen. Bei typisch hohem Al-Gehalt für einen hohen Anteil der Aushärtungsphase sind sie nicht mehr schmiedbar. Steht die Festigkeit bei ausreichender Zähigkeit (Duktilität) wegen einer LCF-Beanspruchung (Kapitel 5.4.1) z.B. in Turbomaschinen im Vordergrund, kommen Schmiedewerkstoffe zur Anwendung.

Ist eine möglichst hohe Bauteiltemperatur bei geringer Kriechdehnung gefordert, können weniger zähe Gusslegierungen besser geeignet sein. Besonderer Schwachpunkt sind meist die quer zur Beanspruchungsrichtung orientierten Korngrenzen (Bild 5.3.2-6 und Bild 5.3.2-7). Allgemein gilt der Trend, dass mit der Korngröße die Zeitstandfestigkeit steigt. Leider fällt dabei tendenziell die Schwingfestigkeit. Die Kriechfestigkeit lässt sich mit gerichtet erstarrten Legierungen und Einkristallen weiter anheben (Bild 5.3.2-2). Ein anderer Ansatz ist die Kriechverformung durch gezieltes Einbringen von Verstärkungen wie feinsten Partikeln (Dispersionshärtung) zu erschweren.

Der Kriechprozess kann in Abhängigkeit von Temperatur und Spannung unter **sehr unterschiedlichen Mechanismen** im Gefüge ablaufen (Bild 5.3.2-6 und Bild 5.3.2-8). Bei vielen Werkstoffen entstehen Kriechporen (engl. creep voids) auf den Korngrenzen. Sie können als Kennzeichen der **Kriechschädigung** dienen und lassen diese grob abschätzen. Entsprechend sind bei ausreichender bauteilspezifischer Erfahrung Rückschlüsse auf die Restlebensdauer möglich (Bild 5.3.2-9).

Werkstoffe von Heißteilen werden aus **Kosten- und Gewichtsgründen** grundsätzlich, in Abhängigkeit von der mechanischen Belastung, in ihrem **Temperaturgrenzbereich** eingesetzt. Unter dieser Annahme gilt für alle Werkstoffe: **Eine Temperaturerhöhung um 15** °C verringert die Kriechlebensdauer auf die Hälfte (Bild 5.3.2-4). Scheinbar geringfügige Veränderungen im Wärmehaushalt des Bauteils können also gravierende Folgen für Kosten und Sicherheit einer ganzen Anlage haben.

Kriechdehnung kann auf sehr unterschiedliche und vielfältige Weise Bauteile schadensfördernd beeinflussen. Diese Effekte sollten besonders **dem auslegenden Konstrukteur bewusst** sein. Eine Zusammenstellung zeigt Bild 5.3.2-10. Für das Werkstoffverhalten bei erhöhten Temperaturen gilt gegenüber Raumtemperatur: Es wird alles sehr viel komplizierter.



Bild 5.3.2-1: Eine wichtige Frage ist die nach der Grenztemperatur für einen Werkstoff, ab der Kriechen schadensrelevant wird. Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten. Sieht man davon ab, dass Relaxationsvorgänge (Kapitel 4.5.1.1), z.B. ein gewisser Abbau durch Kugelstrahlen induzierter Druckspannungen in Titanlegierungen bereits bei Raumtemperatur auftritt, lässt sich die Temperatur ab der schadensrelevantes Kriechen beginnt als das 0,2 bis 0,3-fache der jeweiligen Schmelztemperatur definieren. Das Schaubild zeigt entsprechend die sinnvolle Einsatzgrenze des Kugelstrahlens als Anhaltswert für den Beginn des auslegungsrelevanten Kriechens (Lit. 5.3.2-9).

**Bild 5.3.2-2:** Oben links ist die Zeitstandfestigkeit für 10 000 h eines **Kesselrohr-Werkstoffs** angegeben. Die Streuung wird allein auf die **Wärmebehandlung der Neuteile** zurückgeführt (Lt. 5.3.2-12).

Das Diagramm rechts oben zeigt typische Kriechkurven für eine Betriebstemperatur von 150°C von **Al- und Mg-Legierungen** des modernen Leichtbaus bei Verbrennungsmotoren (Bild 3-15).

Die 1000h **Zeitstandfestigkeit** kann für militärische Anwendungen bereits als Bewertungsmaßstab für den Einsatz in Turbinenschaufeln dienen (Diagramm unten).

Die Kurve "N90" steht für Schmiedelegierungen (Produktbezeichnung: Nimonic) wie sie in älteren Triebwerkstypen aus einem Entwicklungszeitraum der 50er und 60er Jahre zur Anwendung kamen.

"IN713" kann als ein Standard-Gusswerkstoff mit ungerichteter Struktur betrachtet werden.



Die Einkristallegierungen erhöhen die maximale Betriebstemperatur um nochmals ca. 30°C. Das bedeutet bei gleicher Temperatur die zwei- bis vierfache Lebensdauer gegenüber ungerichtetem Guss.

**Dispersionsgehärtete Legierungen** weisen fein verteilte keramische Partikel im Gefüge auf, welche die Kriechverformung minimieren. Sie haben sich bisher auf Grund ihrer Sprödigkeit und problematischen Herstellung nicht durchgesetzt.

Metallische Werkstoffe haben bei hohen Temperaturen nur eine begrenzte Lebensdauer. Sie dehnen sich auf typische Weise plastisch ("Kriechen") bis zum Bruch. Man spricht von Kriech- bzw. Zeitstandbruch.



**Bild 5.3.2-3:** Metallische Werkstoffe unter statischer Last verformen sich während der Belastungszeit bei erhöhter Temperatur plastisch (Kriechen) und versagen beim Erreichen der Bruchkriechdehnung. Dieser Vorgang verläuft nach der **Kriech- oder Zeitstandkurve** (gleichbleibende Temperatur und statische Zugbeanspruchung), die hier in typischer Form dargestellt ist. Je nach Werkstoff, Beanspruchungshöhe und Temperaturniveau kann sich die Kurve deutlich verändern, indem sich die drei typischen Phasen des Verlaufs sehr unterschiedlich ausprägen.

Der Kurvenverlauf ist charakteristisch für einen Vorgang, bei dem zwei gegenläufige Effekte wirken. Im vorliegenden Fall ist die Verfestigung (Ausheilung) als schwarzer Pfeil und die **Entfestigung** (Schädigung) als weißer Pfeil dargestellt. Je nach Beanspruchungsphase überwiegt die Verfestigung (primärer Kriechbereich "I"), sind beide Einflüsse etwa gleich groß (sekundärer Kriechbereich "II") oder überwiegt die Entfestigung (tertiärer Kriechbereich ",III") kurz vor dem endgültigen Versagen durch Bruch. Die gesamte Lebensdauer unter Zeitstandbeanspruchung wird als Standzeit bezeichnet. Technisch genutzt werden die Bereiche "I" und "II" die auch die Auslegung der Bauteile bestimmen.

Bild 5.3.2-4: Einen besonderen Einfluss auf die Kriechgrenze- bzw. Standzeit haben Belastung und Temperatur. Ein zeitstandbeanspruchtes Bauteil, insbesondere mit einer Kühlung, weist gewöhnlich ausgeprägte Temperatur-Gradienten auf (Skizze oben). Die Temperaturverteilung ist für den Konstrukteur eine Basis für die Auslegung des Heißteils. Dabei muss die lebensdauerbestimmende Bauteilzone bekannt sein. Das mittlere Diagramm zeigt im logarithmischen Maßstab auf beiden Achsen die typische Temperaturabhängigkeit des Zeitstandverhaltens eines Ni-Basis-Gusswerkstoffs. Die Betrachtung gilt allgemein für metallische Werkstoffe die im Grenzbereich der Einsatztemperatur betrieben werden. Dies ist nicht etwa ein seltener Fall sondern üblich. Es wäre nicht effizient, würde man die oft teuren Werkstoffe bei niedrigeren Temperaturen einsetzen. Geht man von einer gemittelten Temperatur im zeitstandkritischen Blattquerschnitt aus ("1") so erhält man über den Schnittpunkt ("2") der Kurve für 1030°C die Lebensdauer "L/2". Für eine 15 °C niedriger liegende Bauteiltemperatur erhält man die doppelte Lebensdauer "L". Umgekehrt verkürzt sich also die Lebensdauer auf die Hälfte bei einer Temperaturerhöhung um 15°C. Weil dieser Vorgang

exponentiell verläuft, bedeutet jede Temperaturerhöhung um weitere 15°C eine weitere Lebensdauerhalbierung. 45 °C entsprechen deshalb einer Lebensdauerverkürzung um nahezu den Faktor 10. Dieses Verhalten wird bei allen Heißteilwerkstoffen im Bereich der Einsatzgrenze (in der sie wegen ihres hohen Preises auch genutzt werden müssen) beobachtet. Man erkennt die Wichtigkeit, nicht auslegungsgemäße Temperaturerhöhungen zu vermeiden. Die Ursache für einen solchen Temperaturanstieg sind äußerst vielfältig:

- Abdriften von Sensoren: Verschmutzen von Pyrometerfenstern, Schädigung von Thermoelementen

- Verstopfen von Heißteilen: Staubablagerrungen in Kühlluftbohrungen und Kühlluftaustritten.

- Innere Oxidation
- Versagen von Wärmedämmschichten
- Reglerprobleme

- Probleme von **Brennkammern und Ein**spritzanlagen: Veränderung der Temperaturverteilung im Gasstrom.

Das Diagramm unten links zeigt die Veränderung der Kriechkurve mit der Temperatur. Auch hier erkennt man den bereits beschriebenen Einfluss auf die Kriechlebensdauer. Die Kriechdehnung wird mit der Temperatur deutlich schneller und größer. Die Kurven kennzeichnen Mittelwerte der "**Bruchkriechdehnung**".

Erhöht man die Zugbeanspruchung ist ein ähnliches Bild zu erkennen (Diagramm unten rechts). Hohe mechanische Spannung führt zu großer Kriechdehnung bei kurzer Lebensdauer.





Bild 5.3.2-5 (Lit 5.3.2-1, Lit. 5.3.2-13): Die Standzeit, d.h. die Zeit bis zum Kriechbruch, ist auch von der Umgebungsatmosphäre abhängig (siehe auch Kapitel 5.3.1). Wahrscheinlich wird die Fortschrittsgeschwindigkeit von Oberflächenanrissen besonders beschleunigt (Bild 5.3.1-0). Im Vergleich zu ruhender Luft wirkt bereits strömendes Heißgas schädigend. Eine besonders ausgeprägte Verkürzung der Lebensdauer wird bei Einwirkung von Meersalz beobachtet (siehe auch Bild 5.6.3.1.1-7).

Bild 5.3.2-6: Der Schädigungsmechanismus der Kriechverformung läuft werkstoff- und belastungsspezifisch unterschiedlich ab. Geringe Kriechdehnungen (sprödes Verhalten) laufen entweder mit Kriechporenbildung auf den quer zur Hauptzugspannung orientierten Korngrenzen ab oder es entstehen Risse in den Kornzwickeln (Skizzen links). Größere Kriechdehnungen gehen mit der Bildung von Kriechporen auch innerhalb des Korns und auf mehr in Belastungsrichtung orientierten Korngrenzen, einher. Eine besonders deutlich ausgeprägte Duktilität ergibt sich, wenn neben der Kriechschädigung ein gleich schneller gegenläufiger Mechanismus vorhanden ist. So erfolgt eine maximale Verformung mit ausgeprägter Einschnürung im Versagensbereich ohne Korngrenzenschädigung und Porenbildung. Dieser Effekt wird z.B. beim **superplastischen Umformen** genutzt.

Die Skizzen unten zeigen Mechanismen der Riss- bzw. Porenbildung. Porenbildung beruht auf Abgleitungen im Bereich von Korngrenzeninhomogenitäten (z.B. Karbide). An diesen Kerbstellen bzw. Gitteraufweitungen "kondensieren" die **Leerstellen** des Atomgitters indem sie dorthin wandern. Dieser Mechanismus bildet sich in mit dem REM (Bild 5.3-3) auswertbaren Bruchflächen und in metallografischen Schliffen (Bild 5.3-4) deutlich ab. Ausgepräg-



te **Porenbildung** ist erfahrungsgemäß bei Schmiedewerkstoffen zu beobachten, dagegen an Gusslegierungen eher selten.

Neigen Werkstoffe zum Aufreißen von **Korn**zwickeln (Korngrenzentripelpunkten) entstehen hier Mikrorisse.

Probleme der Maschinenelemente

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Zeitstand und Kriechen



**Bild 5.3.2-7:** Die **Kriechschädigung** (Bild 5.3.2-9) geht bei vielen Werkstoffen (nicht bei Werkstoffen ohne Korngrenzen wie Einkristalle) mit der Bildung von Poren (sog. **Kriechporen**, Bild 5.3.2-6) an den vorzugsweise quer zur Zugbeanspruchung verlaufenden Korngrenzen einher. Fe-Basis- und Ni-Basis-Schmiedelegierungen zeigen diesen Effekt besonders ausgeprägt. Die Kriechporen wachsen mit steigender Betriebszeit zusammen und können im Endstadium zu den, für **Zeitstandbrüche** typischen, zerklüfteten Oberflächen führen. Eine Abschätzung der Zeitstandschädigung, um Rückschlüsse auf eine eventuelle Weiterverwendung (**Restlebensdauer**) noch nicht sichtbar geschädigter Bauteile zu ziehen, ist zumindest schwierig. Dies erfordert eine Menge Voraussetzungen, zu denen nicht zuletzt umfangreiche Erfahrungen mit dem betroffenen Bauteiltyp und dem Verhalten des verwendeten Werkstoffs unter den speziellen Betriebsbedingungen des Bauteils notwendig sind.


Bild 5.3.2-8: Auf den ersten Blick scheinbar nahe liegend, bietet sich die Möglichkeit den Kriech-Schädigungsgrad bzw. die Kriech-Restlebensdauer durch einen nachträglichen Belastungsversuch unter Laborbedingungen zu ermitteln. Weil lange Versuchszeiten sehr kosten- und zeitaufwändig sind, liegen verkürzte Versuche nahe. Dafür ist es notwendig, wenn die Temperatur der Betriebstemperatur entsprechen soll, die Belastung anzuheben. Mit dieser Vorgehensweise steigt die Geschwindigkeit der Kriechverformung (Bild 5.3.2-4). Von der Kriechgeschwindigkeit wird jedoch der Schadensmechanismus des Kriechprozesses bestimmt. Diese Zusammenhänge stellt das Diagramm dar:

Der unter Betriebsbeanspruchung ablaufende Kriechmechanismus ist im Besonderen von Temperatur und Zugspannung abhängig. Als den Schädigungsvorgang steuernde Größe ist die Dehnung bei Schubbeanspruchung (mit dem Gleitmodul normierte Schubspannung) über der mit der Schmelztemperatur normierten Prüftemperatur dargestellt. Man erkennt, dass im Bereich technischer Anwendung (Kriechgeschwindigkeit <  $10^{-12}$  s<sup>-1</sup>) Versetzungskriechen, Korngrenzenkriechen und Diffusionskriechen auftreten kann.

Falls der **abgekürzte Laborversuch** eine erhöhte Kriechgeschwindigkeit und so einen anderen Schadensmechanismus anregt als der im Betrieb, werden **Restlebensdauern gemessen**, **die eher einem Neuteil entsprechen**. Dies führt zu einer vollkommen falschen Einschätzung der Restlebensdauer. Unter diesen Umständen bleibt nichts anderes übrig, als auch die Höhe der Betriebsbelastung ausreichend genau zu simulieren. Das führt zu aufwändigen Versuchen.

Gefügeuntersuchungen an im Betrieb geschädigten Bauteilen können die Abschätzung sicherer machen. Merkmale sind Kriechporenbildung, **Floßbildung** der  $\gamma$ '-Phase und Veränderungen einer eventuell vorhandenen Beschichtung.

Bild 5.3.2-9: Die typisch große Streuung der Kriechlebensdauer verleitet dazu, scheinbar schadensrelevante Unterschiede der Kriechdehnung (z.B. Längung, Aufweitung, Diagramm oben und unten rechts) zu überschätzen. Eine Streuung von 50% um den Mittelwert (Diagramme oben, Lit. 5.3.2-11; und Mitte) ist nicht ungewöhnlich.

Die **Porenbildung** (Bild 5.3.2-6 und 5.3.2-7) streut über der Kriechzeit und der Kriechdehnung stark (Diagramm oben, Lit. 5.3.2-11 und Diagramm unten links). Sie liegt in der Größenordnung der Kriechdehnung und lässt sich dieser in der Tendenz linear zuordnen (Diagramm unten rechts). Eine für die Schädigung bzw. verbrauchte Lebensdauer aussagefähige Porenbildung ist von mehreren Faktoren extrem abhängig:

- Der Lage am Bauteil. Beispielsweise kann im Bereich eines makroskopischen Risses oder einem Bruch eine deutlich stärkere schadensrelevante Porenbildung beobachtet werden als in benachbarten Zonen (Lit. 5.3.2-11). Eine Erklärung sind kleine Unterschiede in der Kriechdehnung. Das beeinflusst entscheidend die richtige Proben-/Prüflage.

- Werkstoffunterschiede/Inhomogenitäten innerhalb der Spezifikation (Schwachstellen, Bild 3.2.1-1).

- Örtliche Temperaturunterschiede/-gradienten.

Deshalb ergeben Kriechporen nur einen Anhaltswert für die Schädigung, d.h. die verbrauchte Lebensdauer bzw. die noch zu erwartende Restlebensdauer. Werden mehrere zusammengehörige gleiche Heißteile (Kesselrohre, Schaufelsätze) entsprechend der Kriechporenbildung beurteilt, hat sich die Festlegung einer sicheren, konservativ abgeschätzten Grenze bewährt. Für eine ausreichend sichere Aussage sind nur Bauteilesätze mit mehreren, statistisch sinnvoll geprüften Teilen geeignet. Die Prüfteile müssen gleichmäßig gegenüber der lebensdauerrelevanten Belastung verteilt gewesen sein. Liegt der Befund erfahrungsbasiert deutlich unter dem Grenzwert, ist der Teilesatz zum erneuten Einbau und/oder zur Regeneration (Bild 5.3.2-12) geeignet. Alle anderen Teilesätze sind zu verschrotten, auch wenn sich darin wahrscheinlich noch weiterverwendbare Teile befinden. Ausreichend zuverlässige Beurteilungen sind erfahrungsgemäß nur an Schmiedewerkstoffen mit ausgeprägter Kriechporenbildung möglich. Hierzu gehören Stähle und warmfeste Nickellegierungen.

Die Diagramme unten gelten für die Schädigung der Schaufeln einer kurzzeitigen extremen überhitzten Turbinenstufe. Einige Schaufeln zeigen keine merkliche Längung, wenige Schaufeln sind deutlich gelängt, einzelne gebrochen. Es war naheliegend zu vermuten, dass es sich bei den gebrochenen und den deutlich gelängten Schaufeln nicht um spezifikationsgerechte Bauteile handelte. Die Nachuntersuchung ließ jedoch keine unzulässige Abweichung im Gefüge und der Festigkeitswerte erkennen. Offenbar war die unterschiedliche Schädigung (Längung, Porenbildung, Bruch) auf normale Streuung innerhalb der Spezifikationswerte zurückzuführen. Der Auslegung einer Schaufel werden spezifizierte Mindestwerte der Lebensdauer zu Grunde gelegt, die deutlich unter Mittelwerten von Prospekten liegen. Dies gilt auch für Kurzzeitprüfungen im Rahmen der Qualitätssicherung.



Bild 5.3.2-10: Kriechen begrenzt nicht nur die Lebensdauer eines Heißteils weil unzulässige Verformungen, Rissbildung und Bruch auftreten (Skizze oben links, Lit. 5.3.2-5). Eine Kriechverformung wirkt sich auch auf viele andere Bauteileigenschaften schädigend aus. Als Beispiel dient hier die Rotorschaufel einer Turbine.

**Thermoermüdung:** In den Zonen hoher Temperatur entstehen Druckspannungen, die mit Zugspannungen in kälteren Bauteilbereichen im Gleichgewicht stehen. Die Druckspannungen können so hoch werden, dass es zum plastischen Stauchen kommt (Bild 5.4.2.1-2 und Bild 5.4.2.1-9). Beim Abkühlen tritt eine Umlagerung der Spannungen auf und es entstehen hohe Zugspannungen. Die Folge sind Verzug, Schädigungen (z.B. Kriechporen), Ermüdung und Rissbildung.

Dynamisches Bauteilverhalten: Längenänderungen können die Eigenfrequenz der Bauteile herabsetzen. Befindet sich diese dicht oberhalb einer Erregerfrequenz, entsteht die Gefahr einer Resonanz und von Schwingbrüchen.

Eine **plastische Verformung** wie das Aufdrehen von Rotorschaufeln, die über das Deckband verspannt und damit abgestützt und gedämpft werden, kann ebenfalls Schaufelschwingungen begünstigen.

Die **Eigenfrequenz** kann sich auch durch Anstreifen und Abrieb infolge einer Kriechdehnung verändern. Der **Anstreifvorgang** wirkt zusätzlich durch örtliche **Aufheizung** und **Schwingungsanregung** schädigend.

Hohe **Zugeigenspannungen**, die sich durch örtliches Kriechen aufgebaut haben und/oder der Abbau von schützenden Druckeigenspannungen begünstigen Schwingbrüche. Dieser Effekt ist besonders dort problematisch, wo durch Verfestigung der Oberfläche (z.B. Kugelstrahlen, Rollen) die Schwingfestigkeit angehoben wurde (z.B. Schrauben). Wirkungsgrad: Geometrische Veränderungen aerodynamisch wirksamer Flächen und von Dichtspalten verschlechtern den Wirkungsgrad der gesamten Maschine.

An Heißteilen mit Al-Diffusionsschichten für den Oxidationsschutz lässt sich ein Rauigkeitsanstieg infolge **Riffelbildung** (engl. Rumbling, Rippling) durch Thermoermüdung beobachten. Damit erhöht sich der Strömungswiderstand. So beeinflussen Heißgasführungen und die betroffene Turbinenbeschaufelung den Maschinenwirkungsgrad ungünstig.

**Beschichtungen:** Bei spröden Beschichtungen besteht eine erhöhte Gefahr der Rissbildung durch Thermoermüdung (Bild 5.4.2.1-4).

Werkstoffverhalten: In Verbindung mit der Kriechbeanspruchung erfolgen auch Gefügeveränderungen. Abhängig von der Höhe der Kriechbelastung können sich Kriechporen auf den quer zur Beanspruchung orientierten Korngrenzen bilden, die mit steigender Betriebszeit über Mikrorissbildung bis zum Zeitstandbruch (Kriechbruch) führen (Bild 5.3.2-7). Bei Einkristallen erfolgt die Porenbildung der Kriechschädigung nicht auf den Korngrenzen. Sie geht von Lunkern, Karbiden und Eutektika in den interdendritischen Bereichen aus. Die für eine gute Kriechfestigkeit erforderliche  $\gamma$ '-Phase ordnet sich unter Zug-Beanspruchung bei hohen Temperaturen in einer bevorzugten Kristallrichtung (<001>) quer zur Zugbeanspruchung als Platten in "Floßform" (engl. raftening, Lit 5.3.2-6) an.

Vorteilhaft kann sich eine Kriechverformung im Bereich von Kerben auswirken, wenn sie zum Abbau der Kerbspannungsspitzen führt. Dies kann sowohl die Schwingfestigkeit als auch die Kriechlebensdauer an Kerben erhöhen.

Anstreifverhalten: Längung, Verzug und veränderte Anlagebedingungen führen zu unvorhergesehenen Anstreifvorgängen und einem veränderten Anstreifverhalten. Damit besteht



die Gefahr einer Schwingungsanregung und/ oder eines selbstverstärkenden Effekts durch zusätzliches Aufheizen und Wärmedehnung beim Anstreifen.

# 5.3.2.2 Abhilfen gegen Zeitstandschäden (Kriechschäden)

Maßnahmen und **Abhilfen gegen Zeitstandschäden** orientieren sich an den möglichen Schadensursachen. Sieht man von den bauteilspezifischen Problemen ab, lassen sich mit der Beantwortung der folgenden Fragen Ursachen identifizieren und damit gezielte Maßnahmen erarbeiten und einleiten:

#### - Auslegungsprobleme:

- Sind die tatsächlichen Beanspruchungen bekannt, z.B. Wärmespannungen oder fertigungsbedingte Eigenspannungen?
- Welches sind die schadensrelevanten Betriebstemperaturen, deren zeitliche Abläufe und Wärmespannungen? Mittlere Temperaturen sind z.B. bei größeren Temperaturgradienten im Heißgasstrom für das einzelne Teil wenig aussagefähig.
- Stehen die zur Auslegung angenommenen Kühlluftmengen im Betrieb jederzeit zur Verfügung?

- Wurden kriechlebensdauervermindernde Einflüsse (Bild 3.3-2), wie eine besonders korrosive Atmosphäre, berücksichtigt (Bild 5.3.2-5 und Kapitel 5.3.1)?

- Sind die der Auslegung zu Grunde gelegten Werkstoffdaten repräsentativ für das Bauteil? Korngröße, Kornorientierung, Wandstärken usw. (Bild 5.3.2-11).
- Befinden sich querschnittsmindernde Schichten (z.B. Diffusionsschicht) auf einem dünnwandigen Bauteil, wurden aber in der Auslegung nicht berücksichtigt?
- Können Dehnungen ausreichend aufgenommen bzw. ausgeglichen werden? Ein Beispiel sind behinderte Wärmedehnungen in Gestellen von Wärmebehandlungsanlagen.

#### - Werkstoffprobleme:

- Liegen festigkeitsmindernde Werkstoffprobleme vor? (Gefüge oder Fehlstellen)
- Wurden in hochbelasteten Bauteilzonen Technologien eingesetzt, welche die Zeitstandfestigkeit unzulässig beeinflussen? Z.B. Reparaturlötungen mit Hochtemperaturlot.

#### - Betriebsbelastung:

- Traten ungewöhnlich hohe Bauteiltemperaturen auf? Z.B. durch Verstopfung mit Staub oder Oxidschichten in Kühlluftführungen.
- Gab es Fehlfunktionen der Regelung oder Betriebszustände welche die Regelung nicht schnell genug ausgleichen kann? Z.B. Überhitzung beim Start einer Anlage.
- Liegt eine Querschnittsschwächung durch Reibverschleiß, Diffusion von Fremdmetallen (z.B. Silber), Oxidation usw. vor?
- Haben Wärmedämmschichten, z.B. durch Abblättern und Erosion versagt?

#### - Wartung:

- Waren einwandfreie Sensorfunktionen im Betriebszeitraum gewährleistet? Typische Probleme sind verschmutzte Pyrometerlinsen oder gealterte Thermoelemente.
- Waren Reglerprobleme aufgetreten, die eine Überhitzung aulösen können?
- Gab es besondere Boroskopiebefunde? Z.B. ungewöhnliche Verschmutzungen im Verdichter und/oder Ablagerungen in der Turbine.

Eine besondere Form der Abhilfe ist die Ermittlung der Schädigung bzw. Restlebensdauer für den Wiedereinbau zeitstandbeanspruchter Bauteile (Bild 5.3.2-9). Gegebenenfalls lassen sich zeitstandgeschädigte Bauteile durch einen HIP-Prozess (Bild 5.3.2-12) oder lediglich mit einer Wärmebehandlung (wenn nur Gefügeveränderungen wie die Bildung spröder Phasen und/oder Veränderungen der  $\gamma$ '-Phase bei Ni-Legierungen vorliegen) **regenerieren**.

**Bild** 5.3.2-11: Die Auswahl der Probeteile für die Bestimmung betriebsrelevanter Werkstoffkennwerte zur Bauteilauslegung kann sich schwieriger gestalten als auf den ersten Blick zu erwarten ist. Diese Problematik soll am Beispiel von Feingussteilen dargestellt werden:

Bei vielen Bauteilen ist die Entnahme einer für die Anbringung von Einspannköpfen (z.B. Gewinde) geeigneten Probe schon allein wegen fehlender ausreichend dicker Querschnitte (z.B. bei Schaufeln) nicht möglich. Aus diesem Grund werden Zugproben mitgegossen. Dies hat den Vorteil, dass die Proben aus der gleichen Gusscharge wie das individuelle Bauteil stammen. Solche Proben ermöglichen eine geeignete Aufbringung der Last, gleichmäßige Temperaturverteilung und haben einen definierten Prüfquerschnitt. Der entscheidende Nachteil ist, dass sich das Gefüge im Prüfquerschnitt der Probe deutlich von dem im lebensdauerbestimmenden Querschnitt des Bauteils unterscheiden kann. Korngröße, Kornbzw. Korngrenzenorientierung, Lunker, Poren, Risse und Verformungen sowie Reaktionen der Formschale und/oder des Kerns können vom Bauteil abweichen. Dies liegt an den Querschnittsunterschieden, dem Temperaturverlauf bei der Abkühlung und gegebenenfalls an Spannungen, die sich im Gussteil durch behinderte Wärmedehnung im Bauteil und zwischen Bauteil, Kern und Formschale aufbauen.

Die Prüfung an einem repräsentativen Originalbauteil ist, was Gefügebesonderheiten und Fertigungseinflüsse anbetrifft, optimal. Leider entspricht der die Lebensdauer bestimmende Querschnitt am Blatt bei dieser Prüfung oft nicht dem im Betrieb. Das kann daran liegen, dass es in einem Versuch mit konstanter Temperatur über der gesamten Bauteillänge nicht gelingt, die gleiche Bruchlage wie im Betrieb zu erhalten. Deshalb muss die Verteilung der Prüftemperatur am Blatt so erfolgen, dass der Bruch an der erwünschten Stelle erfolgt. Das heißt, die Einspannzonen sind intensiv zu kühlen, was erfahrungsgemäß nicht einfach ist. Erschwerend kommt hinzu, die Prüfkraft so einzuleiten, dass keine unzulässigen **überlagerten Spannungen** (z.B. Biegung oder Torsion) auftreten. Probleme als Folge einer komplexen Geometrie oder der Lage des Prüfquerschnitts sind zu berücksichtigen.

An Bauteilen mit ausreichend dicken Querschnitten (z.B. integrale Turbinenräder, Skizze rechts) lassen sich integrale Proben entnehmen. Die Probenentnahme sollte natürlich auch hier an den lebensdauerbestimmenden Querschnitten erfolgen, damit die Prüfergebnisse für diese aussagefähig sind. Dies ist bei der LCF-Belastung an Turbinenrädern meist dann der Fall, wenn die Probe im Nabenzentrum entnommen werden kann, ohne das Bauteil zu zerstören. Geeignet sind auch angegossene Nabenquerschnitte auf der Seite des Angusses. Damit ist gewährleistet, eventuelle Fehler und Schwachstellen wie Lunker und Grobkorn und Heißrisse zu erfassen, die sich erfahrungsgemäß auf die dicken, im Betrieb durch überlagerte Spannungen aus Fliehkraft und Wärmedehnung hoch LCF-belasteten, Querschnitte konzentrieren. Damit dürften diese Probenergebnisse "auf der sicheren Seite liegen". Ein Nachteil integraler Proben ist die aufwändige Probenentnahme und -fertigung. Schlechte Probenwerte bedeuten nicht unbedingt auch ein schlechtes Bauteil. So sind Entscheidungsprobleme bei der Bewertung der teuren Teile nicht zu vermeiden.

Zeitstanddaten sollten in dem, für diese Belastungsform lebensdauerbestimmenden Bauteilbereich mit der typischen Gefügeausbildung (siehe auch Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8) entnommen werden. Hier können aber die Querschnitte für Proben zu dünn sein. Das Beispiel von Turbinenschaufeln zeigt: Es ist nicht einfach, für die Bauteilqualität aussagekräftige Proben zu erhalten.



**Bild 5.3.2-12:** Bei zeitstandbelasteten Bauteilen lässt sich unter gewissen Voraussetzungen die **Schädigung, d.h. die Restlebensdauer bzw. die verbrauchte Lebensdauer** abschätzen. Dies ist eine Voraussetzung für eine mögliche Regeneration.

**Restlebensdauer-Abschätzung:** Für eine "theoretische" Lebensdauerabschätzung mit Hilfe der Schadensakkumulation muss das abgelaufene Belastungsspektrum bekannt sein (Bild 5.4-12) und ausreichend Erfahrung zur Bauteilfestigkeit vorliegen (siehe hierzu Bild 5.4-13). Leider fehlen jedoch meist diese wichtigen Daten.

Als Anhaltswert für die tatsächlich im Betrieb aufgetretene Zeitstandbeanspruchung kann eine Maßveränderung durch Kriechen dienen. Denkbar ist die Längenänderung einer Rotorschaufel oder die Durchmesservergrößerung einer Kessel-Druckleitung. Dies erscheint jedoch einfacher als es tatsächlich ist. Häufig trägt nur ein kleiner, maximal kriechbeanspruchter Bauteilbereich zum größten Anteil der Kriechdehnung bei (Bild 5.3.2-4 und Bild 5.3.2-7). In vielen Fällen bauen sich Eigenspannungen auf, z.B. zwischen heißem äußeren und kaltem (gekühlten) inneren Bereich auf (Bild 5.3.2-10 und Bild 5.4.2.1-9). Dann kann es zum Verzug kommen, aber zu keiner auswertbaren Längung. Denkbar ist eine 3-D-Verformungsmessung mit lasergestützten Scanverfahren. Die Ermittlung der Kriechverformung kann jedoch eine dokumentierte Vermessung des Neuteils erfordern.

In jedem Fall ist davon auszugehen, dass sehr viel Erfahrung mit dem zu bewertenden Bauteil notwendig ist, um auf Grund von Kriechdehnungen hinreichend sichere Aussagen zur Restlebensdauer für einen Wiedereinbau zu machen.

Ein anderer Ansatz besteht in der **Ermittlung** der Kriechporosität (siehe auch Bild 5.3-3, Bild 5.3-4 und Bild 5.3.2-9) in der lebensdauerbestimmenden Bauteilzone. Dies kann in Sonderfällen, insbesondere bei ungekühlten Turbinenrotorschaufeln zerstörungsfrei mit der Untersuchung aussagefähiger Oberflächenbereiche jedes einzelnen Bauteils gelingen. Dazu muss die am höchsten kriechbeanspruchte Zone an der Oberfläche liegen. Der Erfolg einer Restlebensdauerbestimmung durch Kriechporenermittlung hängt zuerst von der richtigen **Probenentnahme** ab (Skizze oben links). Diese muss natürlich im **aussagefähigen Querschnitt** erfolgen.

Für die Kriechporenbewertung werden geeignet polierte und/oder geätzte Schliffe bzw. anpolierte Oberflächen mikroskopisch (metallografisch und/oder REM) ausgewertet, was viel Erfahrung erfordert. Immerhin kann man so erfahrungsgemäß Zeitstandbrüche ausreichend sicher verhindern. Die am höchsten zeitstandbeanspruchten Zonen gekühlter Heißteile liegen häufig innen. Insbesondere im Bereich von Kühlluftbohrungen addieren sich zu mechanisch bedingten Belastungen noch Zug-Wärmespannungen (Bild 5.4.2.1-9). Eine Kriechporenauswertung muss somit zerstörend erfolgen. Dass hierzu spezielle Präparationsmethoden wie mehrmaliges Polieren und Ätzen gehört, damit Poren nicht zugeschmiert oder mit herausgebrochenen Karbiden verwechselt werden, ist selbstverständlich. Eine zerstörende Untersuchung ist natürlich nur bei einer akzeptabel kleinen Bauteilmenge sinnvoll. Diese muss aber die erforderlich sicheren statistischen Aussagen zulassen, d.h. für die anderen Teile des Satzes repräsentativ sein. Weil die Zeitstandschädigung und damit die Kriechporenbildung in einem Bauteilsatz (z.B. Schaufeln einer Turbinenstufe; Rohrleitungen einer Kesselwand, Bild 5.3.1-3) erfahrungsgemäß sehr streut (Bild 5.3.2-9), sind auch bei vorhandenem Bewertungsstandard für die Porosität Lebensdaueraussagen mit großer Streuung zu erwarten. Das bedeutet, dass zur Sicherheit nur ein Teil der potenziellen Restlebensdauer in einem erneuten Einbau genutzt werden kann. Die Abschätzung für die Weiterverwendbarkeit gelaufener Heißteile hat sich bei Schmiedematerial unter Berücksichtigung statistischer Ausfall-

Fortsetzung auf Seite 5.3.2-21



Fortsetzung von Seite 5.3.2-19

wahrscheinlichkeit als ausreichend sicher erwiesen. Sie bilden gut auswertbare Kriechporen (Bild 5.3.2-6 und Bild 5.3.2-7). Bei geschmiedeten Turbinenschaufeln hat sich dieses Vorgehen seit Jahren bewährt. Auch für Gusswerkstoffe (z.B. 713C) scheint eine Regeneration (engl. rejuvenation) nach Lit. 5.3.2-8 möglich, vorausgesetzt sie bilden Kriechporen.

Eine weitere Methode der **Restlebensdauerbestimmung ist ein Zeitstandversuch an einem geschädigten Bauteil**. So einfach und sicher diese Vorgehensweise auf den ersten Blick erscheint, so wenig aussagekräftig ist sie gewöhnlich. Ganz abgesehen von der Übertragbarkeit auf andere Bauteile. Dies hat mehrere Gründe:

- Der Festigkeitsversuch muss die im Betrieb geschädigte Zone so belasten, dass hier das Versagen eintritt. Z.B. kann es **unmöglich** sein, in einem Zugversuch auf Grund der Spannungsverteilung, **den unter Fliehkraft be**lasteten Bauteilbereich zu prüfen.

- Die schädigenden Beanspruchungen müssen in allen Parametern weitmöglichst der Betriebsbeanspruchung entsprechen. Werden zu hohe Belastungen gewählt, um akzeptabel kurze Prüfzeiten zu erhalten, wird häufig ein anderer Kriechmechanismus als im Betrieb aktiviert (Bild 5.3.2-6 und 5.3.2-8). Damit macht sich die Betriebsschädigung kaum in einer Lebensdauerverkürzung bemerkbar, obwohl möglicherweise keine nutzbare Restlebensdauer mehr vorliegt.

In manchen Fällen können **Gefügever**änderungen im Grundwerkstoff (Orientierung und  $\gamma$ '-Phase) und Beschichtungen Zeitstandschädigungen anzeigen. Hierbei handelt es sich jedoch meist genau genommen eher um Effekte der Temperatureinwirkung mit sehr begrenzter Aussage für Rückschlüsse auf die Zeitstandbelastung.

# Regeneration von zeitstandgeschädigten Bauteilen:

Ein besonderes Problem ist die Auswahl regenerierungsfähiger Bauteile und der Nachweis des Regenerationseffekts. Beschränkt sich die Zeitstandschädigung lediglich auf reversible Gefügeveränderungnen, z.B. der  $\gamma'$ -Phase, lässt sich allein mit einer Wärmebehandlung ein Regenerationseffekt erzielen. Sind jedoch bereits Korngrenzen von Kriechporen und Mikrorissen geschädigt (Bild 5.3.2-7 und Bild 5.3.2-9) muss eine HIP-Behandlung erfolgen (engl. hot isostatic pressing, Skizze oben rechts). In einem mit Argon gefüllten Autoklaven schließen sich die nicht zur Bauteiloberfläche offenen, nicht oxidierten Schädigungen wie Poren und Mikrorisse. Für diese "Verschweißung" ist ein Gasdruck über 1000 bar und Temperaturen über 1000°C erforderlich. Nicht selten wird dem HIP-Prozess eine Wärmebehandlung nachgeschaltet, wenn eine erforderliche Schnellabkühlung in der HIP-Presse nicht möglich ist.

Weil die Regeneration durch HIP nur möglich ist wenn das Argon nicht in die Fehlstellen eindringen kann, ist es notwendig, die zu regenerierenden Bauteile auf **Fehler mit Verbindung zur Oberfläche** zu überprüfen. An der Bauteilaußenseite ist dies mit der Eindringprüfung möglich. Sind jedoch, wie häufig, in den Kühlluftbohrungen Risse vorhanden, so ist der Regenerierungseffekt zumindest stark eingeschränkt. Als Abhilfe sind entoxidierende Glühungen mit nachfolgender geeignet dichter Beschichtung vor dem HIP-Prozess denkbar.

**Regenerierte Bauteile** können wegen erneutem und **ausgeprägtem Primärkriechen** (Bild 5.3.2-3) anfangs zu unerwartet großen Kriechdehnungen neigen.

# Literatur zu Kapitel 5.3.2

- 5.3.2-1 A.Rossmann, "Untersuchung von Schäden als Folge thermischer Beanspruchung", Beitrag aus J.Grosch "Schadenskunde im Maschinenbau", Band 308, aus der Reihe "Kontakt & Studium, Maschinenbau", Expert Verlag, Band 308, ISBN 3-8169-1202-8, 2. Auflage 1995, Seite 162-187.
- **5.3.2-2** "Dubbel's Taschenbuch für den Maschinenbau", Springer Verlag, 1961, Band 1, Seite 571.
- 5.3.2-3 P. Leven, A. Rossmann, "Quality Improvement for Space-Processed Turbine Blades", ESA-Special Publication No. 114, Proceedings des Second European Symposium on "Material Sciences in Space", Frascati, Italy, 6-8 April 1976, Seite 319-332.
- **5.3.2-4** E.H.Toomey, "Engine Performance Loss and Recovery", Proceedings Paper der "JT8D Engine Maintenance Conference", Hartford, Conn. May 1975, Seite 6.
- **5.3.2-5** ASM, "Metals Handbook Ninth Edition", Vol. 11 "Failure Analysis and Prevention", Metals Park, Ohio, Seite 283 und 284.
- **5.3.2-6** D. Goldschmidt, "Einkristalline Gasturbinenschaufeln aus Nickelbasis-Legierungen", Teil II, Zeitschrift "Materialwissenschaft und Werkstofftechnik", 25, Seite 373-382.
- **5.3.2-7** "Stahlschlüssel Taschenbuch", Verlag "Stahlschlüssel Wegst GmbH", ISBN 3-922 599-10-9, 17. Auflage 1995, Seite 31.
- **5.3.2-8** M.M Ratwani, "Aging Airframes and Engines", Proceedings Paper AGARD-CP-600 Vol.1, der Konferenz, "Future Aerospace Technology in the Service of the Alliance", 14-17 April 1997 SeiteA18-1 bis A18-15.
- **5.3.2-9** Prospekt der Fa. Metal Improvement Company.
- **5.3.2-10** B.Ilschner, "Kriechbruch Ansätze zum quantitativen Verständnis", Berichtsband der Diskussionstagung "Bruchuntersuchung und Schadenklärung" in der Allianz-Zentrum für Technik GmbH (AZT) am 20/21 November 1975, Seite 136-138.
- **5.3.2-11** 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.

- **5.3.2-12** 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.
- **5.3.2-13** U.Krupp, "Mikrostrukturelle Aspekte der Rissinitiierung und -ausbreitung in metallischen Werkstoffen", Habilitationsschrift, Universität Siegen, urn:nbn:de:hbz:467-922, Februar 2004, Seite 172-194.

# 5.4 Dynamische Belastung und Schwingermüdung



Unter Schwingermüdung versteht man den **Festigkeitsabfall durch Anrissbildung und Rissfortschritt eines Bauteils bei dynamischer Belastung**. Bleibt diese (Bild 5.4-1) unter einem werkstoffspezifischen Grenzwert (**Dauerfestigkeit**), können beliebig viele Lastwechsel für eine unbegrenzte Lebensdauer ertragen werden. Werkstoffe wie Leichtmetalllegierungen und austenitische Stähle zeigen keinen horizontalen Verlauf der Wöhlerlinie im hohen Lastwechselbereich und damit eigentlich keine Dauerfestigkeit.

Schwingermüdung ist eine lebensdauerbestimmende Belastung im Maschinenbau (Bild 5.4-1). Für Rotoren von Turbomaschinen spielen die niederfrequenten Belastungszyklen in der Start-Abstell-Phase eine besondere Rolle (LCF). Dabei wirken Fliehkraft und behinderte Wärmedehnung (Kapitel 5.4.2) zusammen. Gefährliche hochfrequente Schwingungen (Kapitel 5.4.3.1) entstehen gewöhnlich durch Resonanzen (Bild 5.4-4). Auf Heißteile wie Turbinenschaufeln (Bild 5.4.3.1-4) und Heißgasführungen (Bild 5.4.2.1-5) wirken hohe niederfrequente zyklische Beanspruchungen aus behinderter Wärmedehnung (Thermoermüdung, Kapitel 5.4.2). Viele andere Bauteile, denen man es auf den ersten Blick nicht ansieht, sind schwingbeansprucht. So unterliegen z.B. Laufflächen an Wälzlagern und Zahnflanken an Zahnrädern dynamischen Beanspruchungen aus der zyklisch veränderlichen Pressung bei der Kraftübertragung. Grundsätzlich benötigt Schwingermüdung immer einen Zugspannungs- oder Schubspannungsanteil im Belastungszyklus. Dieser ist in einigen Fällen nur schwer erkennbar, wenn das Bauteil oder der belastete Querschnitt unter äußerer zyklischer Druckbelastung steht. Beispiele sind ein gekerbter Stab unter pulsierender Druckspannung (Bild 4.3-11 und Bild 5.4-14) oder eine überrollte Fläche (Bild 5.4-14). Schwingermüdung wird von begleitenden Effekten wie Korrosion, (Kapitel 5.6.3.2), Fretting (Schwingverschleiß, Kapitel 5.9.3) und Einfluss der umgebenden Atmosphäre auf das bruchmechanische Verhalten (Rissfortschritt, Kapitel 4.3) verstärkt.

Der Belastungs-Zeit-Verlauf der "Schwingungen" im Betrieb kann sehr unterschiedlich und komplex sein. Dies gilt sowohl für die Spannungsspitzen, Anstiegs- und Abfall-Rampen als auch für etwaige Haltezeiten. Die Werkstoffe reagieren in ihrer Schwingfestigkeit auf solche Einflüsse temperaturabhängig unterschiedlich stark. Titanlegierungen können deutlich weniger Lastwechsel

im LCF-Bereich ertragen, wenn im Spannungsmaximum eine Haltezeit von wenigen Minuten (engl. dwelltime, high temperature low cycle fatigue = HTLCF) vorhanden ist (Bild 5.4-12 und Bild 5.4-13). In diesem Fall ist es eher unwahrscheinlich, dass es sich um eine Schadensakkumulation von Kriech- und Ermüdungsschädigungen während der Haltezeit handelt. So erklärt sich dieses extreme Verhalten nicht. Offenbar spielen eher Diffusionsvorgänge im Zusammenhang mit dem Herstellungsprozess des Halbzeugs eine Rolle. Dafür wird der in empfindlichen Gefügebesonderheiten gelöste Wasserstoff verantwortlich gemacht.

Ein **Schwingbruch** wird auch als **Dauerbruch** oder **Ermüdungsbruch** bezeichnet (Lit. 5.4-1). Diese Begriffe befriedigen nicht. Da es sich hier um Brüche/Risse handelt sind Schädigungen die bereits vorher eintreten nicht angesprochen. Gerade aber diese haben mit der auslegungsbegrenzten Lebensdauer schwingbeanspruchter Bauteile deutlich an Wichtigkeit gewonnen (siehe unten). Deshalb ist 'Ermüdung' bzw. **Schwingermüdung** als Schädigungsbezeichnung vorzuziehen. In der Bezeichnung "Schwingbruch" liegt eine Schwingung als Ursache nahe. Da stellt sich die Frage, was man unter einer **Schwingung** (Oszillation, Bild 5.4-4) versteht (Lit. 5.4-2).

Es handelt sich um den Verlauf einer Zustandsänderung eines aus dem Gleichgewicht gebrachten Systems, das von einer Rückstellkraft in den Ausgangszustand gebracht wird und bei dem bestimmte Merkmale wiederkehren. Bei einer **periodischen Schwingung** entsteht eine periodische Energieumwandlung zwischen Bewegungs- (kinetischer Enregie) und gespeicherter Energie (potenzielle Energie, Lageenergie) innerhalb eines **festen Zeitintervalls**. Ein wenn auch häufiger Sonderfall ist die **harmonische Schwingung**. Sie folgt einer Sinuskurve. Ein typisches Beispiel aus der Physik ist das Pendel ("**A1**"). Diese Definition trifft für viele hochfrequente **freie und erzwungene** (von außen angeregte) Schwingungen in der Technik zu. Das gilt insbesondere im Resonanzbereich (Bild 5.4-4). Dazu gehört die Schwingung eines einseitig eingespannten Trägers (Skizze "**A2**").

Ein weiteres Problem ist, dass viele dynamische Betriebsbelastungen nicht periodisch sind. Das gilt beispielsweise für Thermoermüdung und Lastzyklen rotierender Bauteile. Damit ist für viele dynamische Vorgänge der Technik der Begriff **Schwingermüdung** kein Hinweis auf eine periodische Schwingung. Ein Beispiel ist die zyklische Belastung der Rotoren einer Turbomaschine mit unregelmäßigen Start-Abstellvorgängen und Drehzahländerungen bei spontanen Leistungsänderungen ("**B**"). Denn es handelt sich nicht um Schwingungen nach der obigen Definition. Jeder Lastwechsel kann in Belastungsablauf und -höhe individuell sein. Eine Wiederholung in einem festen Zeitintervall (periodisch) ist eher unwahrscheinlich. Auch Thermoermüdung (Kapitel 5.4.2) die auf Wärmespannungen beruht, unterliegt keiner Schwingung im definierten Sinn. Der umfassende Oberbegriff "**Dynamische Belastung**" erscheint da am unproblematischsten. Er beinhaltet alle möglichen, zur **Schwingermüdung** führenden Belastungen.

**Dauerbruch** entsprach ursprünglich eher dem heutigen Verständnis eines HCF-Schadens im Bereich der Zeitfestigkeit (Bild 5.4-1). So belastete Systeme werden anhand der Dauerfestigkeit (kein Bruch/Riss auch nach beliebig vielen Lastwechseln) ausgelegt. Brüche bei Belastungen deutlich oberhalb der Dauerfestigkeit werden auch als (Kurzzeit-) **Zeitbrüche** bezeichnet. Heute ist das Werkstoffverhalten unter **zyklischen plastischen Verformungen** (LCF, Kapitel 5.4.1) Auslegungsbestandteil (Damage Tolerant Design). Damit wird der Begriff Dauerbruch diffus.

**Ermüdungsbruch** kann mehrdeutig sein. Es gibt aber eine Kriechermüdung (statisch belastet) und Korrosionsermüdung. Um zu differenzieren ist es, was den Schadensmechanismus betrifft, besser von **Schwingermüdung** sprechen.

Wegen der verwirrenden Fachbegriffe haben sich die englischen Bezeichungen **HCF** und **LCF** für die Belastung bzw. HCF- und LCF-Bruch/Riss für das Versagen durchgesetzt (Bild 5.4-1).

In **Kerben** (Bild 5.4.4-1) findet ein deutlicher, geometrie-, werkstoff- und temperaturabhängiger Abfall der Schwingfestigkeit statt. Dieser ist im HCF-Bereich, im Vergleich zur LCF-Beanspruchung, besonders ausgeprägt (Bild 5.4-3). Die **Temperaturabhängigkeit** der HCF-Festigkeit zeigt beispielhaft Bild 5.4.3.2-4).



Bild 5.4-1: Viele Konstruktionswerkstoffe wie Vergütungsstähle weisen eine Dauerfestigkeit auf. Ab dieser dynamischen Belastung verläuft die Wöhlerkurve horizontal. Im Wöhlerdiagramm sind die Lastwechsel gewöhnlich logarithmisch auf der Abszisse, die Spannungsamplitude auf der Ordinate aufgetragen. Unterhalb dieser Belastung, bzw. Schwingfestigkeit (**Dauerfestigkeit**) werden beliebig viele Lastwechsel ertragen. Das gilt natürlich nur, solange nicht weitere Betriebseinflüsse wie Korrosion oder Verschleiß wirksam werden. Es gibt jedoch viele Werkstoffe die keine ausgeprägte Dauerfestigkeit aufweisen, d.h. deren Wöhlerkurve auch bei hohen Lastwechselzahlen weiter abfällt. Hierzu gehören Leicht-

metalllegierungen (Al, Mg, Ti), Ni-Legierungen und austenitische Stähle. Trotzdem lassen sich brauchbare Grenzwerte für die dynamische Festigkeit angeben, wenn die sehr hohen Lastwechselzahlen in den Betriebszeiten der Praxis nicht erreicht werden.

Werden Belastungen oberhalb der Dauerfestigkeit mit über ca. 10<sup>5</sup> Lastwechseln bis zum Versagen ertragen, spricht man von Zeitfestigkeit. Unter ca. 10<sup>5</sup> spricht man von Kurzzeitfestigkeit. Beide Begriffe sind irreführend. Werden diese Festigkeitswerte doch für die Auslegung von Maschinen/Bauteilen mit sehr unterschiedlichen dynamischen Belastungen verwendet. Das gilt für Zeiträume und Zeitverläufe. Davon ist auch die Belastungs-

frequenz betroffen, soweit man überhaupt davon sprechen kann. Die Zeit als kennzeichnender Parameter ist somit eher verwirrend. Zudem fehlt die Ermüdung als Begriff für den charakteristischen Versagensmechanismus. Aus diesen Gründen haben sich im 'globalen Umfeld' die Begriffe Low Cycle Fatigue (LCF, übersetzt: Niedrig Lastwechselzahl Ermüdung) bzw. LCF-Festigkeit statt Kurzzeitfestigkeit durchgesetzt. Entsprechendes gilt für High Cycle Fatigue (HCF). Wörtlich übersetzt Hoch Lastwechselzahl Ermüdung. Der deutsche Befriff ist Zeitfestigkeit was jedoch nicht befriedigt. Die Definition von HCF wird in Bild 5.4.1.1-2 gegeben.

Bild 5.4-2 (Lit. 5.4-18, Lit 5.4.3.2.3-7): Man kann sich die Schwingermüdung in der Anrissphase von Metallen mit Hilfe des folgenden Modells plausibel erklären (Lit 5.4.3.2-3). Reine elastische Dehnung des Metallgitters müsste beliebig häufig ertragen werden. Somit wäre die Dauerfestigkeit in diesem Belastungsbereich zu suchen. Die tatsächliche Dauerfestigkeit liegt jedoch deutlich niedriger. Kristalle haben, abhängig von ihrer Kristallorientierung, unterschiedliche elastische Eigenschaften (E-Moduli, siehe auch Bild 5.4.3.2-1). Ein Werkstoff besteht aus vielen Kristallen, die mit unterschiedlicher Orientierung ihres Gitters zueinander angeordnet sind. Wird von außen eine Belastung auf diese Struktur gebracht, behindern sich benachbarte Kristalle (insbesondere in Kornzwickeln) in ihrer elastischen Dehnung. Diese Behinderung führt entsprechend der Kornorientierung zu hohen Spannungen (Mikrospannungen). Es kommt zu örtlichen, von den umliegenden Körnern dehnungsgesteuert plastisch verformten Bereichen (Skizze oben links). Dieser Effekt zeigt sich bereits bei relativ niedrigen Makrospannungen in einer Hysterese der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve und damit in einer erhöhten Dämpfung. Werkstoffabhängig nimmt bei einer plastischen Verformung der Verformungswiderstand zu, d.h. der Werkstoff verfestigt sich. Dies gilt nicht nur für den Zugversuch mit großen plastischen Dehnungen und bei einer LCF-Beanspruchung, sondern auch für die HCF-Beanspruchung, hier im Mikrobereich an Kornzwickeln und im Kerbwirkungsbereich kleiner Fehlstellen. Der Verfestigungsvorgang läuft bei schwingender Beanspruchung über längere Zeit und entsprechend vielen Verformungszyklen ab. Verfestigung und Mikrospannungen verstärken sich gegenseitig, ein selbstverstärkender Vorgang, die sog. Wechselverfestigung (siehe hierzu auch Bild 5.4-8). Dieser Vorgang ist erst abgeschlossen, wenn sich der gesamte betroffene Bereich so verfestigt hat, dass nur noch elastische Dehnungen auftreten (stationärer Zustand). Ist die dynamische Beanspruchung ausreichend hoch, dass die Festigkeit des höchst beanspruchten verfestigten Bereichs überschritten wird, bilden sich im Elektronenmikroskop erkennbar Risse und/oder eine entsprechende Gefügeschädigung (zweite Skizze von links). Rissbildung führt zur örtlichen Nachgiebigkeit und, da es sich um einen dehnungsgesteuerten Vorgang handelt, hier zum Spannungsabbau. Die Kerbwirkung der Spitze des Risses wirkt dieser "Selbstheilung" entgegen.

Liegen die Makrospannungen unterhalb der Dauerfestigkeit, überwiegt der entlastende Effekt und es kommt zu keinem Wachstum der Mikrorisse über die Erkennbarkeitsgrenze (dritte Skizze von links).

Liegt die Makrospannung jedoch über der Dauerfestigkeit, überwiegt die Kerbwirkung der Mikrorisse und es erfolgt ein Risswachstum zu

Fortsetzung Seite 5.4-6



Fortsetzung von Seite 5.4-4

einem makroskopischen Anriss des Dauerbruchs (rechte Skizze). Die Grenzkurven der Schädigungen bzw. die Rissgrößen zeigen auch die Einsatzgrenzen möglicher zerstörungsfreier Prüfverfahren an.

An der Dauerfestigkeitsgrenze heben sich Wechselverfestigung und **Wechselzerrüttung** gerade auf.

Das obere Diagramm zeigt, ähnlich wie im Wöhlerdiagramm aber mit normierter dynamischer Belastung, auf der Ordinate die Bereiche der verschiedenen Schädigungsstadien (Bild 4.3-6.1, Lit 5.4.3.2-4).

Das dargestellte Ermüdungsmodell lässt die Deutung weiterer Phänomene, die von erheblicher praktischer Bedeutung sein können, zu:

Hochtrainieren von Werkstoffen (Bild 5.4.3.2-7, Lit 5.4.3.2-3): In einem Stufenversuch wird die Probe zuerst einer niedrigen Schwingbeanspruchung ausgesetzt und nach dem "Durchlauf" von 107 Lastwechseln gegebenfalls mehrfach erneut hochgesetzt bis es zum Schwingbruch kommt. Proben aus solchen Versuchen, deren erste Belastungsstufe ausreichend niedrig war, zeigen eine merklich höhere Schwingfestigkeit als solche die sofort über der Dauerfestigkeit belastet wurden. Dies kann damit erklärt werden, dass es in den Gefügeschwachstellen durch plastische Dehnungen und Mikrorissbildung zu einer Entlastung kam und diese somit "entschärft" wurden. Auslegungswerte die auf solche Weise ermittelt werden, können höher liegen als die später im Bauteil tatsächlich erzielbaren Eigenschaften. Damit "liegt man auf der unsicheren Seite" und erhöht das Risiko eines Bauteilversagens durch HCF.

Schädigung durch Schwingbeanspruchung: Dieser Effekt tritt ein, wenn kurzfristig die Schwingbeanspruchung so hoch war, dass sich bereits unterhalb der Dauerfestigkeit wachstumsfähige Mikrorisse bildeten. Diese Belastungsgrenze lässt sich im Wöhlerdiagramm als Schädigungslinie angeben. Solche Schädigungen können z.B. durch kurzfristige hohe Schwingbelastungen von Bauteilen bei ungewöhnlichen Betriebszuständen entstehen. Typische Beispiele sind das Anstreifen einer Verdichterschaufel und Beanspruchungen der Beschaufelung beim Pumpen des Verdichters. Es müsste daher auch möglich sein, derartige Schädigungen bei ausreichender statistischer Zahl an geschädigten Teilen, durch Schwingprüfung unterhalb der Dauerfestigkeit nachzuweisen. Solche Nachweise haben erfahrungsgemäß die Chance praktisch verwertbarer Ergebnisse.

Anmerkung: Das beschriebene Modell erklärt natürlich die Schwingermüdungsvorgänge für Gusslegierungen mit großen Körnern (im Zentimeter-Bereich, Bild 5.4.3.2-9), gerichtet erstarrter Legierungen und Einkristalle nicht befriedigend. Hier entsteht ein Anriss gewöhnlich ausgehend von Oberflächenschwachstellen (z.B. geschädigte Korngrenzen) und internen Fehlern (z.B. Poren, Bild 5.4.3.2-8 und Bild 5.4.3.2-9).

Das untere Diagramm zeigt die Phasen der Makrorissbildung, des Dauerbruchs bis zur Rissinstabilität und dem endgültigen Bruch des Bauteils (Bild 4.3-1). Aufgetragen ist die Rissgröße über der Lebensdauer bzw. Lastwechselzahl.

**Bild 5.4-3** (Lit. 5.4.3.2-9): Am Beispiel einer hochfesten Al-Legierung soll der Einfluss der Höhe dynamischer Beanspruchung auf die Lebensdauerstreuung gezeigt werden. Je steiler die Geraden für die verschiedenen Belastungen, umso kleiner ist die Streuung (Diagramm oben). Man erkennt leicht, dass bei hoher dynamischer Belastung (im LCF-Bereich, Diagramm unten) die Streuung gering ist. Belastungen in der Nähe der Dauerfestigkeit lassen die Streuung deutlich ansteigen. Ähnliches gilt auch für den **Kerbeinfluss** (Bild 5.4.4-1). Dieser nimmt mit der Belastungshöhe

Je höher die Beanspruchung, umso geringer die Streuung der Schwingfestigkeit, weil sich der Einfluss von Schwachstellen verringert.



#### ab und ist deshalb **im LCF-Bereich kleiner als im HCF-Bereich**.

Aus diesem Verhalten muss der folgende wichtige Schluss gezogen werden: Will man den Einfluss kleiner Fehler und Schwachstellen auf die dynamische Festigkeit untersuchen, sind die Prüfungen im HCF-Bereich durchzuführen.

Abgekürzte Versuche mit hoher Beanspruchung sind weniger sensibel gegenüber Kerben und damit eher "auf der unsicheren Seite".



**Bild 5.4-4** (Lit. 5.4-2): Hier soll dem Praktiker ein kurzer Überblick zu **Schwingungseffekten** im Zusammenhang mit Problemanalysen gegeben werden. Der theoretische Teil kann der umfangreichen Fachliteratur entnommen werden.

Im Rahmen oben ist eine **harmonische Schwingung** (Sinusschwingung, "A") dargestellt. In vielen Fällen handelt es sich jedoch um andere, sehr viel komplexere Schwingformen.

Wichtig ist, dass mit höherfrequenten Eigenschwingungen die Biegebelastung wegen der kleinen Biegeradien in den Schwingungsbäuchen zunimmt. So können sehr hochfrequente Schwingungen selbst bei minimalen Ausschlägen (im Bereich von 0,1 mm, Bild 5.4.3.1-5) Schwingbrüche auslösen.

Eine freie Schwingung tritt nach einer einmaligen Störung/Auslenkung auf und kehrt in Abhängigkeit von der Dämpfung nach einer Abklingzeit in die Ruhelage zurück. Die Schwingung erfolgt in sog. Eigenformen (Bild 5.4.3.1-4 und Bild 5.4.3.1-6) mit zugehörigen Eigenfrequenzen

Von einer erzwungenen Schwingung spricht man, wenn dabei eine Erregung von außen einwirkt. Abhängig davon, wie nah sich Erreger- und Eigenfrequenz kommen, wird die Schwingung verstärkt. Sind die Frequenzen gleich, spricht man von **Resonanz**. In diesem Fall werden je nach Abnahme der **Dämpfung** des angeregten Systems die Amplituden der Auslenkung bzw. der dynamischen Belastung exponentiell ansteigen (Bild 5.4-5.1).

Im Rahmen unten sind die Verhältnisse für eine unwuchtige umlaufende Welle ("E") mit beidseitiger Lagerung angegeben (Lit. 5.4-6). Dabei unterscheiden sich die Anregungsverhältnisse im Frequenzbereich unterhalb der Resonanz (unterkritischer Betrieb) von denen darüber (überkritischer Betrieb).

Im **unterkritischen Betrieb** befindet sich der Schwerpunkt des rotierenden Systems (Welle, Unwucht, durchgehende Linie) außerhalb von Welle und Drehachse ("**B**"). Die Durchbiegung vergrößert sich auf Grund der Fliehkraft und kann im Resonanzbereich bei zu niedriger Dämpfung unbeherrschbar werden.

Im **überkritischen Betrieb** befindet sich der Schwerpunkt bzw. die Unwucht zwischen Welle und Drehachse ("C") und so näher an dieser. Damit nimmt die Unwucht bzw. Auslenkung ab, der Lauf ruhiger. Man spricht von einer "Selbstzentrierung". Dieser Effekt wird bei Zentrifugen wie Wäscheschleudern genutzt (Skizzen "F1", "F2", "F3").

Bei **Turbotriebwerken** profitiert man davon im Falle großer Unwuchten (z.B. Schaufelbruch oder Fremdkörpereinwirkung, Lit. 5.4-7).

Mit einer für den Praktiker verständlichen Darstellung der kinematischen Veränderungen zwischen unterkritischem zum überkritischen Betrieb beschäftigt sich Bild 5.4-8.

Von besonderem Interesse ist neben der dynamischen Beanspruchung die **elastische Verformung der Bauteile bei Schwingungen**. Diese beeinflusst:

- Dichtspalte und damit Leckagen.
- Anstreifvorgänge mit
  - **Überhitzungen** (Gefügeveränderung, **Festigkeitsabfall**, Warmrissbildung), **Schwingungsanregung** anderer Komponenten.

Gleitverschleiß (Größe, Verteilung, Bereich),

- Lagerlebensdauern (Tragbild, Kinematik),
- *Kavitation* (ölgedämpfte Lager, Kraftstoffsysteme),

- Regler- und Ventilfunktionen werden gestört

- Schallabstrahlung,

- **Detektierbarkeit** durch Überwachungssonden,

- Schwingverschleiß (Fretting).



**Bild 5.4-5.1:** Die Dämpfung ist eine Voraussetzung für die Beherrschung unvermeidlicher Resonanzen in der Technik. Das Schwingverhalten eines Systems und der Befund betrof-

fener Bauteile kann bei technischen Problemen aussagekräftige Hinweise auf Ursachen und Schadensentwicklung ermöglichen. Die Vermeidung von Reibvorgängen kann Schäden auslösen wenn unbewusst die Dämpfung abnimmt.



Bereits die Schallabstrahlung (Lit. 5.4-8) und/ oder fühlbare Vibrationen können bei Rotoren Hinweise auf deren Ursachen geben. So wurden im unten dargestellten Fall bei Prüfläufen im Rahmen der Entwicklung deutlich **an**schwellende und abfallende Geräuschpegel ohne Frequenzänderung (Tonänderung) bemerkt. Synchron dazu traten fühlbare Vibrati-

onen auf. Die Maschine musste abgestellt werden. Bei der nachfolgenden Zerlegung fand man extreme Überhitzungen bis zum Aufschmelzen an zentrierenden Steckverbindungen der Welle. Sie entstanden durch heftige Mikrobewegung als Folge einer Wellenschwingung. Ursache war ein von Wärmedehnungen ausgelöstes Nachlassen der Vorspannung des zentralen Spannbolzens. Damit wurde ein Betrieb des Rotors in der Resonanz möglich. Offenbar hat sich dabei die Dämpfung in den Steckverbindungen auf Grund der Reibverhältnisse periodisch verändert. Davon war die Auslenkung der Welle und die Energie des Schalls bzw. der Vibrationen beeinflusst.

Bild 5.4-5.2 (Lit. 5.4-7): Im Fall einer Hubschrauberturbine kleiner Leistung (Skizze oben, Lit. 5.4-8) sollte das an sich richtige Konstruktionsprinzip Reibstellen im hochbelasteten Nabenbereich von Rotorscheiben zu vermeiden bei der Überholungsmontage verwirklicht werden. Die bis dahin übliche Montage führte dazu, dass gewöhnlich der turbinenseitige zentrische Spannbolzen mit einem Passbund die Wand der Nabenbohrung des Rads berührte. Die Relativbewegungen zwischen Spannbolzen und Nabenbohrung (Schwingungen, thermische Dehnungen) führten zu Frettingstellen in der Nabe des Turbinenrads, ohne dass jedoch dadurch gefährliche Schäden an diesen Bauteilen auftraten.

Die Berührung von Bolzen und Turbinenrad konnte mit einer genauen Zentrierung des Bolzens bei der Montage vermieden werden. Nachdem eine größere Zahl von Triebwerken ausgeliefert war, traten innerhalb der folgenden Jahre gehäuft Brüche im dünneren Dehnschaft des Spannbolzens auf, einem Bereich der keinerlei Fretting erfährt (Skizzen Mitte).

Untersuchungen ließen den Schluss zu, dass die nun frei liegenden **Spannbolzen nicht mehr durch den Reibvorgang mit der Radnabe gedämpft** wurden. So konnte nun durch Resonanz eine hochfrequente Schwingung des Bolzens (wahrscheinlich durch Zahnfrequenzen aus dem Getriebe) angeregt werden. Die zur Ermüdung des Bolzens notwendige Amplitude am Schwingungsbauch war bei der extrem hohen Frequenz (Ultraschallbereich) so klein, dass das relativ geringe Spiel zwischen Bolzen und Rad nicht überbrückt wurde, also keine Dämpfung wirksam wurde (Skizze unten).

Dieser Fall zeigt, wie vorsichtig bei einer Änderung an sich bewährter Triebwerkskonfigurationen vorzugehen ist, um eine "Verschlimmbesserung" zu vermeiden.

Bild 5.4-6 (Lit 5.4-8 und Lit. 5.4-9): Man unterscheidet (fremd angeregte) erzwungene Schwingungen oder Resonanzschwingungen, die von der Frequenz der von außen auf das schwingende System einwirkenden Anregungskräfte abhängen und selbsterregte oder Instabilitäts-Schwingungen, die unabhängig von einer äußeren Erregung und deren Frequenz auftreten.

Erzwungene Schwingung oder Resonanzschwingung: Wirkt außer Rückstellkraft und Widerstand noch eine erregende, periodisch veränderliche äußere Kraft, spricht man von einer erzwungenen Schwingung im Gegensatz zur freien Schwingung. Stimmen eine Eigenfrequenz des Bauteils und die Erregerfrequenz überein, spricht man von Resonanz.

Die anregende Frequenz ist die Drehzahl des Rotors oder deren Vielfaches. Eine kritische Drehzahl liegt vor, wenn die Drehfrequenz einer Eigenschwingung des Rotors entspricht. Anregungsfrequenzen können auch ein Mehrfaches der Rotordrehzahl (Harmonische) sein. Solche hohen Anregungsfrequenzen rühren z.B. von Leitapparaten oder Zahnrädern. Im Falle einer fremd angeregten Resonanzschwingung bleibt in erster Näherung die kritische Frequenz bei jeder Wellendrehzahl konstant. Abweichungen von diesem Verhalten kann es geben, wenn die Spannung im Bauteil (z.B. Flieh-

Fortsetzung auf Seite 14



Fortsetzung von Seite 5.4-12

kraft einer Rotorschaufel) mit der Drehzahl (ähnlich einer stärker gespannten Geigensaite) oder die Temperatur mit der Leistungsabgabe ansteigt (**Abfall des E-Moduls** mit der Temperatur führt zum Frequenzabfall; Bild 5.3-1).

Selbsterregte Schwingungen: Sie stehen mit Mechanismen in ursächlichem Zusammenhang, die in einer kritischen Frequenz umlaufen, ohne dass eine äußere Anregung einwirkt. Der charakteristische, radial ausgelenkte Umlauf (engl. "Orbiting", Bild 5.4-8) einer Welle erzeugt bei dieser Form der Rotorinstabilität eine senkrecht zur radialen Auslenkung (also tangential) wirkende Kraft auf den Rotor. Diese auslenkende Kraft wächst entsprechend der Auslenkung. Der Vorgang wird englisch mit whirling oder whipping bezeichnet. Ist die Drehzahl erreicht, bei welcher die äußere stabilisierend wirkende Dämpfung für eine solche Kraft nicht mehr ausreicht, entsteht eine Wellenauslenkung, die sich immer mehr vergrößert ("Flattern" der Welle). Man spricht von einer gekoppelten selbstverstärkenden Instabilität. Die Entstehungsdrehzahl muss mit keiner speziellen Umlauffrequenz. übereinstimmen. Auch wenn die Dämpfung die Frequenz verschiebt, führt dies, anders als bei einer Fremderregung, nicht zu einer kleineren Amplitude. Ein selbsterregendes Schwingsystem wird von interner Reibung im Rotorverband, Anstreifvorgängen des Rotors an statischen Teilen oder aerodynamischen Effekten (Bild 12.6.3.1-13),,angetrieben", d.h. verstärkt. Die Orbitbewegung kann in oder gegen die Drehrichtung erfolgen.

"A" Von Reibung im Rotorverband ausgelöstes Orbiting (engl. hysteretic whirl): Diese dynamische Instabilität ist auf die interne Reibung im Rotor (Lit. 5.4-8) zurückzuführen. Innere Reibung tritt in erster Linie an Anlageflächen des Rotors auf. Es kann sich z.B. um Zentrierbunde, Flanschflächen oder Clapperanlagen von Fanschaufeln handeln. Interne Reibung führt dazu, dass sich neutrale Dehnungs- und Spannungsachsen verlagern und eine senkrecht zur Auslenkung wirkende tangentiale Kraft, die Whirl-Instabilität einleiten. So erhöht die Auslenkung die Spannungen und diese wiederum die auslenkende Kraft. Um die Auslenkbewegung "anzustoßen", genügt oft ein kleiner Initial-Impuls. Ein solcher Impuls ist z.B. beim "Setzen" von lösbaren Fügungen (z.B. Zentriersitze) gegeben. Dieses Phänomen einer "Whirl-Instabilität" tritt nur bei Drehzahlen oberhalb der ersten kritischen Drehzahl auf. Abhilfe schafft die Vermeidung von Steckverbindungen.

"B" Durch Anstreifvorgänge ausgelöstes Orbiting: Diese "Whip-Instabilität" entsteht erfahrungsgemäß bei Anlaufvorgängen mit merklichen Reibkräften, wie sie an Schaufelspitzen und Labyrinthen auftreten. Sobald sich der Rotor und die Anstreiffläche berühren, belastet die Reibungskraft den Rotor tangential. Die Reibungskraft ist etwa proportional der Radialkraft ( $\mu$ =0,5). Damit entstehen Bedingungen für eine dynamische Instabilität, die sich gegen die Rotationsrichtung bewegt. Weil die Reibungskräfte gewöhnlich zeitabhängig auftreten (periodischer "an/aus"-Typ), ist auch die dynamische Steifigkeit des Systems periodisch zeitabhängig. Der Koppeleffekt mit dem Reibvorgang hängt von folgenden Einflüssen ab:

- Kontaktkräfte senkrecht zur Reibfläche, abhängig von Zustellung, Anstreifgeschwindigkeit, Tribosystem usw.
- Kontaktoberfläche
- Nachgiebigkeit (**Freiheitsgrade**) der anstreifenden Elemente (z.B. elastische, gedämpfte Lagerung).
- Dynamische Steifigkeit der Struktur unter normalen Betriebsbedingungen und der zusätzlichen über den Reibvorgang angekoppelten Struktur (starke/schwache Kopplung).
- Kontaktzeit im Verhältnis zur kontaktfreien Zeit (Spaltausbildung).

"C" Von der Strömung in Gleitlagern (Schmiermittel) und Labyrinthdichtungen (Leckmedium) ausgelöstes Orbiting: Gleitlager, insbesondere mit Ölschmierung werden in Band 2 Kapitel 6.3.2 behandelt. Für die folgende Darstellung wurden Luftlager gewählt. Die beschriebenen Effekte treten jedoch auch bei Ölschmierung auf. Deren Anwendung ist eher in Triebwerken unbemannter Fluggeräte von Interesse. Für Luftlager ist der "Halbfrequenzwirbel", bei dem die Welle mit der halben Drehzahl ausgelenkt wird, ein bedeutendes Problem.

Die Instabilität entsteht, wenn die Luft zwischen Welle und Lagerfläche mit halber mittlerer Geschwindigkeit der Wellenoberfläche zirkuliert. Auf Grund der Zähigkeit der Luft in dem sehr engen Spalt, baut sich vor dem Spalt ein höherer Druck als am Spaltaustritt auf. Dies führt zu einer Tangentialkraft auf den Rotor. Eine Whirl-Bewegung beginnt, wenn diese Tangentialkraft die innere Dämpfung übersteigt. Ein solcher Effekt tritt erfahrungsgemäß dann ein, wenn die Welle etwa mit doppelter kritischer Drehzahl läuft. Abhilfe schafft daher eine entsprechende Reduzierung der Drehzahl und/ oder eine geeignete Strukturierung der Lagerfläche (Segmentlager, Folienlager).

"D" Aerodynamisch induziertes Orbiting: Der Mechanismus dieses Phänomens ist offenbar noch nicht voll verstanden. Aerodynamisch wirksame Rotorkomponenten wie beschaufelte Verdichter- und Turbinenstufen, können auf Grund der Bewegung des Läufers gekoppelte Querkräfte erzeugen. Im Prinzip führt die Beschleunigung oder Verzögerung des Luftstroms zu einer Tangentialkraft an der Beschaufelung. Dies ist auch der Fall, wenn sich der Spalt am Umfang verändert.

"E" Orbiting durch in der Rotortrommel gefangene Medien: Geraten in den Rotor flüssige Medien (Lecköl, Reinigungsflüssigkeit, Schwitzwasser) und werden diese nicht durch entsprechend vorgesehene Drainagelöcher ausgeschleudert, kann es zu einer dynamischen Instabilität kommen. Die Flüssigkeit bewegt sich in tangentialer Richtung am Umfang. Dabei entstehen Reibungskräfte und entsprechende tangentiale Kräfte, die auf den Rotor wirken. Diese Instabilität tritt zwischen der ersten und zweiten kritischen Drehzahl (1. und 2. Harmonische) auf.

**Bild 5.4-7.1** und **Bild 5.4-7.2** (Lit 5.4-7, Lit. 5.4-11 und Lit. 5.4-12): Im Folgenden sollen die Mechanismen ausgewählter **Anregungs-effekte** hochfrequenter Schwingungen unter Zuhilfenahme von Beispielen behandelt werden.

"Hydrodynamisches Paradoxon" ("A")Im Bereich der Labyrinthhalterung unterhalb des Leitapparats der ersten Stufe der Niederdruckturbine (Skizze oben rechts) eines größeren Wellenleistungstriebwerks traten nach einer konstruktiven Änderung mehrere Schäden in Form von Schwingbrüchen im HCF-Bereich auf. Es handelte sich um Schwingrisse in Umfangsrichtung (Skizze unten rechts) an der vorderen Wand des Ringkanals den der Dichtungsträger bildet (Detail oben rechts).

Die konstruktive Änderung im Zusammenhang mit den Schäden war ein Draht-Dichtring zwischen Leitschaufeln und dem Labyrinthträger. Die Dichtwirkung gegen einen Leckluftstrom aus dem Raum mit dem höheren Druckniveau vor der Wand zum Ringkanal im Dichtungsträger wurde **allein durch die Federkraft** der vorderen scheibenförmigen Wand des Labyrinthträgers gewährleistet ("A2"). Nach einigen hundert Betriebsstunden zeigte der Dichtring und die Kontaktflächen der Dichtungsnut im Labyrinthträger starken Frettingverschleiß (Kapitel 5.9.3).

Als Schadensursache wurde eine Schwingungsanregung der federnden Dichtungswand bei

Fortsetzung Seite 5.4-18





Fortsetzung von Seite 5.4-15

ausreichend weit fortgeschrittenem Frettingverschleiß vermutet. Dieses Erregungsprinzip ("Hydrodynamisches Paradoxon", Lit 5.4-11) beruht auf der federnden Wirkung des Deckels und dem Druckabfall in der Leckströmung (Bernoulli) und gilt als beispielhafter physikalischer Laborversuch (Skizze unten links).

Die Bestätigung der Schadenshypothese ließ sich mit Hilfe eines einfachen Demonstrationsversuchs herbeiführen. Ein Leitapparat mit Dichtungsring wurde aufgebaut und betriebsnahe Druckverhältnisse um das Bauteil simuliert. Dabei konnte, genau wie vorausgesagt, bei ausreichendem Verschleiß und der damit abnehmenden Federkraft eine heftige Schwingungsanregung der Deckplatte mit entsprechend pulsierendem Leckluftstrom beobachtet werden.

Nachdem der Schadensmechanismus bekannt war und sich an Originalteilen reproduzieren ließ, war die Voraussetzung für eine abgesicherte Abhilfe gegeben.

Schwingungsanregung durch Leckströmung ("B", Lit 5.4-13): Die Empfindlichkeit einer Labyrinthdichtung für eine aeroelastische Schwingungsanregung durch die Leckströmung hängt in erster Linie von der Spaltänderung während des Schwingvorgangs ab und damit von der Lage der Umfangsknotenlinie. Die Phasenlage der Spaltänderung zur Phase des Druckverlaufs im Labyrinth kann eine Schwingung in Abhängigkeit von der Lage der Knotenlinie anregen oder dämpfen.

Unter Einbeziehung der Eigenfrequenz des Dichtungsteils gilt ("B1", und "B2"):

Ein Dichtring der auf der Labyrinthseite mit dem niedrigeren Druckniveau befestigt ist, wird nicht zu **aeroelastischen Schwingungen** angeregt, wenn seine niedrigste Eigenfrequenz höher als die akustische Frequenz ist. Ist der Dichtring auf der Hochdruckseite befestigt, kann er nicht angeregt werden wenn seine nied-

rigste Eigenfrequenz unter der akustischen Frequenz liegt. Allgemein gilt als **Konstruktionsregel**: Dichtungen die auf der Druckseite befestigt sind müssen gedämpft werden. Dazu werden sie gewöhnlich mit **mechanischen Dämpfern** versehen (Bild 5.4.3.3-8).

Schwingungsanregung durch Fertigungsverfahren, Reib- und Anstreifvorgänge (Lit.5.4-7 und Lit. 5.4-12): Gewöhnlich beruht die Anregung auf dem sog. "Stick-Slip-Effekt" (Bild 5.9.1-8). Als Beispiel für eine solche Anregung kann ein Streichinstrument dienen. Auch in vielen Betriebszuständen von Maschinenelementen können solche Erregungen beobachtet werden. Dazu gehört das Quietschen von Bremsen. Solche Quietschgeräusche sind kennzeichnend für hochfrequente Schwingungen. Sie können in kurzer Zeit das Bauteil schädigen. Das kann bereits erkennbar vor Rissbildung oder Bruch eintreten (Bild 5.4-2).

Selbsterregte Gasschwingungen in Hohlräumen ("D"): Eine Luftsäule kann in unterschiedlichen Anordnungen, vergleichbar einer Feder in einem Feder/Massensystem, wirken und dieses System zu Schwingungen in der Resonanz anregen. Je gößer ein Kammervolumen und der Durchmesser des Verbindungskanals ist, umso kleiner ist die Federsteifigkeit der Luftsäule. In erster Linie ist die schwingende Masse auf den Verbindungskanal beschränkt. D.h. je voluminöser die Luftsäule, umso größer die schwingende Masse. Sowohl in einer Ringkammer zwischen Scheibe und Labyrinth als auch im Hauptgasstrom können unterschiedliche Druckwellen entstehen und sich gegenseitig verstärken.

Ein "Tonraum" ("D1") besteht aus zwei kleinen geschlossenen Kammern, die durch eine Luftsäule verbunden sind. Die luftgefüllten Kammern wirken wie Federn. Solche Konfigurationen können in Triebwerken im Bereich von Kühlluft führenden Leitungen, in Entlüftungsleitungen und an Leitungen zum Druckausgleich auftreten.

Der "Helmholtz-Resonator" ("D3") besteht aus einer relativ großen Kammer, die, mit einer Luftsäule als Feder, mit der Masse der Ge-

genseite offen verbunden ist. Solche Konfigurationen treten in Triebwerken im Hauptgasstrom an Strebenverkleidungen der Gehäuse auf.

Liegt eine kleine Kammer, d.h. eine hohe Federsteifigkeit und ein großes Luftsäulenvolumen vor, die durch einen engen Kanal verbunden sind, spricht man von einem **"Boys-Resonator"** ("**D2**", Lit 5.4-14). Diese Konfiguration entspricht Ringkanälen an Zwischenstufendichtungen oder Endlabyrinthen der Verdichter und Turbinen ("**D4**"). Die relativ kleine Ringkammer ist durch einen schmalen Ringspalt mit dem Hauptluftstrom als schwingende Luftsäule verbunden.

Schwingungsanregung durch Zahnfrequenz aus Getrieben ("E"): Nachdem häufiger an Schaufeln eines Ölkühlerrades aus einer hochfesten Al-Schmiedelegierung (ca. 12 cm Durchmesser, ca. 20 000 U/min) Schwingbrüche auftraten, wurden Räder aus faserverstärktem Kunststoff ("E1") eingeführt. Diese Räder aus Kurzfaser-Pressmasse (Glasfaser/Epoxid) liefen lange Zeit ohne Beanstandungen. In einem Fall jedoch, erlitt ein Rad einen Schwingbruch (Skizze oben links) trotz der hohen inneren Dämpfung des Kunststoffs. Das Rad wurde durch ein gleichartiges Neuteil ersetzt. Auch dieses Rad brach auf ähnliche Weise innerhalb von ca. 100 Stunden. Damit wurde eine schadensursächliche Fehlstelle im Rad unwahrscheinlich.

Die Schadensanalyse ergab, dass ein Zahnrad in der Antriebskette ("E2") wahrscheinlich bei der Montage beschädigt worden war. Es handelte sich um eine kaum merkliche Deformation der Kante an der Abwälzfläche. Offenbar hat diese "kleine" Zahnbeschädigung zu der extremen Schwinganregung geführt. Nachdem das Zahnrad ausgetauscht worden war, traten auch nach langen Laufzeiten keine Schwingbrüche im Ölkühlerrad mehr auf. Dieses Beispiel demonstriert die Gefährlichkeit von Schwingungsanregungen durch Zahnfrequenzen.

Selbsterregte Schwingung, "Flattern" ("F"): Flattern kann in unterschiedlichen Systemen angeregt werden. In Wechselwirkung mit einer teilweise oder vollständig abgelösten Strömung und Wirbelbildung ('Kármán'sche Wirbelstraße, Bild 3-9.3) können sich gefährliche Schwingungen aufschaukeln. Zu solchen umströmten Körpern gehören Flugzeugflügel, schlanke Profile wie Schaufeln von Turbomaschinen, Brückenfahrbahnen (Bild 3-9.2) sowie Kamine (Bild 3-9.3). Auch mechanisch kann Flattern angeregt werden. Räder neigen bei negativem Nachlauf zum Flattern (Bild 3-9.1. Dann liegt die Aufstandskraft des Rades in Fahrtrichtung vor dem Durchstoßpunkt der Schwenkachse. So führt eine elastische Auslenkung des Rades zu einem Moment welches das Rad weiter aus der Fahrtrichtung dreht. Ist die elastische Rückstellung ausreichend angestiegen, lässt sie das Rad nach der anderen Seite pendeln und der Vorgang wiederholt sich. Wenn die Dämpfung der Lenkung und der Gelenke zu gering ist und/oder zu viel Spiel haben, kann sich der Vorgang gefährlich aufschaukeln. In Flatterfällen müssen die anregenden Parameter (z.B. Geschwindigkeit) sofort unter einen konstruktionsspezifischen kritischen Wert gebracht werden.

Selbsterregende Verbrennungsschwingungen ("G", Lit 5.4-15): Für Verbrennungsvorgänge sind niederfrequente Druckschwingungen im Bereich von 50-120 Hz (engl. "rumble") typisch.

Die vielen Einflussgrößen auf das thermoakustische Schwingverhalten einer Brennkammer erschweren die Vorhersage unzulässiger Schwingungen. Diese Einflüsse sind unterschiedlicher Natur, wie der Strömungswiderstand bzw. akustische Widerstand des Turbinenleitapparats, die Dämpfungswirkung der gelochten Brennkammerwand oder die Empfindlichkeit der Kraftstoffzufuhr und Luftzumischung für Druckschwankungen. Die Turbine reflektiert die Schallwellen ähnlich einer festen Wand, die Brennkammerwände wirken

als Dämpfer. Die Flamme "antwortet" auf die Brennkammerdruckschwankungen mit einer Wärmefreisetzungsfluktuation. Die Stärke dieser "Flammenantwort" beruht auf der akustischen Eigenschaft der Flamme. Die Wärmefreisetzungsfluktuation wird mit kompakteren Brennkammern, d.h. höherer Energiedichte intensiver. Weil kleinere Brennkammerwände eine geringere Dämpfung aufweisen, erhöht sich die Neigung zur Instabilität. Daraus ist zu schließen, dass gerade Brennkammern von Flugtriebwerken mit ihrer typisch hohen Leistungskonzentration im Rahmen einer Entwicklung zu wenig Schadstoffen besondere Probleme erwarten lassen. Folgende Gestaltungsmerkmale einer Brennkammer können die Neigung zu Verbrennungsschwingungen reduzieren:

- Änderung der "Flammenantwort"
- Erhöhung der Dämpfung der Brennkammerwände
- Kontinuierliche Abstimmung des Kraftstoff durchflusses während des Verbrennungsvorgangs über einen Regelkreis. Hierzu sind geeignete Druckaufnehmer und eine ausreichend schnelle Steuerung der Kraftstoffzufuhr notwendig.

Bild 5.4-8 : Aus einem Schadensbild lassen sich bei etwas Glück Rückschlüsse auf die dynamischen Betriebsbedingungen einer Welle ziehen. Dabei geht es um Merkmale wie Lage und Ausbildung von Schwingrissen, Laufspuren und Schädigungen an Lagerlaufbahnen und Lage und Ausdehnung von Anstreifspuren.

Die elastische Verformung der Welle/Achse eines Rotors bestimmt deren dynamische Belastung. Das gilt auch für die Lagerung mit der abstützenden Struktur. Dabei ist es von Bedeutung, ob der Betriebszustand unterkritisch oder überkritisch ist (Bild 5.4-4).

Bei unterkritischem Betrieb rotiert die Durchbiegung durch eine Unwucht um die Drehachse zwischen den Lagern ("A"). Der Schwerpunkt liegt auf der Außenseite der Welle (Bild 5.4-4). Das lässt sich mit einem Hüpfseil vergleichen ("D"). Unter diesen Bedingungen erfährt die Welle eine statische Biegebeanmit Zugspannungen spruchung auf derAußenseite. Wird dieser Zustand ausreichend häufig angefahren, kann hier ein einseitiger Biegeschwingbruch entstehen (Bild 4.4-6): Spuren von Anstreifvorgängen durch Spaltüberbrückung findet man nur oder verstärkt auf der "Unwuchtseite", nicht aber gleichmäßig am gesamten Umfang. Lager zeigen intensivere Laufspuren bis zu dynamischen Überlastungsschäden auf der Laufbahn (Ermüdungsausbrüche) des umlaufenden Rings ebenfalls beschränkt auf den Unwuchtbereich. Die Laufbahn des stehenden Rings wird jedoch von der umlaufenden Unwucht auf dem gesamten Umfang belastet. Entsprechend gleichmäßig sind die Laufspur oder die Überlastungsfolgen am Umfang.

Bei **überkritischem Betrieb** liegt der Schwerpunkt des Systems zwischen Welle und Drehachse. Im Extremfall (Drehzahl liegt weit im überkritischen Bereich) liegt er auf der Drehachse innerhalb der Welle ("B"). Diesen Zustand verdeutlicht eine flexible Welle ("C"). Die Betriebsmerkmale sind

- Schwingbruch/-riss durch Umlaufbiegung (Bild 4.4-6) verläuft weitgehend konzentrisch am Umfang.

Die Laufbedingungen einer rotierenden Welle können sich in Lage und Aussehen von Rissen und Brüchen der Welle sowie an Belastungsspuren/Ermüdungsschäden der Lager zeigen.



- Laufspur bzw. Ermüdungsausbrüche auf der Laufbahnen des stehenden Außenrings entsprechend einer schiefstehenden Welle. Am rotierenden Innenring weitgehend gleichmäßig am Umfang.

- Anstreifspuren am gesamten Rotorumfang.

Eine wichtigen Einfluss hat die **Steifigkeit der** Lager. Das bestimmt die elastische Verformung und damit die dynamische Beanspruchung der Welle (Bild 5.4-4). Je steifer die Lager, umso größer die Beanspruchung der Welle. Dieser Effekt wird durch steife Lager von Prüfmaschinen für Umlaufbiegung genutzt ("**E**").



Bild 5.4-9 : In einem Kraftfahrzeug findet man alle Arten dynamischer Beanspruchung, niederfrequent und hochfrequent. Es ist deshalb als Beispiel für den Stellenwert dynamischer Beanspruchung in der Technik gut geeignet. Der Trend einer Gewichtsminimierung bei Leistungssteigerung stellt den Konstrukteur gerade im Hinblick auf dynamische Eigenschaften wie Lärm, Vibrationen, Fahrdynamik und -komfort vor wachsende Probleme. Dabei muss die Belastung der Komponenten im Hinblick auf Kosten, Sicherheit und Lebensdauer gewährleistet sein. Häufig liegt eine Kombination aus hochfrequenten und niederfrequenten Belastungen vor. Deshalb kommen in nachfolgenden Beispielen (kein Anspruch auf Vollständigkeit) Komponenten in beiden Belastungsarten vor.

#### Komponenten mit **hochfrequenten Beanspru**chungen:

- Karosserie (Vibrationen).
- Fahrgestell (Fahrbahneinfluss).
- Abtrieb (Unwuchten, Drehmomente)
- Motor (z.B. Ventile, Federn, Kurbelwelle, Pleuel,).
- Abgasanlage (Vibrationen).
- Wälzlager (Räder, Antrieb)

Komponenten mit **niederfrequenter Beanspruchung**. Hier handelt es sich in erster Linie um Thermoermüdung, d.h. zyklische Wärmespannungen (Bild 5.4-10 und Kapitel 5.4.2.1): - Abgasanlage.

- Motor (Ventile, Kolben).
- Kupplung,
# Typische Beispiele aus dem Maschinenbau für Schäden durch dynamische mechanisch-thermische Belastungen.

	Schadon bzw		Tomperatur und
Belastungsart	Schadensablauf	Beispiele	Spannungsverlauf
1. Kurzzeitbelastung 1.1 bei konstanter	- plastische Verformung	- "Durchgehen" der Turbine - Explosion, Containmentfall - Fremdkörperschaden	$\sigma, T$ $T=f(t)$ $\sigma=g(t)$ t
Temperatur 1.2 bei schneller Temperaturänderung ("Thermoschock")	- Rissbildung - Bruch	<ul> <li>Rissbildung beim Schweißen</li> <li>Rissbildung beim Abschrecken</li> <li>Schleifrissbildung</li> <li>Bremsen, Anstreifvorgang</li> <li>Heißlauf eines Lagers</li> <li>Funkenerosion</li> </ul>	$ \begin{array}{c} \sigma, T & T^{=f(t)} & \cdots & T^{=f(t)} \\ & & T^{=g(t)} & T^{=g(t)} \\ & & Schweißen & H \\ \end{array} \\ \end{array} \\ \begin{array}{c} H \\ arten & Schleifen \\ \end{array} \\ \mathbf{t} \end{array} $
2. Zeitstandbelastung (Kriechen)	- Kriechen - Kriechporen - Rissbildung - Bruch	Statischer Betrieb: - Turbinenschaufeln - Turbinenrotoren - Druckbehälter (Kessel), Rohre - Zuganker, Schrauben	σ, T ▲T=f(t) σ=g(t) ► t
<ul> <li>3. Beanspruchung im LCF-Bereich (&lt; 10<sup>5</sup> LW)</li> <li>3.1 unter mechanischer Krafteinwirkung</li> </ul>	- Schädigung - Kriechen - Kriechporen - Rissbildung - Bruch	Dynamischer Betrieb: - Turbinenschaufeln - Turbinenrotoren - Druckbehälter (Kessel),Rohre - Zuganker, Schrauben	$\sigma, T$
3.2 durch Wärme- spannungen ("Thermo- ermüdung")		<ul> <li>Turbinenleitschaufel</li> <li>Gehäuse</li> <li>Kesselrohre</li> <li>Abgasanlagen/Auspuff</li> <li>Kupplung, Bremsen</li> <li>Chargiergestelle</li> </ul>	$\sigma, T$
4. Beanspruchung im HCF-Bereich (>>10 <sup>4</sup> LW)	- Schädigung - Rissbildung mit zykl. Rissfortschritt - Bruch	<ul> <li>Schaufel einer Turbomaschine</li> <li>Wellen, Achsen</li> <li>Gehäuse, Kessel, Rohre</li> <li>dyn. belastete Schrauben und Zuganker</li> <li>Federn</li> </ul>	$\sigma, T$
Bild 5 4-10			

#### Bremsscheiben.

An Bedeutung gewinnen auch Komponenten die durch **Drehzahl-/Fliehkraftänderungen** merklich LCF-belastet sind (Kapitel 5.4.1). - **Schwungscheibe**. Das gilt besonders bei Systemen mit **Motorabschaltung** im Stand. Dazu gehören auch

- Starter-Generatoren auf der Kurbelwelle.

- Kinetische Energiespeicher (Bild 5.2.2-0).

- Hochtourige **Elektromotoren** für den Fahrtantrieb. **Bild 5.4-10:** Diese Tabelle gibt eine Übersicht dynamischer, mechanisch-thermischer Belastungen anhand von typischen Beispielen (Lit. 5.4-8) in bauteilspezifischen Betriebsphasen. Betrachtet man das gesamte Belastungsspektrum eines Bauteils, so handelt es sich in fast allen Fällen um die zeitliche Folge und/oder die Kombination mehrerer Belastungsarten.

#### Kurzzeitbelastung:

Bei konstanter Temperatur heißt, dass keine ursächlichen Wärmespannungen miteinwirken.

Ursächlich ist eine mechanisch bedingte Belastung. Gewöhnlich handelt es sich um Gewaltbrüche als Folge eines Schadens. Dieser kann bei extremer Überlastung eines ungeschädigten Bauteils auftreten oder als Restgewaltbruch nach einem Anriss (siehe Kapitel 4.4 und Kapitel 5.2.1).

Bei schneller Temperaturänderung ("Thermoschock", Bild 5.4.2.1-3). Solche Belastungen kennt man vom Heißlauf an Bremsen, Kurbelwellen und Kupplungen. Auch in der Fertigung oder bei der Überholung tritt diese Schadensform auf. Beispiele sind Schleif- und Schweißrisse oder Rissbildung durch Funkenerosion.

Zeitstandbelastung (Bild 5.3.2-3) ist statisch. Sie tritt in den Wandungen von Druckgefäßen, Rohren und in Schrauben/Zugankern auf. Auch Rotoren unterliegen bei gleichbleibender Drehzahl dieser Belastung.

Beanspruchung im LCF-Bereich (Bild 5.4-1 und Kapitel 5.4.1) findet man insbesondere bei auslegungskonformer, begrenzter Lebensdauer. Es handelt sich um hohe dynamische Belastungen im plastischen Bereich die durchaus nicht die Merkmale einer Schwingung (periodisch) haben müssen.

Mechanische Krafteinwirkung: Gewöhnlich stehen sie im Zusammenhang mit Leistungsänderungen und Lastwechseln die sich auf Betriebsdrücke, Temperaturen und Drehzahlen auswirken.

Wärmespannungen (Thermoermüdung, (Kapitel 5.4.2.1): Es handelt sich um Wärmespannungen aus Temperaturgradienten. Diese sind häufig auf Temperaturänderungen eines das Bauteil umströmenden Mediums (Gas/ Dampf, Flüssigkeit) zurückzuführen.

Auch bei scheinbar hochfrequenten Temperaturänderungen wie an Auslassventilen von Kolbenmotoren tritt LCF in Form von Thermoermüdung auf. Es handelt sich tatsächlich jedoch um relativ niederfrequente Temperaturänderungen. Hier werden die Zyklen vom Start/ Abstellen (Hauptzyklen) und signifikanten Leistungsänderungen (Minizyklen) bestimmt. Der schnellen Änderung der Gastemperatur beim jeweiligen Auslassvorgang folgt die Ventiltemperatur nicht auslegungsrelevant.

**Beanspruchung im HCF-Bereich** (Bild 5.4-1, Kapitel 5.4.3.1): Es handelt sich gewöhnlich um **erzwungene, hochfrequente Schwingungen** mit Schadenslastwechseln oberhalb  $10^5$ . Diese sind im Resonanzbereich (Bild 5.4-4 und Bild 5.4-5.1) besonders gefährlich und müssen deshalb mit der Auslegung vermieden werden. Es können aber auch gefährlich hohe dynamische Belastungen weit außerhalb einer Resonanz bzw. Eigenform (Bild 5.4.3.1-4 und Bild 5.4.3.1-6) auftreten. Beispielsweise Risse/Brüche an Motorventilen als Folge der Öffnungs- und Schließkräfte.



**Bild 5.4-11:** Für das Verständnis von Angaben zu **Werkstoffkennwerten**, besonders für dynamische Belastungen (z.B. **Haigh-Diagramm**), ist die Kenntnis der Definition zeitlicher Spannungsverläufe notwendig.

Als Oberspannung ( $\sigma_o = \sigma_{max}$ ) wird der höchste Ausschlag einer sinusförmigen Belastung bezeichnet (Skizze links). Entsprechend gilt die Unterspannung ( $\sigma_u = \sigma_{min}$ ) für die niedrigste Belastung. Die halbe Differenz zwischen Oberund Unterspannung ist der Spannungsausschlag oder die Spannungsamplitude  $\sigma_a$ . Der Spannungsausschlag erfolgt um die Mittelspannung ( $\sigma_m$ ).

Nach Höhe der Mittelspannung werden bestimmte Beanspruchungsbereiche benannt, die

durch das Spannungsverhältnis  $R = \kappa = \sigma_{min} / \sigma_{min}$  gekennzeichnet sind. Dabei entspricht  $\sigma_{min}$  im Betrag dem kleinsten Wert,  $\sigma_{max}$  entsprechend dem Betrag des größten Werts. Es ergeben sich somit

R= -1 reine Wechselbeanspruchung, R< -1 Wechselbereich, R<+1 Schwellbereich, R=0 reine Schwellbeanspruchung

Das Diagramm rechts oben zeigt Schwingfestigkeitsgrenzen wie sie gerade in der englischsprachigen Fachliteratur (nach Haigh und Gerber, Lit. 5.4-17) verwendet werden. Aufgetragen ist die Schwingfestigkeit als ertragbarer Spannungsausschlag  $\sigma_a$  gegenüber der Mittelspannung  $\sigma_m$ . Schwingbeanspruchungen unterhalb der **Gerberparabel** bzw. der **Goodman Linie** können ohne Schaden ertragen werden.

Unten ist den verschiedenen dynamischen Belastungen jeweils ein typisches Beispiel zugeordnet. **Bild 5.4-12** (Lit.5.4-2): Die einfachste Möglichkeit die Gesamtschädigung aus Kriech- und Schwingbelastung abzuschätzen erfolgt über eine **Superposition der Schädigungen**. Die Abschätzung erfolgt analog der **Miner-Regel** für eine **lineare Schadensakkumulation** mehrstufiger Beanspruchungen (Bild 5.4.3.2-12). Sie ist formal für Low Cycle-Probleme aller Art anwendbar.

- Beliebige Reihenfolge und Größe der Lastspitzen.

- Beliebige Form des Beanspruchungs-Zeitverlaufs.

-Widerspruchsfrei von der reinen Schwingschädigung bis zur reinen Zeitstandbelastung. Besonders ist auf repräsentative **Proben** für den Werkstoffzustand im Bauteil zu achten (Bild 5.3.2-11, Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8).

Die vielseitige Anwendbarkeit bedeutet nicht, dass die Ergebnisse immer realitätsnah sind. Schwing- und Kriechschädigung müssen simultan auftreten (Diagramm links). Fliehkraftinduzierte Beanspruchungen in Rotorbauteilen beim Start-Abstell-Zyklus kommen dieser Forderung einigermaßen nah. Zu beachten sind Haltezeiten während einer Entlastung. Erholungsvorgänge können sich dabei werkstoffabhängig positiv oder negativ auf die zyklische Lebensdauer auswirken. Wenn auf Grund von Temperaturänderungen Wärmespannungen auftreten, sind die Voraussetzungen für eine so einfache Abschätzung gewöhnlich nicht gegeben. Wärmespannungen verlaufen bei Anfahr- und Abstellvorgängen meist phasenverschoben zu Fliehkraft induzierten Spannungen. So ändern sich während der Belastung die Temperaturen. Bei Thermoermüdung führen Relaxationsvorgänge (Kapitel 4.5.1.1) zur Veränderung der Maximalspannung. Werden die Maximalspannungen bei sehr unterschiedlichen Temperaturen erreicht, können verschiedene Kriechmechanismen angeregt werden (Bild 5.3.2-6 und Bild 5.3.2-8). Damit dürfte die lineare Superposition vollends unbrauchbar werden.

Auch bei längeren Haltezeiten lässt sich die Schadensakkumulation abschätzen, es ist jedoch gegenüber dem Ergebnis Skepsis angebracht.



Eine weitere Methode der Schädigungsberechnung ist die des "Strainrange Partitioning" (siehe auch Bild 5.4.3.2-12) welche plastisches Fließen und Kriechen (auch Relaxation) einbezieht.

Bild 5.4-13 (Lit.5.4-8, Lit.5.4.1-21 und Lit. 5.4.1-22): LCF-Versuche an Proben aus der Titanlegierung Ti-6Al-4V ergaben wichtige Erkenntnisse, die spektakuläre Schäden an großen Rotorteilen besser verständlich machen. Es besteht ein Zusammenhang mit der werkstoffspezifischen Sensitivität gegenüber Druckspannungen (z.B. Ti-6Al-4V, Waspaloy) oder Zugspannungen (z.B. CrNi18/8 Stähle, IN100) während der Haltezeit. Man stellte eine Haltezeit-Sensitivität, in der sich Ermüdungsund Kriechvorgänge abspielen, bei einer Vielzahl von Werkstoffen fest.

- Die **Rissfortschrittsgeschwindigkeit** in Ti-6Al-4V kann sich **bei Haltezeit** (Prüfdaten: 5 Minuten und 45 Minuten) im Spannungsmaximum (engl. dwell time, dwell-cycling) gegenüber einer dynamischen Belastung ohne Haltezeit (Prüffrequenzen 0,3-25 Hz) **um ein Vielfaches beschleunigen**. Interessanterweise ist Ti-6Al-4V druckspannungssensitiv. In diesem Fall wirken sich offenbar die bei der LCF-Belastung induzierten Druckspannungen in der "Ruhephase" einer Rotorscheibe besonders schädigend aus.



Vorsicht bei Lebensdauernachweisen mit zyklischen Schleuderversuchen. Die Haltezeit (dwell time) bei hoher Last kann das LCF-Verhalten deutlich beeinflussen und ist deswegen im Zweifelsfall einzuhalten.



Der Vorgang ist nicht voll verstanden. Er steht offenbar auch im ursächlichen Zusammenhang mit der **Diffusion bereits im Rohteil vorhan**denen Wasserstoffs (Bild 5.7.1-3).

- Der Effekt der Rissbeschleunigung hängt von der **Mikro-Gefügestruktur** und damit auch von der Wärmebehandlung ab.

- Die dynamische Beanspruchung muss in einer ungünstigen Richtung (quer) zur empfindlichen Gefügeorientierung wirken.

- Bei niedrigeren Betriebstemperaturen (z.B. 20°C) ist der Effekt deutlich größer als bei höheren (bei 75°C ist der Effekt vernachlässigbar).

- Meeresatmosphäre bzw. wässrige NaCl-Lösung beschleunigt das Risswachtum.

- Bei Temperaturen unter 75°C scheint **deh**nungsinduzierte Wasserstoffversprödung (siehe auch Bild 5.7.1-4) vor der Rissspitze die Ursache des Dwell-Effekts zu sein.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Effekte verschiedenen Einflüssen unterliegen. Es gibt offenbar unterschiedlich **empfindliche Titan**legierungen (z.B. IMI 685). Auch die Temperatur bis zu welcher der **Dwell-Effekt** auftritt scheint bei besonders empfindlichen Gefügen höher zu liegen. Dafür sprechen Schäden im Hochdruckverdichter. Hier sind Temperaturen um 200°C anzunehmen. Diese Empfindlichkeit dürfte mit der **Rohteilherstellung** in Zusammenhang stehen (siehe auch Bild 5.7.1-3) wobei **Bauteilgrößen** eine wichtige Rolle spielen. Je größer das Rohteil, umso wahrscheinlicher sind ungünstige Gefüge zu erwarten.

Die Haltezeitempfindlichkeit muss für auslegungsrelevante Daten der Werkstoffe ermittelt werden und ist gegebenenfalls bei der Bestimmung der LCF-Lebensdauer zu berücksichtigen. Dabei ist auf Druckspannungssensitivität und/oder Zugspannungssensitivität zu achten.

Damit sich Schwingrisse bilden, muss dort zumindest eine Zug- oder Schubphase vorhanden sein. Das gilt auch, wenn nur äußere Druckspannungen einwirken.



*Bild 5.4-14: Schwingermüdung* kann nur eintreten, wenn im Belastungszyklus ausreichend hohe Zug- oder Schubspannungen auftreten. Es gibt jedoch Fälle, die dieser Gesetzmäßigkeit zu widersprechen scheinen. Dabei wirken nur Druckkräfte von außen auf das System ein. Bei

genauerer Betrachtung erkennt man jedoch, dass im Anrissbereich in einer Belastungsphase tatsächlich Zugspannungen auftreten.

**Beispiel 1** (Rahmen oben): In gekerbten Bauteilen können unter äußeren pulsierenden Druckkräften im Kerbgrund Schwingrisse entstehen. In der **Druckphase** wird der **Kerbgrund** bei Überschreiten der Druckfließgrenze **plastisch gestaucht**. Der umgebende Querschnitt verformt sich jedoch nur elastisch. In der **Entlastungsphase** federt dieser auf. Dabei wird der plastisch gestauchte Bereich gedehnt wobei Zugspannungen auftreten.

**Beispiel 2** (Rahmen unten, Lit 5.4-5): Bei der Überrollung der Laufbahn eines Wälzlagers üben die Wälzkörper Druckkräfte aus. Die "Hertz'sche Pressung" erzeugt hohe Spannungsgradienten unter der Oberfläche. Die Folge sind **pulsierende Schubspannungen**. Sie lösen Schwinganrisse unter der Oberfläche aus. Diese wachsen zur Oberfläche und führen zu Ermüdungsausbrüchen. Das ist der typische, lebensdauerbestimmende **Versagensmechanismus von Wälzlagern**.

Es gibt natürlich noch weitere ähnliche Phänomene in der Technik. Dazu gehören Schadensmechanismen der

- Kavitation (Bild 5.5.1.3-1),
- Tropfenschlag (Bild 5.5.1.2-1) und
- Partikelerosion (Bild 5.5.1.1-1).

In diesen Fällen prallen viele kleine Partikel oder Tröpfchen auf die Oberfläche, die als Folge mit Mikrorissen und/oder Ausbrüchen ermüdet.

Bildbeschreibung vorhergehende Seite

# Literatur zu Kapitel 5.4

- **5.4-1** G.Lange, "Makroskopische Erscheinungsformen des Schwingbruchs", "Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle" 5.Auflage, ISBN 978-3-527-30417-2, 2001, Verlag WILEY-VCH, Seite 103-146.
- **5.4-2** "Schwingung", aus 'Wikipedia, der freien Enzyklopädie', de.wikipedia.org, Stand Juni 2010, Seite 1-8.
- **5.4-3** K.Klötter, "Kinematik der Schwingungen", "HÜTTE Des Ingenieurs Taschanbuch", 28. Auflage, 1955, S. 566-639.
- **5.4-4** "Schwingung", aus 'Wikipedia, der freien Enzyklopädie', de.wikipedia.org, Stand Juni 2021,
- **5.4-5** O.Zwirlein, H.Schlicht, "Werkstoffanstrengung bei Wälzlagerbeanspruchung Einfluss von Reibung und Eigenspannungen", Zeitschrift "Werkstofftechnik", 11, 1-4 (1980), Seite 1-14. Seite 1-8.
- **5.4-6** "Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau", Springer-Verlag Berlin/Göttingen/ Heidelberg, zwölfte Auflage, 1961, Seite 266-273.
- 5.4-7 A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2", www.Turboconsult.de, ISBN 3-00-008429-0, 2001, Kapitel 6.3 und Kapitel 7.2.2, Kapitel 7.2.3 und Kapitel 8.2.
- **5.4-8** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 3",www.turboconsult.de, ISBN 3-00-017733-7, 2003, Kapitel 11.2.2.1, Kapitel 12.6.3.1 und Kapitel 12.6.3.3.
- **5.4-9** F.F. Ehrich, "Identification and Avoidance of Instabilities and Self-Excited Vibrations in Rotating Machinery". Proceedings Paper ASME 72-DE-21 der "Design Engineering Conference & Show", Chicago, Ill., May 8-11, 1972, Seite 1-8.
- **5.4-10** C. Lechner, J. Seume, "Stationäre Gasturbinen", Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-42831-3, 2003 Seite 395-400, 481 und 483.
- **5.4-11** M.v. Ardenne, G. Musiol, S. Reball, "Effekte der Physik und ihre Anwendungen". Verlag Harri Deutsch, 2. ergänzte Auflage, Seite 463.
- **5.4-12** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 4",www.turboconsult.de, ISBN 3-00-017734-5, 2005, Kapitel 16.2.2.5.

- **5.4-13** J.S. Alford, "Protection of Labyrinth Seals From Flexural Vibration", Zeitschrift "Journal of Engineering for Power", April 1964, Seite 141-148.
- **5.4-14** J.S. Alford, "Protecting Turbomachinery From Unstable and Oscillatory Flows", Zeitschrift "Journal of Engineering for Power", October 1967, Seite 513-528.
- **5.4-15** M.Zhu, A.P.Dowling, K.N.CBray, "Self-Excited Oscillation in Combustors With Spray Atomizers", ASME Paper 00-GT-108 des "International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition", Munich, Germany, May 8-11, 2000.
- **5.4-16** D.Wissussek, "Stick-Slip-Bewegungen (Ruckgleitungen)-Reibungsschwingungen", Institut für Konstruktionstechnik u. Kolbenmaschinen, Seite 1 und 2.
- **5.4-17** ASM Handbook, Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 11, "Failure Analysis and Prevention", Kapitel "Fatigue Failures", Seite 102 und 112.
- **5.4-18** U.Krupp, "Mikrostrukturelle Aspekte der Rissinitiierung und -ausbreitung in metallischen Werkstoffen", Habilitationsschrift, Universität Siegen, urn:nbn:de:hbz:467-922, Februar 2004, Seite 1-253.

# 5.4.1 Zyklische Ermüdung im plastischen Bereich (LCF)



**LCF** (engl. low cycle fatigue, auch als Kurzzeitermüdung bezeichnet, Bild 5.4-1) ist nicht durch eine niedrige Frequenz definiert, obwohl dies der häufigste Fall ist. Kennzeichnend ist die Belastungshöhe bei der eine "**merkliche plastische Verformung**" in der lebensdauerbestimmenden Bauteilzone auftritt. Das führt zu einem Versagen durch Schwingermüdung unter ca. 10<sup>5</sup> Lastwechseln. Dabei ist die Frequenz oder der Zeitraum nicht definiert. Derartige Belastungszyklen werden in den meisten Fällen von sehr niederfrequenten mechanischen Lasten wie Fliehkraftänderungen oder Änderung der dadurch bedingten Gasdrücke und behinderten Wärmedehnungen induziert. Meist handelt es sich dabei um Start-Abstell-Zyklen und Leistungsänderungen. Es ist jedoch auch denkbar, dass als Folge eines Schadens kurzzeitig hochfrequente plastische Verformungen (z.B. Un-wuchten und/oder Anstreifvorgänge auftreten und zu einem LCF-Bruch führen.

Es gibt besondere Gebiete in denen Bauteile unter LCF-Beanspruchung stehen. Trotzdem ist dies nicht immer Auslegungsbestandteil.

- Luft- und Raumfahrt. Hier dominiert die Forderung nach besonders niedrigem Gewicht bei hoher Leistung (Leistungskonzentration). Das gilt in hohem Maß für Flugzeugrümpfe, Tragflächen (in Turbulenzen) und Flugtriebwerke.
- **Militärische Anwendungen** mit begrenzter Auslegungungslebensdauer (z.B. Lenkwaffen wie Cruise Missiles).
- Sportfahrzeuge wie Rennwägen und Rennmotorräder.
- Sportgeräte wie Fahrräder.

Interessant ist, dass in vielen Fällen, besonders bei **Sportgeräten** wie Fahrrädern, die **LCF- Belastung offenbar nicht immer bewusst** und deshalb nicht Auslegungsbestandteil ist (siehe Seite 5.4.1.2-1). Das lässt sich aus vergleichsweise häufigen Schäden schließen.

**Bild 5.4.1-1:** Für den Konstrukteur stellt sich die Frage wann er in der **Auslegung** eine LCF-Beanspruchung zu berücksichtigen hat. Gewöhnlich treten diese zyklischen, plastischen Verformungen in bestimmten, eng begrenzten lebensdauerbestimmenden Zonen des Bauteils auf. Diese zu erkennen ist nicht selbstverständlich und erfordert umfangreiche Berechnungen der Spannungsverteilungen im Bauteil. Dabei sind alle relevanten Einflüsse zu berücksichtigen. Dazu gehören

-Kerbeinflüsse,

- örtliche Werkstoffbesonderheiten (z.B. Schweißungen).
- Verbleibende Eigenspannungen.

# Für das **Erkennen einer LCF-Beanspruchung** gibt es mehrere Indizien.

- Vorschriften und Nachweise.

- Betriebserfahrung mit vergleichbaren Bauteilen. Diese berücksichtigen Schadensfälle.

- Abnahmepflichtige Bauteile mit entsprechenden Forderungen.

- Anlagen bzw. deren Bauteile die in **regelmäßigen Abständen zerstörungsfrei auf Anrisse überprüft** werden müssen.

- Steigerung der Belastung bereits hochbeanspruchter Bauteile. Gefahr rissauslösender unvermeidlicher Fehlstellen.

Im Folgenden werden Beispiele für Bauteile mit potenzieller LCF-Beanspruchung angegeben. "A" Flugzeugzelle: Der dargestellte Flugzeugtyp war das erste Passagierflugzeug mit Turbotriebwerken. Die große Flughöhe führte mit der Druckdifferenz zwischen Kabine und Umgebung zu einer unerkannt hohen zyklischen Beanspruchung der Kabine. Es kam zu Anrissen in Ecken der nicht optimal gestalteten Fenster. In mehreren Fällen kam es zur Explosion. Diese Katastrophen lenkten die Aufmerksamkeit auf die kritische Beanspruchung im plastischen Bereich. Damit war die Erfahrung der Auslöser für die geeignete Auslegung. "B" Zugachsen: In diesem Fall wurden Schwachstellen bei konventioneller Belastung durch die Steigerung (Geringere tragende

Querschnitte für eine Gewichtseinsparung) **des Belastungsniveaus** zu anrissgefährdeten Fehlstellen (Bild 3.2.1-1). Weil eine schnelle Abhilfe nicht möglich ist, werden nun die Achsen in relativ kurzen Zeitabständen einer Ultraschallprüfung unterzogen.

"C1" Druckkessel: LCF-lebensdauerbestimmende Bereiche sind besonders an Kerben im Wandungsbereich zu erwarten. Sie treten an Einschweißstutzen, Wartungsöffnungen und angeschweißten Abstützungen auf. Erschwerend kommt der Einfluss von Schweißnähten in kritisch hoch belasteten Zonen hinzu. Sie wirken als Form- und Gefügekerbe (Bild 5.4.4-1), und können sich mit Festigkeitsabfall, Zähigkeitsabfall und Eigenspannungen anrissfördernd auswirken.

"C2" Druckgasflaschen: Müssen je nach Anwendung nach 12 000 bis 80 000 Prüf-Lastwechseln entsprechend dem Druck der Wasserdruckprüfung dicht sein (Lit. 5.4.1-23).

"D" Hebezeuge und Krananlagen: Diese Anlagen sind abnahmepflichtig und regelmäßig zu überprüfen. Sie sind durch das Aufnehmen und Absetzen von Lasten zyklisch beansprucht. Als typische Komponente sind Kranhaken zu nennen. Hier fordern Vorschriften und Abnahmen die direkte oder indirekte (Erfahrungswerte) Berücksichtigung von LCF-Beanspruchungen bei der Auslegung.

"E" Transportgeräte: ein typisches Beispiel sind Gabelstapler. Beispielsweise muss der Bereich der Ecke am Übergang der Gabel in die hebende Struktur regelmäßig auf Risse zerstörungsfrei geprüft werden (Eindringprüfung). "F" Verschraubungen: Besonders hoch niedrigzyklisch belastete Verschraubungen in einem dehnungsgesteuerten System werden gewöhnlich als Dehnschrauben ausgelegt. Typisches Beispiel sind Verschraubungen von Längsflanschen an Gehäusen großer Turbomaschinen. Dazu gehören Industriekompressoren, Dampfturbinen und Gasturbinen schwerer Bauart. Hier wirken sich Belastungen durch hohe Drücke im Gehäuse und zyklische Wärmedehnungen bei instationärem Betrieb (Anfahren, Abstellen) aus. Solche Verschrau-

# Welche Indizien zeigen dem Konstrukteur an, ob bei einem Maschinenelement mit LCF-Beanspruchung zu rechnen ist?



bungen werden im Zuge einer **Anlagenrevision** auf Anrisse zerstörungsfrei überprüft.

"G" Rotoren von Turbomaschinen werden heute standardmäßig auch LCF-ausgelegt. Auch Rotoren von Pumpen, Ventilatoren, Schwungräder, Energiespeicher, Kupplungen und Bremsen sind LCF-beansprucht. Die lebensdauerbestimmenden LCF-beanspruch-

#### ten Zonen sind oft eng begrenzt auf **konstruk**tive Kerben wie

- Bohrungen von Verschraubungen,
- eine Nabenbohrung und

- Kerben am Umfang zur Aufnahme von Schaufeln.



Bild 5.4.1-2: Die Eingrenzung niedrig zyklischer Beanspruchung (engl. Low Cycle Fatigue = LCF) im Bereich der Kurzzeitermüdung zeigt das Wöhlerdiagramm in Bild 5.4-1. LCF-Beanspruchung lässt sich in isotherme- und nicht-isotherme-Ermüdung unterscheiden. Die isotherme Ermüdung erfolgt bei konstanter Temperatur und von außen aufgebrachter zyklischer Beanspruchung. Dies kann über Trägheitskräfte wie die Fliehkraft der Rotorkomponenten, von außen angreifende Kräfte (z.B. Einspannkräfte, Gaskräfte) oder sehr hohe Schwingbeanspruchung (erzwungen, z.B. bei einem Folgeschaden; Resonanz, z.B. bei Flatterschwingungen) erfolgen.

Nicht-isotherme-Ermüdung kann, je nachdem ob ein "äußerer Zwang" (z.B. Fliehkräfte) oder ein "innerer Zwang" (z.B. durch behinderte Wärmedehnung, Bild 5.4.22.1-2) vorliegt (Turbinenrad, Skizze unten links), unterteilt werden.

Bei "äußerem Zwang" spricht man von thermisch-mechanischer-Ermüdung (engl. Thermo-Mechanical-Fatigue = TMF). Typisches Beispiel ist der Nabenbereich eines Turbinenrades in dem sich Wärmespannungen mit hohen, fliehkraftbedingten Spannungen zyklisch überlagern. Diese Überlagerung kann in Phase oder phasenverschoben auftreten.

Eine thermische Ermüdung (engl. Thermal Fatigue = TF) entsteht, wenn Temperaturwechsel zu Temperaturgradienten im Bauteil führen. Eine behinderte Wärmedehnung mit plastischer Verformung baut entsprechende Spannungszyklen auf ("innerer Zwang", dehnungsgesteuerter Vorgang, Bild 5.4.1.1-9). Von außen einwirkende Kräfte spielen dabei keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Typisches Beispiel sind Hochdruckturbinen-Leitschaufeln bei denen TF-Rissbildung unvermeidlich erscheint und häufig in spezifizierten Grenzen zugelassen ist (Skizze unten rechts).

# 5.4.1.1 Grundlagen zum LCF-Schadensmechanismus



LCF-Beanspruchung ist definiert durch so hohe dynamische Belastung, dass "merkliche" plastische Dehnungsamplituden auftreten, die zu einer Anrissbildung innerhalb von ca. 10<sup>5</sup> Lastwechseln führen (Bild 5.4-1 und Bild 5.4.1.1-2). Die "Werkstoffausnutzung" steigt aus Kostengründen und Ressourcenschonung beständig. Das heißt, das Verhältnis von Bauteilfestigkeit zur Belastung und damit die Sicherheitsabstände sind relativ gering (Kapitel 3.2.1). Das führt dazu, dass bereits vergleichsweise kleine Fehlstellen (Bild 3.2.1-1) wie Werkstoff- oder Fertigungsfehler ab den ersten Lastwechseln einen LCF-Anriss auslösen können. Voraussetzung für LCFbelastete Bauteile ist, dass die Qualitätssicherung die Fehlergröße sicher begrenzt. Ein Vorteil der LCF-Beanspruchung ist, dass Belastungen und notwendige Werkstoffkennwerte für eine sichere Auslegung ausreichend bekannt sind. Falls Risse auftreten sollten, besteht die Chance einer Risikobewertung über den zyklenabhängigen Rissfortschritt und die kritische Risslänge (Bild 4.3-1 und Bild 4.3-3). Dies ist bei Schadensfällen von großer Bedeutung, um über Zwischeninspektionen und Zyklenbegrenzung ausreichend Zeit für Maßnahmen zu haben.

Natürlich benötigt ein LCF-Anriss, entsprechend der jeweiligenWerkstofffestigkeit sehr unterschiedliche Spannungsamplituden. Die notwendige zyklische plastische Verformung bedeutet jedoch nicht, dass sich das gesamte Bauteil, z.B. eine Rotorscheibe, äußerlich (z.B. am Umfang) messbar plastisch verformt. Es ist vielmehr eher so, dass die lebensdauerbestimmenden plastischen Verformungen nur in sehr begrenzten, besonders hoch belasteten Bauteilbereichen auftreten (Bild 5.4.1.1-6). Es handelt sich z.B. bei Rotorscheiben um **Bohrungen, Formkerben** oder den Bereich um die **Nabenbohrung** (Bild 5.4.1.1-2). Die **eng begrenzten plastischen Verformungen** sind gewöhnlich von einem, lediglich elastisch verformten, größeren Volumen umgeben. Die Entlastung (Ruhezustand) lässt ein Eigenspannungsgleichgewicht zwischen der plastisch verformten Zone und seiner Umgebung entstehen. Dabei erfährt die LCF beanspruchte Zone hohe Druckspannungen, während sich die Umgebung lediglich geringfügig elastisch aufweitet und unter Zugspannungen steht (Bild 5.4.1.1-9).



**Bild 5.4.1.1-2:** Der Unterschied zwischen LCF (**Kurzzeitschwingermüdung**, engl. Low Cycle Fatigue) und HCF (Zeitschwingermüdung, engl. High Cycle Fatigue) lässt sich gut im **Wöhlerdiagramm** (Diagramm oben und Bild 5.4-1) erklären. Dieses kennt Werkstoffe deren Wöhlerkurve ab ca. 10<sup>7</sup> Lastwechsel horizon-

tal verläuft, also eine **Dauerfestigkeit** aufweisen (z.B. martensitische Stähle) unter der kein Schwingbruch auftritt. Al-Legierungen und Titanlegierungen haben keine ausgeprägte Dauerfestigkeit. Hier fällt die Wöhlerkurve weiter ab. Belastungen im Bereich der **Zeit** (schwing) **festigkeit** liegen oberhalb der Dau-

erfestigkeit. Nach einer belastungsabhängigen Zeit kommt es zum Schwingbruch. Diese Aufteilung des Wöhlerdiagramms erfolgt also belastungsorientiert. Im angelsächsischen Raum führt man dagegen eine Aufteilung in Abhängigkeit von der zu erwartenden Lebensdauer durch. Dynamische Beanspruchungen, die zu einer "merklichen plastischen Verformung" im Anrissbereich führen, liegen definitionsgemäß im LCF-Bereich. Sie lassen weniger als 10<sup>5</sup> Anrisslastwechsel zu. Interessant ist die "schwammige Definition" der Verformungsamplitude, im relativ weiten Übergangsbereich. Oft sind derartige Verformungen auf den ersten Blick nicht erkennbar. So zeigen in ihrer zyklischen Lebensdauer begrenzte Bauteile (z.B. Rotorscheiben) keine deutliche Aufweitung an Innen- und Außendurchmesser.

Die untere Skizze macht an einer Situation aus dem Alltagsleben den Schadensmechanismus einer (extremen) LCF-Beanspruchung verständlich. Will man **mit der Hand einen Draht brechen**, muss dieser wiederholt plastisch verbogen werden. Der Draht versagt durch LCF. Natürlich ist die Zahl der Lastwechsel in Bauteilen deutlich höher, der Mechanismus jedoch vergleichbar.

Bei einem Stahldraht lässt sich ein Anstieg der Biegekraft registrieren, der Werkstoff verfestigt sich (Bild 5.4.1.1-5). Nach einigen Lastwechseln wird der Draht brechen. Die Erwärmung bei diesem Vorgang ist für die Erklärung nicht von Bedeutung. So zeigt sich die zur Plastifizierung eingebrachte Biegearbeit. Ein rostiger Draht (mit Korrosionskerben) benötigt deutlich weniger Lastwechsel bis zum Bruch, als ein blanker Draht. Kerben und Fehlstellen senken die LCF-Festigkeit ab, bzw. verkürzen die LCF-Lebensdauer. Sie sind in derartig beanspruchten Bauteilzonen unbedingt zu vermeiden.

*HCF-Brüche* (Zeitschwingbrüche, Dauerbrüche) zeigen dagegen keine merklichen Anzeichen plastischer Verformung. Solche Brüche wirken auch in duktilen (zähen) Werkstoffen spröd.

Wie die Skizze unten links zeigt, beschränken sich die LCF-beanspruchten Bauteilbereiche (hier einer Rotorscheibe) auf kleine Volumina in Zonen, die eine Spannungserhöhung infolge Kerbwirkung erfahren. Es sind die für die Auslegungslebensdauer relevanten Bauteilzonen. Hierzu gehören Radien zwischen Querschnittssprüngen, Bohrungen für Verbindungsbolzen und die Nabenbohrung. Diese Zonen erfahren unter Fliehkraft- und Wärmedehnungen hohe Spannungen, die bei heute üblichen Belastungen lebensdauerbegrenzter Bauteile immer plastische Dehnungen zur Folge haben. Nach einer Entlastung bauen sich zwischen den plastisch verformten Bereichen und den lediglich elastisch verformten deutlich größeren benachbarten Zonen Eigenspannungen auf. Die stehen bei Stillstand in einem Gleichgewichtszustand (Bild 5.4.1.1-9). Deshalb kann sich die örtliche plastische Verformung in äußerlichen Maßänderungen (z.B. des Scheiben-Außendurchmessers) kaum bemerkbar machen (Bild 5.4.1.1-9).

Abschließend sei noch Folgendes klargestellt, um ein häufiges Missverständnis auszuräumen: Der Buchstabe "F" in den Begriffen HCF und LCF steht für "fatigue" = Ermüdung und nicht für Frequenz. Obwohl meist die große Zahl der Bruchlastwechsel und die vergleichsweise moderate Spannungsamplitude bei HCF-Brüchen mit hochfrequenten Schwingungen in Zusammenhang steht, ist es doch durchaus denkbar, dass sich HCF-Brüche auch bei"LCF-typischen" niedrigen Frequenzen (z.B. Start/Abstellzyklen) akkumulieren. Beispiel wäre eine Spitzenlast-Gasturbine mit "zig" Jahren Betriebszeit, die täglich nur wenige Male gestartet wird.

Umgekehrt können aber auch LCF-Brüche von hochfrequenten Schwingungen mit extremen Amplituden ausgelöst werden. Solche hohen Belastungen können z.B. bei Flatterschwingungen oder beim Überlaufen eines abgebrochenen Schaufelblattes, das im Gehäuse anliegt, auftreten.



**Bild 5.4.1.1-3** (Lit 5.4-17): Im Folgenden wird eine Anleitung zur **Abschätzung der zulässigen Fehlergröße** (maximale Schwachstelle) von LCF-belasteten Bauteilen gegeben. Einen Ansatz für HCF zeigt Bild 5.4.3.2-8.

Die zyklische Beanspruchung der Scheiben von Turbomaschinen liegt in den die Lebensdauer bestimmenden Bauteilzonen im LCF-Bereich und damit weit über der Streckgrenze. Für eine Abschätzung der maximalen Fehlergröße unter auslegungsgerechter LCF-Beanspruchung kann entsprechend dem angegebenen Schema vorgegangen werden:

"1": Die Erfahrung lehrt, dass lebensdauerbestimmende LCF-Anrisse an Fehlstellen (Fertigung, Material) entstehen. Die Größe dieser Fehlstellen bestimmt damit die Lebensdauer. Wichtig ist, ob die Spannungskonzentration auf Grund der Beanspruchung bzw. der nicht ausreichend sicher auffindbaren Fehlergröße ("4") zum sofortigen Rissfortschritt führt oder von einer Inkubationszeit ausgegangen werden kann (Bild 4.3-1). Hier ist über die anzuwendende Auslegungsphilosophie zu entscheiden. Liegt die geforderte Lebensdauer innerhalb der Inkubationszeit, bedeutet dies hohe Sicherheit. Das Festigkeitspotenzial des Werkstoffs wird dabei jedoch nicht voll genutzt. Das bedeutet höheres Gewicht und/oder niedrige Drehzahlen. Je höher die Ausnutzung, umso kleinere Fehler müssen sicher gefunden werden. So steigt zumindest der Aufwand für die Qualitätssicherung erheblich ("4"). Lässt sich die Forderung, mit der Lebensdauer innerhalb der Inkubationszeit zu bleiben, nicht realisieren, muss das Risswachstum mit einbezogen werden. Damit ergeben sich Unsicherheiten, die mit aufwändigen Nachweisen wie Bauteilversuchen und umfangreicher Ermittlung bruchmechanischer Werkstoffdaten ausreichend minimiert werden müssen.

**"2":** Eine **bruchmechanische Betrachtung** klärt die zulässige **Fehlergröße** des zu erwartenden Rissfortschritts sowie die Lebensdauer bis zur kritischen Risslänge (Rissgröße bei Restbruch). Hierzu ist die ausreichende Kenntnis der relevanten Werkstoffdaten (Paris-Beziehung, Bild 4.3-3) und Bauteilbeanspruchung notwendig (Bild 5.4-12 und Bild 5.4.1.1-7). Wenn z.B. die für den Rissfortschritt entscheidende Risszähigkeit deutlich von der Gefügeorientierung (Bild 4.3-9) und dem zeitlichen Belastungsablauf abhängt (Bild 5.4-13) kann der Rissfortschritt unerwartet früh erfolgen.

"3": Dieses Diagramm gibt die zu erwartende Anzahl Fehler bestimmter Größen in typischen Scheibenwerkstoffen an (siehe auch Bild 4.3-17). Die Abschätzung der maximal zulässigen Fehlergröße erreicht jedoch mit diesen Diagrammangaben nicht die für eine Ausfallrate von 10<sup>-8</sup> /Betriebsstunde in Flugtriebwerken notwendige Sicherheit. So weiß man, dass z.B. sehr harte Einschlüsse die LCF-Festigkeit besonders negativ beeinflussen. Deshalb richtet sich die zulässige Betriebsbeanspruchung nach der Betriebserfahrung mit vergleichbaren Scheiben und Bauteilen. Die Auswertung solcher Erfahrungen muss trotz unterschiedlichen Abnahmekriterien, Nachweisen, Herstellung und Belastung in den auszuwertenden Fällen möglich sein.

"4": Um die Fehlergröße unter den der Auslegung zu Grunde liegenden Wert ("1") ausreichend sicher begrenzen zu können, muss ein seriengeeignetes zerstörungsfreies Prüfverfahren und/oder eine gleichwertige Qualitätssicherungsstrategie (z.B. Verfahrensüberwachung) vorhanden sein. Damit ist das Auffinden unzulässig großer Fehler zu garantieren.

Viele Oberflächen (-nahe) Fehler wie fertigungs- und handhabungsbedingte Riefen und Schädigungen (z.B. Gefügeveränderung durch Überhitzung) lassen sich durch Verfestigen (Kugelstrahlen, Rollen) entschärfen. Dabei kommt dem Verfestigungseffekt offenbar eine

entscheidende Bedeutung zu. Die induzierten Eigenspannungen dürften sich unter der plastischen Verformung in den LCF-kritischen Bereichen schnell abbauen.

Anders scheinen sich Eigenspannungen zu verhalten, die über größere Querschnittsbereiche wirken (Bild 4.3-19)

Es sei angemerkt, dass diese Verfestigungsverfahren bisher als zusätzliche Sicherheit genutzt werden, nicht aber Bestandteil der Auslegung sind. Werden die mit Oberflächenverfestigung erzielbaren LCF-Festigkeiten Bestandteil der Auslegung, können neue Unsicherheiten entstehen (Bild 3.2-3).

Bild 5.4.1.1-4 (Lit. 5.4.1-2): Zur Auslegung eines Bauteils entsprechend der geforderten LCF-Lebensdauer (sichere Lastwechselzahl) werden geeignete Werkstoffdaten benötigt. Dabei wird in Probenversuchen wie folgt vorgegangen:

Schritt 1: Zugproben werden in sog. Pulsern (meist hydraulisch) dehnungsgesteuert belastet. D.h. es wird nicht wie beim normalen Schwingfestigkeitsversuch eine bestimmte zyklische Kraft bzw. ein Spannungsausschlag aufgebracht. Bei **Dehnungssteuerung ist die Dehnungsamplitude konstant**, d.h. aufgezwungen. Dies erfolgt auch dann, wenn sich die für die Dehnung (plastisch und elastisch) benötigte Kraft durch **Verfestigung** oder **Entfestigung** der Probe verändert. In dieser Phase ergibt sich, kein reiner Übergang der Verformungsenergie der Probe in elastische Verformung Prüfmaschine. Die plastische Verformung zeigt sich im  $\sigma$ -  $\varepsilon$ -Diagramm als Hysterese zwischen Dehnungs- und Stauchvorgang.

Schritt 2: Die Probe wird so lange zyklisch belastet bis die sich einstellende mittlere Spannungsamplitude um 5 % abfällt. Dann spricht man von einem Versagen der Probe. Aus dem Verlauf der maximalen Spannungsamplitude über der Lastwechselfolge (Lebensdauer) wird die ertragbare Spannungs- bzw. plastische Dehnungsamplitude ermittelt. Definitionsgemäß ist es die, zur halben Anriss-Lastwechselzahl ( $N_A$ /2) gehörige Spannung.

Schritt 3: Aus vielen in Schritt 1 und 2 dargestellten Probenversuchen mit unterschiedlichen Dehnungsamplituden wird eine zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve konstruiert. Diese wird also nicht wie im normalen Zugversuch mit einer stetigen Belastungsgeschwindigkeit bis zum Bruch an einer einzelnen Probe ermittelt! Aus der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve lassen sich nun für die zulässigen Bauteilbelastungen die auslegungsrelevanten Spannungs- und Dehnungsamplituden entnehmen.

Schritt 4: Mit den Probenwerten aus Schritt 1 und 2 kann auch ein Schwingfestigkeitsdiagramm erstellt werden. Dafür wird die plastische Dehnungsamplitude über den Anrisslastwechseln (technischer Anriss, halbelliptisch mit 0,8 mm Länge) aufgetragen (Bild 3.2.1-1). Erfolgt die Auftragung auf beiden Achsen logarithmisch, erhält man für metallische Konstruktionswerkstoffe ein mit den Anrisslastwechseln abfallendes Streuband.





Bild 5.4.1.1-5 (Lit 5.4.1-2): Diese Diagramme zeigen die statische und die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve eines niedrig festen Werkstoffs (links) und eines hochfesten Schmiedewerkstoffs. Der niedrig feste Werkstoff vom "V2A-Typ", ist ein austenitischer Stahl mit sehr niedriger Streckgrenze und großer Bruchdehnung. Seine zyklische Spannungsdehnungskurve liegt auf Grund der besonders verfestigenden Eigenschaften weit über der statischen. Die Spannungsamplitude nähert sich der des hochfesten Werkstoffs. Liegt die zyklische Kurve oberhalb der statischen, handelt es sich um einen verfestigenden Werkstoff (siehe hierzu auch Bild 5.4.1.1-4). Dieser Werkstoff wird wegen seiner guten Verformbarkeit

aber niedrigen Fließgrenze für mechanisch niedrig belastete Blechkonstruktionen verwendet. Sie weisen jedoch einen hohen Widerstand gegen Thermoermüdung auf (z.B. Heißgasführungen).

Rechts sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für einen "Standardwerkstoff" der Scheiben von Turbomaschinen dargestellt. Hier liegen die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven sowohl bei Raumtemperatur als auch bei einer Betriebstemperatur von 600°C unter den statischen Kurven. In diesem Fall spricht man von einem **entfestigenden Verhalten**, auch wenn eine Werkstoffverfestigung zu beobachten ist.



**Bild 5.4.1.1-6:** Es ist nicht unbedingt auf den ersten Blick erkennbar, wie die LCF-Beanspruchung in einem Bauteil, hier einer Turbinenscheibe, der **dehnungsgesteuerten Belastung** einer Probe im Pulser entspricht. Solche Proben sind Basis der Lebensdauerauslegung. Für Thermoermüdung, ebenfalls eine Form der LCF-Belastung, ist eine Erklärung in Bild 5.4.2.1-2 gegeben.

Die Fliehkräfte und daraus entstehende LCF-Belastungen in einem Rotor bauen sich bis zu einer von der zul. Drehzahl begrenzten Höhe auf. Dabei werden lediglich kleine, aber die Lebensdauer bestimmende kerbbeeinflusste Bereiche der Scheibe plastisch verformt (Skizze rechts). Der gesamte, große umliegende Bereich hat sich lediglich elastisch wie eine Feder gedehnt. Ist die Scheibe in Ruhe, befinden sich die plastifizierten Bereiche unter Druckeigenspannungen, die benachbarten elastischen Zonen unter Zugeigenspannungen. Beim erneuten Hochfahren werden die plastisch verformten Bereiche nur soweit unter Zug verformt wie es die elastische Dehnung der Umgebung zulässt. Dies entspricht einer dehnungsgesteuerten Zug-Druck-Belastung im Pulser. Der Pulser selbst repräsentiert die großen elastisch gedehnten Bauteilzonen. Die kleinen plastisch verformten Zonen der Scheibe entsprechen der LCF-Probe.

Bild 5.4.1.1-7 (Lit 5.4.1-3): Die Formzahl  $\alpha_k$ (siehe auch Bild 5.4.4-2) lässt sich nur bei Beanspruchungen im Dauerfestigkeitsbereich (elastische Verformung, HCF) für die Auslegung der dynamischen Bauteilfestigkeit anwenden (Skizze links oben). Sie ist für im LCF-Bereich (plastische Verformung) belastete Bauteile nicht anwendbar. Überschreitet die Spannung in der Kerbe die Streckgrenze, kommt es zur plastischen Verformung mit Spannungsabbau. Merkliche plastische Verformungen im Anrissbereich müssen berücksichtigt werden. In diesem Fall wird die Lebensdauer auf Grund der sich einstellenden Beanspruchung in der Kerbe ermittelt.



Um die Lastspielzahl bis zum Anriss in einem gekerbten Bauteil aus der Anrisskennlinie ungekerbter Probestäbe (Bild 5.4.1.1-4) entnehmen zu können, muss die Dehnungsamplitude in der Kerbe bestimmt werden. Dazu gibt es mathematische Verfahren (Finite Elemente) und experimentelle Verfahren (Skizzen rechts oben).

Reicht eine Abschätzung aus, kann nach dem Näherungsverfahren von Neuber vorgegangen werden (Diagramm unten). Hierfür ist die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve (Bild 5.4.1.1-4 und Bild 5.4.1.1-5), die Nennspannung, die Anrisskennlinie und die Formzahl  $\alpha_{\kappa}$ erforderlich. Der Schnittpunkt der **Neuber-Hyperbel** mit der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve ergibt die plastische und elastische Dehnung mit der zugehörigen Spannung im Kerbgrund.

Anzumerken ist: Die Kerbbeanspruchung ist für die Behandlung der Anrissphase aussagefähig, weniger dagegen für den Rissfortschritt, für dessen Abschätzung das "Nennspannungskonzept" geeigneter ist.



**Bild 5.4.1.1-8:** Auf Grund der **Kerbwirkung** ist davon auszugehen, dass die Umgebung und die **Wände von Bohrungen** statisch und dynamisch hoch belastet sind. In Scheiben und Flanschen zählen sie zu den die Lebensdauer bestimmenden Bereichen. Aus diesem Grund muss auf Fehler und Schwachstellen besonders geachtet werden.

**Fertigungsbedingte Schwachstellen:** Bereits bei der Fertigung einer Bohrung können Riefen und Schädigungen entstehen. Typisch sind Fehlstellen durch heiß gelaufene Bohrer oder eingedrückte Späne. Diese Beschädigungen sind gewöhnlich mit der Eindringprüfung nicht erkennbar und erfordern eine Wirbelstromprüfung. Wie problematisch das Auffinden gefährlicher Schwachstellen sein kann, zeigen Beispiele wie der Bruch der Radwelle eines Hochgeschwindigkeitszugs.

Ein weiteres Problem sind **Grate**. Diese können sowohl in der Fertigung als auch beim Handling entstehen. Sie haben wegen ihrer gekerbten Struktur eine merkliche Kerbwirkung und setzen so die LCF-Festigkeit herab.

Montage und Handling: Beim Einführen von Schrauben und Bolzen im Zuge des Montagevorgangs oder der Demontage können Längs-

# Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Probleme der Maschinenelemente

riefen erzeugt werden. Diese sind besonders gefährlich, weil sie quer zu hohen mechanischen Beanspruchungen verlaufen (Tangential- oder Radialspannungen).

Schwingermüdung: LCF, Grundlagen

Visuelle Inspektion und Rissprüfung: Bohrungen sind meist schlecht einzusehen. Sind Risse oder Fehlstellen von Frettingstellen oder Korrosion überlagert, ist eine visuelle Identifikation bzw. ein Nachweis mit der Eindringprüfung problematisch.

**Fretting:** In Bohrungen führen Elastizitätsunterschiede, Vibrationen und Wärmedehnungen häufig zu Mikrobewegungen zwischen dem Schrauben- oder Bolzenschaft und der Bohrungswand. Diese Schädigungen sind besonders bei Titanlegierungen gefährlich, weil sie zu einem gravierenden Schwingfestigkeitsabfall führen können (Bild 5.9.3-4).

Korrosion: Spalte zwischen Bohrung und dem Schaft eines Spannbolzens können über Kapillarwirkung korrosive Medien einsaugen. Für Nickellegierungen sind dies wässrige Lösungen von Silberverbindungen (Bild 5.3-7, Bild 5.3-8 und Bild 5.6.1.4.1-4), Stähle sind von salzhaltigem Schwitzwasser gefährdet. Die Korrosionsformen laufen unter Bildung von Rissen (Risskorrosion, Kapitel 5.6.3.1) und/ oder Lochfraß ab (Bild 5.6.1-2). Zwischen Scheiben aus Titanlegierungen und Ni-Basis-Werkstoffen wird zum Ausgleich der unterschiedlichen Wärmedehnungen eine Stahlscheibe angeordnet. Auf Grund der engen Toleranzen (Passdurchmesser) ist in den kritischen Zonen der Stahlscheiben ein Korrosionsschutz nur unbefriedigend möglich.

Von ungeeigneten Hilfsstoffen wie Ölen und Fetten kann ebenfalls gefährliche Korrosion in Bohrungen ausgelöst werden. So waren mehrere Turbinenradbrüche (Ni-Guss-Legierung) an einem Hubschraubertriebwerk darauf zurückzuführen, dass fälschlicherweise ein **MoS**haltiges Schmiermittel verwendet wurde. Dies gelangte zwischen Passdurchmesser des Spannbolzens und der Wand der hoch belasteten zentralen Radbohrung. Bei Betriebstemperatur war Spannungsrisskorrosion im Turbinenrad die Folge. Eine weitere Möglichkeit korrosiver Schädigung von Bohrungswänden in Ni-Basis- Legierungen steht im Zusammenhang mit Silberablagerungen und davon unterstützter Sulfidation (Bild 5.3-8 und Bild 5.6.1.4.1-3).

**Ermüdungsrisse:** Treten im Betrieb in Bohrungen Ermüdungsrisse (LCF) auf, sind diese beim Überholvorgang erfahrungsgemäß nicht einfach mit der erforderlichen Sicherheit zu finden. Die Auffindbarkeit mit dem Eindringverfahren kann durch das **Zuklemmen der Ris**se auf Grund induzierter Eigenspannungen von der LCF-Beanspruchung erschwert werden.

Bild 5.4.1.1-9 und Bild 5.4.1.1-10 (Lit 5.4.1-5): Die LCF-Beanspruchung läuft definitionsgemäß mit merklichen plastischen Verformungen ab (Bild 5.4-1und Bild 5.4.1.1-2). Dies führt zum Aufbau und/oder der Veränderung von Eigenspannungen. Sie können auch zur Erhöhung der ertragbaren Lastzyklen im Betrieb genutzt werden (Skizze oben). Hierfür werden die Rohteile auf Überdrehzahl geschleudert (engl. Prestressing).

Eigenspannungen können aber auch **die Ein**dringprüfung erschweren, wenn LCF-Risse im Nabenbereich zugedrückt werden.

Durch Verfestigungsverfahren (z.B. Kugelstrahlen, Aufdornen) und zerspanende Fertigung induzierte erwünschte Eigenspannungen im Neuteil werden von den plastischen Verformungen abgebaut bzw. überdeckt. Um diesen Effekt zu minimieren, werden im Maschinenbau, wo es möglich ist, Teile vorgespannt kugelgestrahlt (z.B. Federn, "Prestressing"). Für rotierende Teile ist ein solches Vorgehen, d.h. Kugelstrahlen während hoher Überdrehzahl, bisher nicht bekannt geworden. Dies dürfte nicht zuletzt am nicht einhaltbaren optimalen Auftreffwinkel von 90° liegen. In LCF-beanspruchten Bauteilen treten örtliche plastische Verformungen auf. Diese bestimmen den Eigenspannungszustand des Bauteils.



**Beispiel 1:** Eine Rotorscheibe typischer Form erfährt, abgesehen von besonderen Kerbstellen (Bolzenbohrungen, Übergangsradien ringförmiger Ansätze), die höchsten Beanspruchun-

gen im Bereich der **Nabenbohrung**. Diese Zone ist häufig lebensdauerbestimmend LCF-beansprucht. Beim erstmaligen Hochfahren entstehen unter Fliehkraft hohe Zugspannungen mit plastischen Verformungen (Skizze oben links). Die entlastete Scheibe zeigt danach im Ruhezustand im plastisch gedehnten Nabenbereich Druckspannungen (Skizze oben rechts). Diese stehen mit Zug-Eigenspannungen in benachbarten, nur elastisch beanspruchten Zonen, im Gleichgewicht. Ein solcher Effekt lässt sich zur Erhöhung der LCF-Lebensdauer nutzen.

Dazu wird vor dem endgültigen abtragenden Formgebungsprozess der vorgedrehte Rohling auf **Überdrehzahl geschleudert**. So wird der Nabenbereich höher belastet als im späteren Triebwerksbetrieb. Der Rohling weist nun im die Lebensdauer bestimmenden Nabenbereich hohe Druckeigenspannungen auf. Im Betrieb wird so die Mittelspannung bzw. die Zugspannungsspitze abgesenkt. Damit wird die ertragbare LCF-Festigkeit angehoben (Bild 5.4.1.1-10). Dieses Verfahren wird vielfältig angewendet und hat sich in der Praxis bewährt. Das Vorschleudern von Rohteilen für Rotorscheiben in den plastifizierenden Belastungsbereich kann auch zur **Vergleichmäßigung von Eigenspannungen** genutzt werden. Diese führen sonst bei der abtragenden Formgebung zum Verzug. Besonders bei ringförmigen Bauteilen deren Endgeometrie sehr filigran ist, bietet sich ein solches Vorgehen an .

**Beispiel 2: Thermoermüdung** (Kapitel 5.4.2) läuft im LCF-Beanspruchungsbereich ab. Diese Spannungen entstehen durch behinderte Wärmedehnung. Auch hier bauen sich während der Aufheizphase in der heißeren Bauteilzone Druckspannungen auf. Beim Abkühlen entstehen im gestauchten Bereich Zugeigenspannungen. Sie stehen mit den im Betrieb kälteren Bauteilpartien im Gleichgewicht (Skizze unten links). Typisches Beispiel sind innen gekühlte Heißteile. In den im Betrieb heißeren, daher leichter plastisch gestauchten Zonen, sind nach dem Abkühlen Zugspannungen vorhanden. Dann steht der im Betrieb kältere Bereich aus Gleichgewichtsgründen unter Druck (Skizze unten rechts).



# Literatur zu Kapitel 5.4.1

- **5.4.1-1** P.König, A.Rossmann, "Ratgeber für Gasturbinen-Betreiber", ASUE-Schriftreihe, Vulkan-Verlag Essen ISBN 3-8027-2545-x, 1999.
- **5.4.1-2** H. Zenner, "Niedrig-Lastwechsel-Ermüdung (low cycle fatigue)", VDI-Berichte Nr. 268, 1976, Seite 101-111.
- **5.4.1-3** W. Schütz, "Lebensdauer-Berechnung bei Beanspruchungen mit beliebiger Last-Zeit-Funktionen", VDI-Berichte Nr. 268, 1976, Seite 113-125 + Anhang, Seite 127-137.
- **5.4.1-4** "NTSB Targets Turbine Cracks", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", June 10, 1996, Seite 30.
- **5.4.1-5** "NTSB Investigates JT8D Engine Failure", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", June 20, 1983, Seite 32.
- **5.4.1-6** "The NTSB urged the FAA", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", March 2, 1998, Seite 21.
- **5.4.1-7** E.H. Phillips, "FAA, NTSB at Odds Over CF6 Fatigue Cracks", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", April 29, 1996, Seite 36.
- **5.4.1-8** C.A. Stubbington, S.Pearson, "Effect of Dwell on the Growth of Fatigue Cracks in Ti-6Al-4V Alloy Bar", Zeitschrift "Engineering Fracture Mechanics", Pergamon Press Ltd. 1978, Vol 10, Seite 723-756.
- **5.4.1-9** D.K. Wilkinson, "RB 211, The first Eighteen Months Operating Experience", Zeit-schrift "Tech Air", November 1973, Vol 10, Seite 723-756.
- **5.4.1-10.1** "Big fans", "RB.211 investigation" Zeitschrift "Flight International", 25 January , Number 3333, Volume 103, 1973, Vol 10.
- **5.4.1-11** S.W. Kandebo, "FAA Accelerates CF6 Inspections; Compressor Cracks Scrutinized", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", August 28, 2000, Seite 57.
- **5.4.1-12** A.P. Woodfield, M.D. Gorman, R.R. Corderman, J.A. Stutliff, B. Yamrom, "Effect of Microstructure on Dwell Fatigue Behavior of Ti6242", Zeitschrift "Titanium 95: Science and Technology", Seite 1116-1122.
- 5.4.1-13 NTSB Identification: LAX94IA018, Incident occurred OCT-19 1993.
- **5.4.1-14** D. Schütz, "Derzeitiger Stand der Lebensdauervorhersage für Bauteile", VDI-Berichte Nr. 268, 1976.

- 5.4.1-15 A.Rossmann, "Untersuchung von Schäden als Folge thermischer Beanspruchung", Beitrag in J.Grosch "Schadenskunde im Maschinenbau", Band 308, aus der Reihe "Kontakt & Studium, Maschinenbau", Expert Verlag, Band 308, ISBN 3-8169-1202-8, 2. Auflage 1995, Seite 162-187.
- **5.4.1-16** ASM Handbook, Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 11, "Failure Analysis and Prevention", Kapitel "Fatigue Failures", Seite 102 und 112.
- **5.4.1-17** H. Huff, "Die zulässige Beanspruchung bei Ermüdungsbeanspruchung", Zeitschrift "Materialwissenschaft und Werkstofftechnik", 32, 1-6, 2001.
- **5.4.1-18** E.H. Phillips, "Disk Crack Prompts CF6 Safety Alert", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", September 4, 1995, Seite 31.
- **5.4.1-19** T. Goswami, "Low cycle fatigue-dwell effects and damage mechanisms", Zeitschrift "International Journal of Fatigue", 21, 1999, Seite 55-76.
- **5.4.1-20** A.C. Rufin, "Extending the Fatigue Life of Aircraft Engine Components by Hole Cold Expansion Technology", ASME Paper No, 92-GT-77 des "37th International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition", Cologne, Ger. June 1-4, 1992 und Zeitschrift "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, January 1993, Vol 115, Seite 165-171.
- **5.4.1-21** T. Khaled, "An Investigation of Pore Cracking in Titanium Welds", Zeitschrift "Journal of Materials Engineering and Performance", Volume 3 (3), 1994, Seite 419-433.
- 5.4.1-22 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.
- **5.4.1-23** "Technische Regeln Druckgase,- Nahtlose Gasflaschen aus unlegiertem Aluminium und Aluminiumlegierungen", TRG 802, Juni 1986, Version 01/2006, Seite 8.

Seite 5.4.1-20

Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: LCF-Schäden, Abhilfen

# 5.4.1.2 Schäden durch LCF

# Nicht alle LCF-Schäden werden als solche erkannt!



Treten Schäden an Bauteilen auf, bei denen die **LCF-Beanspruchung bewusst ist und damit Auslegungsbestandteil ist**, werden diese mit hoher Wahrscheinlichkeit als solche **erkannt**. Damit ist die Voraussetzung für eine **gezielte erfolgreiche Abhilfe** gegeben. Dies sollte z.B. für Komponenten von Turbomaschinen gelten.

Inzwischen steigt jedoch die Anwendung in Bereichen, die mit der LCF-Problematik nicht 'aufgewachsen' sind. Dazu gehören nicht nur möglichst leichte aber hochbelastete **Sportgeräte** wie Rennräder und Montain Bikes. Auch an normalen Straßenfahrrädern werden an vielen Stellen wie Rahmen, Lenkung und Tretmechanismus **LCF-Schäden im Alltagsgebrauch** beobachtet. In diesen Fällen muss davon ausgegangen werden, dass die **Problematik der LCF-Belastung nicht bekannt** und deshalb auch kein Bestandteil von Konstruktion und Auslegung ist. Umso wichtiger ist es gerade für diese Bereiche der Technik, LCF-Schäden an ihren Produkten als solche zu **identifizieren.** Nur so lassen sich rechtzeitig geeignete Abhilfen einleiten. Das gilt natürlich zunächst für eine betriebsrelevante Erprobung. Sie muss bereits LCF-Belastungen betroffener Komponenten einschließen.

Einen besonderen Schwerpunkt für Ursachen von LCF-Anrissen bilden **Werkstofffehler** (Bild 5.4.1.1-3), **Fertigungsfehler** (z.B. Festigkeitsabfall, Schweißrisse, Schleifrisse) und -besonderheiten (Bild 3.2.1-1). Auch Folgen **betriebsbedingter Schädigungen** wie Heißlauf (Festigkeitsabfall, Zugeigenspannungen), Kerben (Fremdkörpereinwirkung, Korrosion, Verschleiß) Stoßüberlastung (Anrisse) können LCF-Risse auslösen. Nicht zuletzt sind konstruktionsbedingte **Gestaltungs- und Auslegungsmängel** Ursachen.

LCF-Schäden sind nicht nur an rotierenden Bauteilen wie Kupplungsscheiben, Schwungrädern, rotierenden Enrgiespeichern und Zentrifugen zu erwarten. Auch **Druckkessel** und **Rohre** sowie **Hebezeuge** sind betroffen (Bild 5.4.1-1). Eine besonders beanspruchte Maschinengruppe sind **Pres**-

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: LCF-Schäden, Abhilfen

**sen** (Schmieden, Blechverformung, Öl- und Saftherstellung, Kompaktieren wie Pellets und Platten) und **Stanzen** (Bild 5.4.1.2-1).

In den Beispielen dieses Kapitels wurden diese Fehler offenbar nicht erkannt oder waren gar nicht bekannt, als der Werkstoff zur Serienanwendung kam. Effekte wie **schmelzmetallurgisch** bedingte Einschlüsse, Porenbildung oder Gefügebesonderheiten (Bild 5.4.1.1-3) im Zusammenhang mit einem **Schmiede- und Wärmebehandlungsprozess** können die **Lebensdauer** (geforderte Zyklenzahl) **katastrophal verkürzen**. Das kann im Zusammenhang mit der **Fehlergröße** und damit einer sehr kurzen Inkubationszeit (Bild 4.3-1, siehe auch 5.1-1) stehen. Im Extremfall erfolgt das Risswachstum ab den ersten Lastwechseln (Bild 4.3-3). Auch der **Rissfortschritt** kann von werkstoff- und bauteilpezifischen Besonderheiten (z.B. Schmiedeverformung/Gefügeorientierung, Bild 5.4.1.2-2) unerwartet beschleunigt werden (Bild 4.3-3).

> **Bild 5.4.1.2-1** (Lit. 5.4.1.2-6, Lit. 5.4.1.2-7 und 5.4.1.2-8): Eigentlich ging man zu Auslegungen mit dynamischen Belastungen im Bereich plastischer Verformung erst mit dem Flugtriebwerksbau in den 70 er-Jahren. Trotzdem traten auch vorher LCF-Schäden auf, obwohl die Dauerfestigkeit Auslegungsgrundlage war. Die hohen Belastungen waren auf, vom Konstrukteur nicht vorhergesehene, meist örtliche Mängel zurückzuführen. Dazu gehörten.

- Konstruktionsmängel wie Steifigkeitssprünge, ungünstig liegende Schweißnähte, ungünstige Krafteinleitung..
- Nicht ausreichend bekannte **Betriebsbelas**tungen.
- Festigkeitsabfall durch Betriebseinflüsse (Überhitzung, Korrosion).
- Unerkannte gefährliche **Spannungskonzen**trationen:
- Werkstofffehler:
  - Risse, Poren, Lunker, nicht auslegungsgemäße Festigkeit.
- -Fertigungsschäden/-probleme wie: Risse, Zugeigenspannungen, Oberflächenbeschädigungen (Riefen, Rattermarken), Schweiβfehler.
- **Beschädigungen** bei der Montage wie Riefen, Eindrücke und **Fressspuren**.

Die Beispiele aus einer Zeit vor einer Auslegung im LCF-Bereich sind so ausgewählt, dass Lastwechselzahlen im Zeitfestigkeitsbereich  $(>10^5)$  auszuschließen sind.

Konstruktionsmangel ("A"):Die Ständer von Pressen sind durch Biegung und Zug, nicht An vielen Maschinen traten auch früher LCF-Schäden auf. Ursache waren hohe Überlast im Zusammenhang mit Konstruktions- und Fertigungsmängeln.



zuletzt unter Stoßbeanspruchung, hoch beansprucht. Problematisch ist die Lage von Schweißnähten.

Auslegungs- und Fertigungsmangel ("B"): An dieser Spindel einer Presse trat am Auslauf des Gewindes ein Ermüdungsbruch auf. Offenbar ist die Kerbwirkung noch von der Fertigung beeinflusst worden. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Auslegung die Betriebsspannungen nicht ausreichend berücksichtigte.

**Fertigungs- und Konstruktionsmangel** ("C"): Ungünstig gestalteter hochbelasteter Gitterknoten der Stütze eines großen Hebezeugs. Die Schweißnahtanhäufung provozierte Schweißfehler von denen ein Ermüdungsriss ausgeht.



Bild 5.4.1.2-2: Große Schmiedestücke, besonders solche aus Ti-Legierungen werden für Rotoren von Turbomaschinen (Trommelläufer, Skizze oben rechts) benötigt. Als Beispiel dient ein großes Flugtriebwerk (Skizze oben links). Beim Fertigungsprozess des Rohteils (Gießen und Schmieden) entstehen vielfältige Werkstoffprobleme, die mit der Rohteilgröße in Zusammenhang stehen. Im dargestellten Fall bildete sich, bevorzugt im besonders hoch beanspruchten Nabenbereich eines Rotors ungünstiges Gefüge. Soweit der Schadensmechanismus und die auslösenden Effekte bisher bekannt sind, lässt sich sagen: Große Körner (Kristalle) mit einer besonderen lamellaren Struktur und einer Orientierung quer zur Hauptbeanspruchungsrichtung sind für das LCF-Verhalten nachteilig. Der bauteilspezifische Belastungsablauf (Diagramm) löst bei

den beschriebenen Gefügebesonderheiten ein unerwartet schnelles Risswachstum aus (Bild 5.4-13). Erklärlich ist dies mit einer sehr niedrigen Risszähigkeit. Dies führt bereits bei sehr kleinen Fehlern und Schwachstellen (threshold) zum Risswachstum (Bild 4.3-3). Auf den Rissfortschritt scheinen sich Halte*zeiten* (engl. dwell- time, dwell-time fatigue) der zyklischen Beanspruchung (Start-Abstell-Zyklus, Bild 5.4-12 und Bild 5.4-13) auszuwirken. Nach Lit. 5.4.1-19 ist Ti-6Al-4V druckspannungssensitiv. Das heißt, die Stillstandszeiten unter den LCF-induzierten Druckeigenspannungen wirken sich offenbar besonders lebensdauermindernd aus. Das ist ein seltener Fall in der Technik. Möglicherweise ist das ein Grund, warum offenbar das Problem erst relativ spät (im Serieneinsatz) er-

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: LCF-Schäden, Abhilfen

kannt wurde. Dabei ist ein Zusammenhang mit dem nachgewiesenen Haltezeiteinfluss bei max. Spannung bzw. Drehzahl anzunehmen.

Nachweise und auslegungsrelevante Werkstoffdaten erfordern demnach ausreichende Haltezeiten im Stillstand bei zyklischen Prüfungen. Der Effekt ist im dargestellten Fall erstaunlicherweise bei niedrigeren Temperaturen größer. Eine akkumulierte Zeitstandschädigung ist deshalb keine plausible Erklärung.

Vermutet wird ein Zusammenhang mit im Material gelöstem Wasserstoff (Lit.5.4.1-8). Untersuchungen weisen darauf hin, dass dieser bei der Rohteilherstellung (Gießen, Bild 5.7.1-3) eindiffundiert ist. Er löst in ungünstigen Gefügebereichen spröde Anrisse aus.

Abhilfe ist ein Austausch der Bauteile gegen solche, die aus kleineren Einzelstücken verschweißt sind.

Bild 5.4.1.2-3: Auch Beschichtungen selbst können ermüden und versagen. Das gilt besonders für spröde Schichten bei zyklischen plastischen Verformungen unter LCF-Belastung.

Bilden sich Risse entlang der Haftfläche, führen diese zum Abplatzen. Risse durch fest anhaftende Schichten können auch als Anriss für



das darunterliegende Grundmaterial wirken. Das führt zur Absenkung der LCF-Festigkeit des Bauteils.

Im dargestellten Fall handelt es sich um Ablösungen harter keramischer Anstreifschichten eines rotierenden Rings. Solche Schäden traten in einem Fall nach mehreren hundert Start-Abstellzyklen auf. Sie dürften mit ungünstigen Parametern des thermischen Spritzverfahrens in Zusammenhang stehen. Ist die Temperaturführung des Rings während des Beschichtungsprozesses nicht optimal, kann es zu schädigenden **Eigenspannungen zwischen Schicht und Grundmaterial** kommen. Diese Spannungen begünstigen zusammen mit den überlagerten zyklischen Betriebsspannungen eine frühe Ablösung.



Bild 5.4.1.2-4: Gerade bei Freizeit- und Sportgeräten scheint das Design die Festigkeit und Sicherheit zu dominieren. Trends gehen in Richtung höherer Belastungen, an vielen Stellen bis in den LCF-Bereich. Dies lässt sich aus dem anwendungstypischen Belastungsprofil und den gebrauchsspezifischen Zyklenzahlen bis zum Versagen schließen (Bild 5.4.1.1-2). Nicht selten versagen diese Bauteile bereits nach wenigen Tausend Lastwechseln katastrophal. Dieser Gefahr versuchen Hersteller Rechnung zu tragen, indem ein Austausch des Bauteils z.B. nach zwei Jahren auch ohne erkennbaren Schaden gefordert/empfohlen wird. Dies entspricht bereits der traditionellen Praxis bei Rotoren von modernen Turbotriebwerken. Offenbar ist bei solchen Produkten LCF-Belastung nicht bekannt und/oder nicht bewusst. Dies
#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: LCF-Schäden, Abhilfen

weist auch auf einen Mangel in der Ausbildung hin. Begünstigt wird das Problem, wenn **Formdesign den Maschinenbau** dominiert.

Die erhebliche dynamische Überlastung bis in den LCF-Bereich wird von folgenden Forderungen des Marktes gefördert:

- Gewichtsreduzierung kann ohne neuartige Gestaltung durch dünnere, höher belastete tragende Querschnitte, höherfeste (härtere) Metalllegierungen oder höhere Belastungen mit einem Überschreiten des Erfahrungshorizonts erreicht werden. Bei höheren Spannungen werden auch in höherfesten Werkstoffen kleinere Schwachstellen zu Fehlstellen. D.h. sie müssen in der Auslegung berücksichtigt und spezifiziert werden.

- Anwendung hochfester Werkstoffe. Solche metallischen Werkstoffe haben besondere Schwächen wie Empfindlichkeit für Risskorrosion (Kapitel 5.6.3.1), Versprödungen, Kerbempfindlichkeit (Bild 5.4.3.2-8 und Bild 5.4.4-2) und Festigkeitsabnahme unter Schwingverschleiβ (Bild 5.9.3-4). Dies gilt beispielsweise besonders für Titanlegierungen. Hochfeste Aluminiumlegierungen neigen dagegen bei nicht optimaler Wärmebehandlung zur Spannungsrisskorrosion. Bei Schweißungen hochfester Stähle ist auf Kerbwirkung (Kapitel 5.4.4) und Versprödungsgefahr durch Wasserstoff (Kapitel 5.7) zu achten.

- Anwendungen **neuer Technologien** haben spezifische Belastungs- und Versagenseigenschaften, die bei Einführung im allgemeinen Maschinenbau meist nicht ausreichend bekannt sind.

In diesem Zusammenhang sind Untersuchungen zur Ursachenfindung bei Schäden von großer, sicherheitsrelevanter Bedeutung. Damit erhält der Hersteller Erfahrungen mit Wettbewerbsvorteil. Laboruntersuchungen im Rahmen der Faktensammlung (Bild 2.2.1-1) bieten Institute an. Selbst mit Computerunterstützung dürfte die Berechnung der örtlichen Spannungen bis in den plastischen Bereich für Sportgeräte meist zu aufwändig sein. Aus diesem Grund sind geeignete betriebsnahe Versuche an serienrelevanten Produkten durchzuführen. Solche Prüfungen bieten Prüfinstitute an.

## 5.4.1.3 Abhilfen bei Schäden durch LCF

Offenbar ist in etlichen Bereichen des Maschinenbaus, insbesondere bei Sportgeräten, LCF unbekannt oder zumindest unbewusst, obwohl dadurch umfangreiche Schäden auftreten. Das ist auch nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, dass diese Problematik erst mit lebensdauerbegrenzten Komponenten im Flugtriebwerkbau Anfang der 70er-Jahre zum Thema für Gestaltung und Auslegung wurde. So darf vermutet werden, dass zumindest noch einige Generationen von Maschinenbauingenieuren im Studium nicht ausreichend für diese Problematik sensiblisiert wurden. So werden Auslegung, Entwicklung und Erprobung nicht befriedigend angepasst. Das erfährt jedoch immer mehr Bedeutung und Dringlichkeit. Viele Geräte auch des normalen privaten Gebrauchs nutzen früher eher exotische Technologien, die eine leichte Bauweise ermöglichen.Sie erfahren Belastungen im LCF-Bereich. Weil es sich um plastische Verformungen handelt, sind Berechnungsprogramme die auf elastische Verformungen/Belastungen beschränkt sind oft nicht ausreichend aussagefähig. Zu solchen Werkstoffen gehören hochfeste Al-Legierungen, Titanlegierungen und hochfeste Stähle. Bereits die ausgenutzte hohe Festigkeit ist problematisch (Bild 4.1-1) und erfordert Erfahrung sowie genaue Kenntnisse der Betriebsbelastungen. Hier können plötzlich zusätzlich Effekte wie Risskorrosion, Wasserstoffversprödung, Kerbempfindlichkeit und Festigkeitsabfall durch Schwingverschleiß unerwartet ausgeprägt auftreten. Auch die Qualitätssicherung erhält einen deutlich höheren Stellenwert. Bereits kleine, bei früheren weniger hoch belasteten Konstruktionen tolerierbare Schwachstellen werden zu gefährlichen Fehlstellen. Sie sind Ausgang wachstumsfähiger Risse.

Im Folgenden werden Abhilfen und vorbeugende Maßnahmen für **mechanisch verursachte LCF-Schäden** gegeben. Wichtig ist, dass ein Fachmann die geeigneten Maßnahmen betriebs- und bauteilgerecht auswählt, um eine "**Verschlimmbesserung**" zu vermeiden (Bild 3.2.1-2). Die Kapitel 3.2, "Betriebsbelastungen" und Kapitel 3.3 "Bauteilverhalten" geben weitere Hinweise. Das Thema Thermoermüdung wird im eigenen Kapitel 5.4.2 behandelt. Maßnahmen und Kriterien lassen sich in mehrere Hauptgruppen unterteilen (ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht nicht):

#### Werkstoffauswahl:

- "Gutmütige" Werkstoffe mit möglichst hoher Bruchdehnung, hoher Risszähigkeit auch bei Korrosion, hoher Schwingfestigkeit und geringer Kerbempfindlichkeit bevorzugen (Bild 4.1-1).
- Vorsicht beim Wechsel zu höherfesten Werkstoffen (Bild 4.1-1)! Empfindlichkeiten wie für Spannungsrisskorrosion (Kapitel 5.6.3.1.1) oder Wasserstoffversprödung, (Bild 5.7.1-5).berücksichtigen.
- Gute betriebsrelevante Erfahrungen nutzen (Bild 4.1-2).
- Gleichmäßige Werkstoffeigenschaften im gesamten Volumen (auch bei extrem großen und sehr dünnen Querschnitten).
- Gute Prüfbarkeit (ZfP, Bild 4.5.2-2, Bild 4.5.2-3 und Bild 5.4.1.1-3).
- Problemlose Bearbeitbarkeit.
- Niedrige Eigenspannungen im Rohteil (Gießen, Schmieden).
- Keine besondere Neigung zu potenziellen Schwächen wie Lunker, Warmrisse, ungünstige Gefüge, Seigerungen, Einschlüsse.

#### Konstruktion:

- Auslegungsdaten aus bauteilrelevanten Proben (Bild 3.2.1-1, Bild 5.3.2-11, Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8)..
- Spannungsniveau so wählen, dass der gerade noch serienmäßig sicher auffindbare Fehler nicht gefährlich wachstumsfähig ist (Bild 4.3-1 und Bild 4.3-3).
- Lebensdauer möglichst in die Inkubationsphase legen (Bild 4.3-1).
- Mit geeigneter Querschnittsgestaltung spontanes Versagen des gesamten Bauteils bei Rissbildung vermeiden. Damit besteht die Chance einer Betriebsüberwachung 'verdächtiger' Teile (Bild 4.5.2-1).
- Möglichst keine spröden festanhaftenden Beschichtungen in hoch LCF-belasteten Zonen (Bild 4.2-4 und Bild 4.2-5).
- Keine potenziell (z.B.durch Korrosion, Diffusion/Versprödung) schädigende Beschichtungen (Bild 4.2-1)
- Nur bewährte Hilfsstoffe wie Öl, Schmiermittel und Reinigungsmittel vorschreiben (Kapitel 5.9.1).
- Geeignete Verfestigung kritisch belasteter Oberflächen (Kugelstrahlen, Rollen, Aufdornen, Lit 5.4.1-20).
- Nutzung des "Prestressing" durch Überdrehzahlschleudern des vorbearbeiteten Rohteils (Bild 5.4.1.1-9 und Bild 5.4.1.1-10).
- Keine Montageprozeduren mit potenzieller Beschädigungsgefahr. Dazu gehört das Aufschrumpfen bei der Fügung von Sitzen. Dabei besteht erhöhte Gefahr der
- Entstehung gefährlicher Kerben durch Fressen/ Kaltverschweißen (Kapitel 5.9.2). - Anstreifvorgänge mit potenzieller Heißrissgefahr vermeiden (Bild 4.4-15 und
- Bild 5.3-5).
- Frettingzonen (Kontaktstellen mit Mikrobewegung) an empfindlichen Werkstoffen (z.B. Ti-Legierungen, Bild 5.9.3-4) vermeiden.

#### Auslegung:

- Festigkeit möglichst nicht zu hoch ausnutzen, sodass eine möglichst große kritische Risslänge verbleibt. Das ist die Voraussetzung für sichere Inspektions-/Überholintervalle (Bild 4.5.2-1).
- Der anrissfähige Fehler muss sicher auffindbar sein und darf nicht unrealistisch klein sein (Bild 4.5.2-2, Bild 4.5.2-3, Bild 3.2.1-1 und Bild 5.4.1.1-3).

- In Zonen mit potenzieller Rissgefahr (z.B. Labyrinthstege) sollte ein möglichst großer, abfallender Spannungsgradient in Rissfortschrittsrichtung angestrebt werden (Bild 4.3-11). So verzögert sich die Rissgeschwindigkeit und es besteht die Chance bei einer Inspektion den Riss "abzufangen".

#### **Fertigung:**

- Oberfläche verfestigen.
- Rohteil vorschleudern um Druckeigenspannungen in hochbelasteter Zone zu induzieren (Bild 5.4.1.1-9).

- Nacharbeiten von Beschädigungen wie Anschmelzungen, aufgeschmiertes Fremdmaterial, Anätzungen und Werkzeugbruch nur nach Rücksprache mit dem zuständigen Fachpersonal bzw. spezifiziertem Vorgehen. Dies ist gegebenenfalls vom Konstrukteur mit den Fachabteilungen vorbeugend zu erarbeiten.

- Keine eigenmächtige Abänderung der Fertigungsvorschriften. Das betrifft insbesondere Verfahren und seine Parameter, Vorrichtungen, Bearbeitungsmaschinentyp und Hilfsstoffe (z.B. Kühl/Schneidmittel) sowie Werkzeuge (z.B.Schleifscheibentyp, Drehstahl).
- Kennzeichnung nur mit zugelassenen Verfahren (Gravieren, Ätzen, Stifte und Farben).
- Prozesse mit der Gefahr von Wasserstoffaufnahme vermeiden (Kapitel 5.7). Falls die potenzielle Gefahr besteht (hochfester Werkstoff), darf die vorgeschriebene Zeit (wenige Stunden) bis zur Entsprödung nicht überschritten werden. Dies ist in den Fertigungs- und Überholungsvorschriften und/oder Konstruktionszeichnungen unmissverständlich festzuschreiben.

#### Montage/Handling:

- Keine verschmutzten Flansche montieren. Gefahr der Lockerung und/oder "Wurmbildung" durch Mikrobewegungen der Auflageflächen.
- Zugelassenes Montagewerkzeug spezifizieren und verwenden (z.B.aus geeignetem Werkstoff).
- Bei neuen Montagevorgängen und auch bei neuen Maschinentypen eine FEMA (Bild 2-1) durchführen.
- Auf Beschädigungen wie Kratzer (Bild 5.4.1.1-8) und Fressspuren (Bild 5.9.2-5) achten.

#### Qualitätssicherung:

- Bauteile auf Gefügebesonderheiten prüfen (z.B.mit unbedenklichen Ätzverfahren im Fertigungsprozess).
- Ausfallmusterprüfung an Bauteilen des Serienstandards (Guss- undSchmiedeteile).
- ZfP-Verfahren auf ausreichend sicher nachzuweisende Fehler spezifizieren (Bild 4.5.2-2 und Bild 4.5.2-3). Dabei sind werkstoff-/bauteilspezifische Sondereffekte wie Fehlerlage, Fehlerart und Gefügebesonderheiten zu berücksichtigen.
- Abstimmung der Folge von Prüfungen auf die Fertigungsschritte (z.B. keine Eindringprüfung nach dem Kugelstrahlen).
- "Sampling", d.h. Überprüfung gelaufener repräsentativer Bauteile auf lebensdauerverkürzende Schädigungen. Ein Beispiel sind bei Rotoren zyklische Schleuderversuche.

#### Lebensdauernachweis:

- Originalbauteile des Serienstandards verwenden (siehe 'Sampling').
- Ausreichende bauteiltypische und werkstoffrelevante Prüfzyklen (z.B. Dwell Time, Bild 5.4-12) vorsehen: Zugspannungs- oder druckspannungssensitive Werkstoffe beachten (Bild 5.4-13).
- Nachuntersuchung der Bruchflächen von Prüfteilen auf Anzeichen bauteilspezifischer Besonderheiten wie Versprödungsmerkmale oder besondere Fehlstellen.

#### Vorgehensweise bei akuten Schäden:

- **Fachkundige Untersuchung** von Schäden durch Risse und Bruch. Die Klärung der schadensursächlichen Einflüsse ist Voraussetzung für die gezielte erfolgreiche Abhilfe. Merkmale die auf LCF als schadensursächliche Beanspruchung hinweisen:
- Rissbildung, ohne dass sofort ein spontaner Bruch eintritt.
- Bruchflächen mit einem eher kleinen Schwingbruchanteil, d.h. mit großem Restgewaltbruch.

- Versagen nach Lastwechselzahlen im 10<sup>4</sup> bis 10<sup>5</sup> Bereich. Das dürfte z. B. für Rahmen- und Lenkerbrüche an Fahrrädern gelten.
- Vergleichbare gelaufene Bauteile (z.B. Typ, Herstellung, Betriebsdaten) auf Rissbildung
- (Bild 5.4.1.2-4.1 und Kapitel 4.4) und Schädigungsmerkmale (z.B. Fretting im Versagensbereich, Bild 4.5.1-1) überprüfen.
- Eingrenzen potenziell betroffener Teile: anhand Dokumentation der Herstellung und des Betriebs: Roh- teilhersteller, Chargen, Bearbeitung, Betreiber, Betriebsbesonderheiten usw.
  - Risikoabschätzung: Sichere Lebensdauer, Inspektionsintervalle, Priorität von Bauteilen für Prüfungen (Kapitel 4.5).
  - Verfahren für die Prüfung vor Ort erarbeiten (z.B. Boroskopinspektionen).

Anmerkung: Im Gegensatz zu Rissen unter hochfrequenten Schwingungen (Bild 4.3-22,

Bild 4.3-23 und Bild 4.3-24), wie sie meist für Ermüdung im HCF-Bereich ursächlichsind, besteht erfahrungsgemäß diese Chance für LCF-Risse. Das bedingt Umstände (z.B. Zugänglichkeit) und eine niedrig frequente Beanspruchung (z.B. Start-Abstell-Zyklen) vor dem Bruch des Bauteils und damit eines katastrophalen Schadens mit Zwischeninspektionen abfangen.



Bild 5.4.1.3-1: Am Beispiel eines Fahrradlenkers (Bild 5.4.1.2-4), als erfahrungsgemäß besonders LCF-gefährdetes Bauteil, sollen Einflüsse und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Kritisch sind Spannungen durch die Kerbwirkung auf Grund des Steifigkeitssprungs am Übergang des Lenkerrohrs zur Einspannung. Das dünnwandige Rohr besteht aus einer Al-Legierung.

*Eine Bewertung der dargestellten Gestaltungsbeispiele ergibt:* 

- Ein zu massiver Querschnitt der Klemmung auch wenn diese aus einer Al-Legierung (Skizze links) mit relativ niedrigem E-Modul besteht. - Auch eine Klemmung aus deutlich steiferem Stahl (E-Modul) ist trotz geringerer Wandstärke ungünstig (mittlere Skizze).

- Besser dürfte sich ein **elastisch gestalteter Übergang** der Klemmung in das Rohr verhalten (Skizze rechts).

Von Bedeutung ist auch der **Schwingverschleiß** zwischen Lenkerrohr und Klemmung (Kapitel 5.9.3). Dieser ist mit der angepassten Steifigkeit am Übergang zu verhindern..

## Literatur zu Kapitel 5.4.1.2

- **5.4.1.2-1** E.H. Phillips, "FAA, NTSB at Odds Over CF6 Fatigue Cracks", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", April 29, 1996, Seite 36.
- **5.4.1.2-2** S.W. Kandebo, "FAA Accelerates CF6 Inspections; Compressor Cracks Scrutinized", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", August 28, 2000, Seite 57.
- 5.4.1.2-3 A.Rossmann, "Untersuchung von Schäden als Folge thermischer Beanspruchung", Beitrag in J.Grosch "Schadenskunde im Maschinenbau", Band 308, aus der Reihe "Kontakt & Studium, Maschinenbau", Expert Verlag, Band 308, ISBN 3-8169-1202-8, 2. Auflage 1995, Seite 162-187.
- **5.4.1.2-4** ASM Handbook, Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 11, "Failure Analysis and Prevention", Kapitel "Fatigue Failures", Seite 102 und 112.
- **5.4.1.2-5** M.R. Bache, W.J. Evans, "Dwell Sensitive Fatigue Response of Titanium Alloys for Power Plant Applications", Paper 2001-GT-424 des "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.
- **5.4.1.2-6** Schmidt-Thomas, "Integrierte Schadenanalyse: Technikgestaltung und das System des Versagens", Verlag Springer Berlin, ISBN 978-3-540-20551-7, Kapitel 5.1 Seite 33.
- **5.4.1.2-7** E.J.Pohl, R.Bark, "Wege zur Schadenverhütung im Maschinenbetrieb", Allianz-Versicherungs-AG, 1964, Seite 145,184 und 185.
- 5.4.1.2-8 ,,Handbuch der Schadenverhütung", Allianz-Versicherungs-AG, 1972, Seite 276.

#### 5.4.2 Thermoermüdung



## 5.4.2.1 Grundlagen der Thermoermüdung

Der historische Anstieg der Gastemperaturen beruht auf der Forderung Wirkungsgrad- und Leistung thermischer Enregieerzeugung zu steigern. Das erzwingt eine entsprechend intensivere und effektivere Kühlung der Heißteile. Die Folge sind größere Temperaturgradienten. Sie entstehen beispielsweise zwischen der heißgasbeaufschlagten Oberfläche und den gekühlten Zonen. Im Inneren eines Bauteils nutzt man Konvektionskühlung und Prallkühlung. Die Oberfläche wird mit Kühlluftschleiern geschützt. Das erzeugt Wärmespannungen auf Grund behinderter Wärmedehnung (Bild 5.4.2.1-2). Gewöhnlich müssen Zugspannungen aus den Lasten (Fliehkraft, Gaskräfte) von den kalten Bauteilquerschnitten aufgenommen werden. Dazu addieren sich Zugspannungen, die mit den Druckspannungen in den heißeren Zonen im Gleichgewicht stehen.

Wärmespannungen, die sich mit den Temperaturänderungen in Phase oder phasenverschoben auf- und abbauen, führen zu einem Ermüdungsvorgang im LCF-Bereich. In der Literatur findet man für diese Belastung die folgenden Begriffe (Bild 5.4.2.1-2, Lit 5.4.2-15):

- **Thermoermüdung** (engl. thermal fatigue = TF): Ermüdung durch zyklische Wärmespannungen. Diese Belastung entsteht betriebsnah als Folge behinderter Wärmedehnungen bei zyklischen Temperaturänderungen. Solche Belastungen treten z.B. an mit Heißgas beaufschlagten **Keilproben** auf (Bild 5.4.2.1-6 und Bild 5.4.2.2-5).

- **Thermomechanische Ermüdung** (engl. thermal mechanical fatigue = TMF): Ermüdung unter zyklisch mechanisch aufgebrachten Spannungen bei Temperaturzyklen ohne merkliche Wärmespannungen oder bei konstanter Temperatur. Solche Beanspruchungen werden gewöhnlich an Zugproben für die Datenermittlung aufgebracht (Bild 5.4.2.1-6 und Bild 5.4.2.2-5). Hier ist die Nutzung verzögerter Rissbildung zumindest eingeschränkt.

An vielen realen Bauteilen ist mit einer **Kombination** aus zyklischen und statischen thermischen und mechanischen Belastungen zu rechnen. Im Folgenden fallen diese auch unter TMF.

- **Thermoschock** (engl. thermal shock): Unter diesem Begriff verstehen wir im Folgenden eine Rissbildung bzw. Schädigung durch eine schnelle Temperaturänderung, im Extremfall genügt ein einziger Temperaturzyklus. Bekanntes Beispiel ist das Zerspringen eines Glases während Heißwasser eingefüllt wird (Bild 5.4.2.1-3).

Thermoermüdung kann sich, im Gegensatz zur Zeitstandbelastung, besonders auch in kalten Bauteilzonen schadenswirksam auswirken. Typisches Beispiel ist Rissbildung im Inneren gekühlter Bauteile. Ein Beispiel sind Kühlluftbohrungen in Turbinenschaufeln (Bild 5.4.2.1-9). Anders ausgedrückt: Bei ungekühlten statisch belasteten Bauteilen wirkt eher die Zeitstandbeanspruchung lebensdauerbestimmend, bei gekühlten die Thermoermüdung.

Der Schadensmechanismus der Thermoermüdung (Bild 5.4.1-2) als ein **dehnungsgesteuerter Vorgang** macht verständlich, warum die **Risse zum Spannungsabbau** führen und deshalb verzögert fortschreiten. Thermoermüdungsrisse können deshalb an, von äußeren Belastungen nicht gefährlich hoch beanspruchten Bauteilen, in Grenzen **toleriert** werden. Das kann geradezu eine **Funktionsvoraussetzung** sein. "Das Bauteil hilft sich selbst." Solche "atmenden" Risse sind z.B. Kranzrisse in integralen Turbinenrädern oder Risse am Übergang des Blatts in die Deckbänder von Turbinenleitschaufeln. Diese Erkenntnis wird in Konstruktionen mit "Schlüssellochbohrungen" oder elastischen bzw. "aufgelösten" Konstruktionen (Bild 5.4.2.2-3) bei Wärmebehandlungsvorrichtungen genutzt. Dagegen sind Schweißen und das übliche Löten der Risse eher skeptisch zu beurteilen. Von diesen Verfahren ist eher eine **Abdichtung als eine festigkeitsabhängige, den Neuteilen entsprechende, Lebensdauer zu erwarten** (Bild 5.4.2.2-4).



Probleme der Maschinenelemente

Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: Thermoermüdung Grundlagen

Thermoermüdung ist ein äußerst komplexer Vorgang der vielen Einflüssen unterliegt (Bild 5.4.2.1-4 und Bild 5.4.2.1-6). Die zugehörigen Schadensbilder werden von diesen Einflüssen geprägt, insbesondere wenn das Bauteil eine **Beschichtung** trägt.

Bild 5.4.2.1-1.1 und Bild 5.4.2.1-1.2: Thermoermüdung begegnet uns in vielen Bereichen der Technik. Immer geht es um Maschinenelemente die thermischen Wechseln unterworfen sind und dabei hohe Temperaturgradienten bzw. Wärmespannungen aufbauen.

Kolbenmotoren: Besonders betroffen sind Auslassventile, Kolben und das Abgassystem bzw. die Auspuffanlage und gegebenenfalls einem Turbolader. Besonders die Strukturen innerhalb der Auspuffanlage zur Schalldämpfung und der **Katalysator** (Bild 3-21, Lit. 5.4.2-27) sind geeignet zu gestalten, um gefährliche Wärmespannungen zu vermeiden. Sie sind dünnwandig/elastisch und geeignet fixiert, um freie Wärmedehnungen zuzulassen.

**Chargiergestelle** in der Wärmebehandlung: Besonders empfindlich sind massive, steife Konstruktionen. Sie wirken sich auf doppelte Weise ungünstig aus:



# - Hohe Temperaturgradienten bei Aufheizung und Abkühlung.

- Hohe Steifigkeit mit Verformungsbehinderung begünstigt den Spannungsaufbau. Deshalb sind elastische, dünnwandige Strukturen anzustreben.

**Bremsen und Kupplungen**: Bei der Betätigung entsteht Reibungswärme die im Extremfall die Reibfläche der Scheibe oder Trommel örtlich aufheizt und Rissbildung auslöst. Um dies zu vermeiden ist ein Werkstoff mit hoher Wärmeleitfähigkeit und geringer Wärmedehnung günstig.

Heißteile in Turbomaschinen sind besonders hoch thermoermüdungsbelastet. Bei statischen Teilen wie Leitschaufeln nutzt man in erfahrungsbasierten Grenzen die größere Nachgiebigkeit angerissener Bauteile. Voraussetzung ist gewöhnlich eine regelmäßige Kontrollierbarkeit (z.B. Boroskopie) im Betrieb bzw. eine Inspektion nach gesicherten Betriebsintervallen. Wenn möglich vermeidet man integrale Strukturen zugunsten einzelner Komponenten.

Bei rotierenden Bauteilen ist Rissbildung zumindest problematisch. Erfahrungsgemäß löst die rissbedingte Querschnittsschwächung eine gefährliche Beanspruchung aus. Damit wird das Risswachstum unbeherrschbar (Bild 4.3-11).



**Beispiel**: Ein Austrittsventil des Antriebsmotors eines Frachtschiffs erlitt auf dem Rücken des Tellers (Skizzen links und unten) einen Anriss. Eine mikroskopische (REM) Untersuchung zeigte dass es sich um einen LCF-Riss mit ausgeprägten Fortschrittslinien handelt. Ca. 50 Ereignisse waren zu identifizieren. Sie ließen sich jeweils einer Ozeanüberquerung zuordnen. Damit schieden als Hauptursache die relativ hochfrequenten Arbeitshübe aus. Offenbar hatte die überlagerte dynamische Zugbeanspruchung an der Anrisstelle als Folge des Gasdrucks auf den Ventilboden die Zahl der erkennbaren Lastwechsel nicht beeinflusst. Hauptschadensursache war also Thermoermüdung auf Grund sehr niederfrequenter (Wochen) Thermozyklen.

**Pulsierende Gasströmungen** mit entsprechenden Temperaturspitzen treten auch bei anderen Bauteilen auf wo jedoch der Zusammenhang augenfälliger ist. Typische Beispiel ist die **Auspuffanlage eines Verbrennungsmotors**. Auch diese heizt sich beim Start bis auf eine stationäre Temperaturverteilung auf und kühlt sich erst beim Abstellen des Motors wieder

Je massiver die Querschnitte um so weniger reagieren sie auf höher frequente Thermozyklen. Entscheidend sind in solchen Fällen häufig Start-Abstell-Zyklen.



merklich ab. Leistungsschwankungen führen wegen der **dünnen Wanddicken** (Blechstrukturen) zu Rissfortschrittsmerkmalen. Solche **Minizyklen** sind auslegungsrelevant.

**Bild 5.4.2.1-2:** Die Skizze zeigt oben links ein **Modell des TF-Belastungsvorganges**:

Ein metallischer Stab wird von zwei festen Wänden verschiebbar begrenzt. Wird dieser Stab aufgeheizt, dehnt er sich aus. Ohne Behinderung durch die Wände tritt die Wärmedehnung " $\Delta$  lt" ein. Durch die **Dehnungsbehinderung** der Wände erfolgt bei Überschreitung der Fließgrenze eine plastische Stauchung " $\Delta$ lp". Nach dem Abkühlen ist der Stab um diese Stauchung kürzer, es entsteht ein Spalt zwischen Wand und Stab. Der Stab ist nun entlastet.

Wir stellen uns vor, der Stab wäre nun zu Versuchsbeginn mit den Wänden fest verbunden. In diesem Fall erfolgt wiederum die plastische Stauchung bei hohen Druckspannungen im Zuge der Aufheizung (Diagramm unten links). Während des Abkühlens treten jetzt aber Zugspannungen in dem gekürzten Stab auf. Ein **Temperaturzyklus (T)** entspricht also einem **Zug/Druck-Spannungszyklus**, der zu einer mechanischen Ermüdung (z.B. Bild 5.4-10 und Bild 5.4-11) im LCF-Bereich (Bild 5.4-1) führen kann, der sogenannten Thermoermüdung (TF).

**Rissbildung führt zu einer Entlastung**. Dies bedeutet auch eine Verlangsamung des Risswachstums. Die **Rissbildung in Turbinenleitschaufeln** (Bild 5.4.2.1-4 und Bild 5.4.2.2-5) wird von diesem Modell gut dargestellt.

Ein praxisnäheres Modell der 1. Phase des dargestellten Thermoermüdungsvorgangs zeigt die Skizze rechts. Erwärmt man eine kalte Metallplatte örtlich einseitig, will sich der hei-Be Bereich mit vergleichsweise zum kalten Werkstoff niedrigerer Festigkeit gegenüber den umgebenden kalten Zonen ausdehnen. Auf diese Weise werden Druckspannungen induziert, die mit Zugspannungen im kalten Bereich im Gleichgewicht stehen. Ausreichend hohe Druckspannungen führen zum Aufwölben und plastischen Stauchen der erwärmten Zone. Beim Abkühlen bilden sich im plastisch gestauchten Bereich Zugspannungen, im vorher kalten Bereich Druckspannungen. Außerdem erzeugen die so induzierten Eigenspannungen und die plastischen Verformungen einen Verzug.

Das Diagramm unten rechts zeigt den Dehnungsverlauf über der Temperatur (Lit 5.4.2-15) für typische TF-Zyklen an **Keilproben** und eines TMF-Zyklus an **zylindrischen Hohlproben** (Bild 5.4.2.2-5). Bei den TF-Zyklen (gestrichelte Kurven), die durch reines Aufheizen und Abkühlen der Probenkante induziert werden, bestimmt die Stauchung in der Druckphase (Aufheizen) die Dehnungsamplitude. Der TF-Zyklus entsteht also durch zyklische mechanische Belastung als Folge zyklischer Temperaturänderung.



Heißes Wasser in ein Glas füllen, eine typische Thermoschockbeanspruchung die jeder kennt.

"Thermoschockrisse" treten durch schockartige Temperaturänderungen in verschiedenen Bauteilen auf. Sie sind eine Form der Thermoermüdung.

Bild 5.4.2.1-3



Bild 5.4.2.1-3 (Lit. 5.4.2-24): Als Thermoschock wird gewöhnlich ein Vorgang bezeichnet, bei dem eine schnelle (schockartige) Temperaturänderung zur Schädigung führt. Dabei kann es sich um einen einzelnen oder eine Folge handeln. Damit entsteht eine Grauzone mit Thermoermüdung. Deshalb ist es besser von einem Einmalereignis auszugehen. Keramiken und Gläser zeigen diesen Schadenstyp ausgeprägt. Doch er kann auch bei Metallen auftreten. Beispielsweise beim Härten, Schleifen oder der Beaufschlagung einer heißen Wand mit Wasser. Die Folge ist **Rissbildung in der Abschreckphase**. Thermoschock wird offenbar in der Literatur auch angewandt, wenn mehrere schnelle Temperaturänderungen zur Rissbildung führen. Damit wird eine Abgrenzung zur Thermoermüdung zumindest schwierig. Typisch ist **Wasser auf eine heiße Metalloberfläche** (Skizze unten rechts). Dieses Schadensbild kann besonders ausgeprägt sein, wenn **Beschichtungen** vor-

liegen, die sich in Abhängigkeit von der Temperatur beim Aufheizen oder Abkühlen, spröd verhalten.

Die Skizze unten links zeigt Risse die beim Heißlauf eines Gleitlagers in einer Kurbelwelle entstanden (Lit. 5.4.2-23). Typisch sind mehrere parallele Risse mit einer Orientierung quer zur Gleitrichtung. Ein solches Bild zeigen Schleifrisse mit dem Mechanismus der Heißriss-/Warmrissbildung (Bild 4.4-15).

Das allgemein bekannte Beispiel für einen Thermoschock-Vorgang ist der **Bruch eines Glases beim Einfüllen einer zu heißen Flüs**sigkeit.

Ob der bekannte Löffel in der Teetasse einen tatsächlichen Schutz gegen Thermoschockrisse bieter ist umstritten. Denkbar ist, dass er wie eine Prallplatte in technischen Anlagen den heissen Wasserstrahl verteilt. Das minimiert die örtliche Aufheizung und Temperaturgradienten. Gefährlich hohe Wärmespannungen werden verhindert. Genügt es doch bei einem spröden Werkstoff wie Glas oder Prozellan bereits, wenn lediglich die Bruchspannung nicht erreicht wird. Unter dieser Überlegung wäre das auch ein lehrreiches Beispiel für den Konstrukteur.

Bild 5.4.2.1-4: Das Verhalten bei Thermoermüdung hängt vom Zusammenwirken vieler Einflüsse ab. Sie können sich aufeinander auswirken.

**Betrieb:** Das Temperaturniveau beeinflusst Festigkeit, Zähigkeit und Diffusionsvorgänge. Von den Temperaturgradienten hängen behinderte Wärmedehnungen und damit Art und Höhe der sich aufbauenden Spannungen ab. Die Bauteiltemperaturen werden von Kühlung und Aufheizung gesteuert. Dabei spielen Temperatur, Druck und Geschwindigkeit der strömenden Medien (Wärmeübergang) die entscheidende Rolle.

Die Zusammensetzung des Heißgases, insbesondere Verunreinigungen wie Salze (z.B. NaCl) und Stäube (schwefelhaltig wie CaSO<sub>4</sub>) können durch eine Vorschädigung den Anriss begünstigen und/oder den Rissfortschritt beschleunigen.

Thermoermüdungsrisse sind in der Lage mit ihrer Kerbwirkung und /oder durch Frequenzabfall (Resonanz) Brüche als Folge hochfrequenter Schwingungen auszulösen. Die Chance diese Schäden rechtzeitig abzufangen ist erfahrungsgemäß eher gering.

Konstruktion: Das Spannungsniveau hängt von überlagerten äußeren Kräften ab (z.B. Fliehkraft, Gaskräfte, Einspannkräfte). Es beeinflusst Anrisslage, Anrisszeitpunkt und Rissfortschritt. Der von den Temperaturgradienten abhängige Spannungsgradient wirkt sich besonders auf Richtung und Geschwindigkeit des Thermoermüdungsrisses aus (Bild 4.3-11). Stark abfallende Zugspannungen, in manchen Fällen mit dem Übergang in eine Druckspannungszone, können die Fortschrittsgeschwindigkeit bis zum Stillstand verzögern und so ein "fail safe"-Verhalten ermöglichen. Unter solchen Bedingungen lässt sich der Riss kalkulierbar in die Lebensdauerphilosophie einbeziehen.

Querschnitts- und Geometrieänderungen verursachen Form- und Steifigkeitskerben (z.B. am Übergang von einem dicken zu einem dünnen Querschnitt, Bild 5.4.4-1), die den Anriss begünstigen. Auch die Kühlkonfiguration im Innern des Schaufelblattes und die nach außen tretenden Kühlluftbohrungen (Schleierkühlung) wirken als Formkerben. Manche Konstruktionen die einen gewissen Kühlluftverlust tolerieren, ermöglichen die Zulassung größerer Risslängen.

**Fertigung:** Bei Verfahren wie Schleifen und Schweißen können hohe Zugeigenspannungen, Abnahme der Zähigkeit und ungünstige Gefüge auftreten. Die Herstellung der Bohrungen für die Schleierkühlung von Heißteilen beeinflusst die Anrissempfindlichkeit. Schmelzen Verfahren die Bohrungsoberfläche an (Funkenerosion = EDM, oder Laserbohren), entsteht

eine wiedererstarrte spröde Zone (engl. recastlayer) mit hohen Zugeigenspannungen.

Werkstoff: Er spielt natürlich eine besondere Rolle bei der Entstehung von Thermoermüdungsrissen.

Verhalten des Grundwerkstoffs: Eigenschaften unter mechanischer Belastung wie statische und dynamische Festigkeit, Steifigkeit (Elastizität, Bild 5.4.2.1-8) und plastische Verformbarkeit (Zähigkeit, Duktilität, Bild 5.3-1 und Bild 5.4.2.1-7) beeinflussen den Widerstand gegen Rissbildung. Eine erhöhte Betriebstemperatur bedeutet bei Thermoermüdung nicht notwendigerweise eine geringere Lebensdauer. Steigt die Zähigkeit mit der Temperatur an, kann sich dies auf den Anriss verzögernd auswirken. Die Belastung entsteht aus Wärmedehnungen, die u.a. von Dehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit (Bild 5.3-1) und spezifischer Wärme abhängen. Die Zusammenhänge werden äußerst komplex, wenn sich das Werkstoffgefüge während der Betriebszeit temperatur- und belastungsabhängig verändert. Einen zusätzlichen Einfluss kann die Oxidations-und Korrosionsbeständigkeit auf die Anrissbildung und den Rissfortschritt ausüben (Bild 5.3.1-0). Das gilt für viele Konstruktionswerkstoffe der Heißteile wie Stähle und Nickellegierungen (Bild 5.3.2-5)

Einfluss des Werkstoffzustands: Größe und Orientierung der Körner (Kristallorientierung, Korngrenzen, Inhomogenitäten, Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8) beeinflussen den Anriss und den Rissfortschritt erheblich. Dies ist in Spezifikationen des Rohteilherstellers zum Halbzeug für Gießen, Schmieden und Wärmebehandlung zu berücksichtigen. Die Oberflächentopografie mit Art, Orientierung und Größe von Bearbeitungsriefen, Bild 4.4-12) kann sich sowohl als Kerbe auswirken als auch den örtlichen Wärmeübergang und damit die Temperaturgradienten beeinflussen. Die Bauteiltemperaturen werden von **Reflexion** und **Absorption** der **Wärmestrahlung** an der Oberfläche beeinflusst. Neuteiloberflächen können sich mit zunehmender Oxidation in der Wärmeaufnahme deutlich verändern. Metallisch blanke (Neuteile), insbesondere reaktive, geätzte Oberflächen sind besonders oxidationsempfindlich. So entstehen leichter anrissbildende Angriffe (Bild 5.6.3.2-2).

In gerichtet erstarrten und Einkristall-Werkstoffen (Bild 5.4.3.2-1) richtet sich über längere Betriebszeiten unter TF-Beanspruchung, ähnlich wie bei Zeitstandbeanspruchung, die  $\gamma$ '-Phase abhängig von der Spannungshöhe charakteristisch aus (Floßbildung, engl. raftening, Lit 5.4.2-10). Die Orientierung erfolgt gewöhnlich parallel zur Zugbeanspruchung.

In Einkristallwerkstoffen entstehen wegen der fehlenden Korngrenzen Thermoermüdungsrisse bevorzugt an der Oberfläche. Die Anrisse stehen im Zusammenhang mit einer oxidationsbedingten Verarmung der Oberflächenzone an Legierungsbestandteilen. Unterstützt werden diese Anrisse von der Kerbwirkung gussbedingter Mikroporen (Bild 5.4.3.2-8 und Bild 5.4.3.2-9, Lit. 5.4.2-15).

**Beschichtungen** von Heißteilen können sehr unterschiedlich sein.Beispiele sind keramische **Wärmedämmschichten**, thermische **Spritz**schichten, Diffusionsschichten, galvanische Schichten und Schichtkombinationen. Sie beeinflussen mit ihren mechanischen Eigenschaften das Thermoermüdungsverhalten (Lit. 5.4.2-19). Sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung ist möglich.

Von einem Einfluss der Schichtdicke ist auszugehen. Steigt diese, ist gewöhnlich mit einem Abfall der Schwingfestigkeit zu rechnen. Dabei können auch Inhomogenitäten in der Zusammensetzung eine Rolle spielen.

Alle Aluminid-Diffusionsschichten für den Oxidationsschutz verkürzen die TMF-Lebensdauer wenn Sprödrisse entstehen. Diese Ge-

Fortsetzung auf Seite 5.4.2.1-10

Die vielfältigen voneinander abhängigen Einflüsse auf das Thermoermüdungsverhalten eines Bauteils erfordern trotz verbesserter Auslegung umfangreiche Nachweise eines ausreichenden Betriebsverhaltens.



Fortsetzung von Seite 5.4.2.1-8

fahr besteht besonders bei relativ niedrigen Temperaturen wenn die Zähigkeit noch gering ist.

Ein erhöhter Al-Gehalt der Schicht verstärkt diesen Effekt.

Die Schichteigenschaften hängen nicht zuletzt von der Herstellung (Verfahrensparameter) ab. So können sich Schichten mit der gleichen chemischen Zusammensetzung, aber verschiedener, herstellungsbedingter Struktur deutlich unterschiedlich verhalten. Ein Beispiel sind erosionsfeste thermisch gespritzte Wärmedämmschichten. Diese haben eine typisch lamellare Struktur im Gegensatz zи "kolumnaren" TF-resistenteren Aufdampfschichten. Thermisch isolierende Schichten (Wärmedämmschichten) wirken auf doppelte Weise günstig. Sie verringern bei gekühlten Bauteilen Temperaturgradienten und senken das Temperaturniveau. Ein ähnlicher Effekt ist mit reflektierenden Schichten (Gold, Silber, Platin) erzielbar. Voraussetzung ist, die Wärme wird zu einem deutlichen Anteil über Strahlung zu und/oder abgeführt. Wichtig ist die Duktilität (Zähigkeit) der Schicht bei Betriebstemperatur. Es ist zu erwarten, dass spröde Schichten TF-Anrisse begünstigen (Lit 5.4.2-9). Bevor ein Anriss im Grundmaterial entsteht, kann es zur Rissbildung in der Schicht und in der Folge zum Abplatzen kommen. Dies hat eine örtliche Temperaturerhöhung und/oder verstärkte Oxidation zur Folge. Verändert die Alterung von Schichten mit Rissbildung, Sintern, Diffusion, "Abzehrung" durch Oxidation und Erosion deren TF - Eigenschaften, ist dies in der Bauteilauslegung und Lebensdauerabschätzung zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 4.5).



Bild 5.4.2.1-5 (Lit. 5.4.2-24): Als Beispiel für thermoermüdungsbeanspruchte Druckgefäße (Kessel, Rohrleitungen) wie in Kraftwerken und chemischen Anlagen sollen Erfahrungen mit Brennkammergehäusen von Turbotriebwerken dienen. Sie müssen einem Innendruck widerstehen der über 40 bar erreichen kann. Zusätzlich unterliegen sie auch im normalen Betrieb zyklischen Temperaturen von mehreren hundert °C. So können gefährlich hohe Thermoermüdungsbeanspruchungen induziert werden. In Schadensfällen können exzessive örtliche Überhitzungen der Wände mit Ausbeulungen ("6") und Rissbildung auftreten, die in einem explosiven Aufreißen enden.

Flanschübergänge  $(,,1^{"}, Skizze oben links)$ und Kanten an Stößen  $(,,2^{"})$  im Bereich von Axialflanschen sind für Anrisse durch Thermoermüdung besonders empfindlich.

Erfahrungsgemäß neigen eingeschweißte Anschlussstutzen und Flansche zur Anrissbildung. Sanfte Übergänge in die Gehäusewand ("3a") sind deutlich weniger gefährdet als zylindrische Einschweißaugen ("3b"Bild 5.4.2.2-3). Eine Schweißverbindung im Übergang mit ausgeprägter Kerbwirkung (Bild 5.4.4-1) ist unbedingt zu vermeiden.

Auch katastrophale Schäden an nicht axial geteilten Gehäusen sind bekannt geworden. Hier befand sich die Schwachstelle im **Bereich** der Verschraubung ("5") eines Umfangsflanschs.

Bild 5.4.2.1-6: Die Ermittlung von Thermoermüdungseigenschaften und deren Übertragung auf das realistische Bauteilverhalten im Betrieb ist wegen der vielfältigen Einflüsse mit Unsicherheiten verbunden. Dies ist eine typische Problematik für die Auslegung von Bauteilen.

Nicht ausreichend betriebsnah zur Abschätzung der Lebensdauer komplexer Bauteile haben sich LCF-Versuche bei konstanter Temperatur ("Isotherme Ermüdung", Bild 5.4-3), erwiesen. Heute werden in kombinierten Versuchen durch unabhängige Überlagerung zyklischer äußerer Kräfte und Temperaturen Lebensdauern (Lastwechsel bis zum Versagen) an Rundproben in Abhängigkeit von der Dehnungsamplitude ermittelt (Bild 5.4.2.2-5). Der Prüfquerschnitt einer üblichen TMF-Rundprobe weist im Gegensatz zur TF-Beanspruchung vieler Bauteile eine gleichmäßige Spannung auf. Mit solchen Versuchen erhält man reproduzierbare Ergebnisse. Auch Einflüsse von Beschichtungen sind so bestimmbar. Diese Ergebnisse fließen in Finite Element-Rechnungen zu den Temperatur-und Dehnungszyklen am Bauteil ein. Damit lassen sich auch an komplexen Bauteilen Lebensdauer-Abschätzungen durchführen, zumindest soweit es den ersten Anriss betrifft. Diese erfordern jedoch eine kritische Wertung, insbesondere wenn offenbar Betriebsergebnisse davon deutlich abweichen. Das ist der Fall wenn im Bau-teil im Gegensatz zur Probe ein Spannungsgradient vorhanden ist und sich die Rissfortschrittsgeschwindigkeit entsprechend verändert (Bild 4.3-11). Eine weitere Problematik dieser Versuche ergibt sich, wenn Gefüge (Korngröße, Kornorientierung, Inhomogenitäten und Schwachstellen, Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8) und der Prüfquerschnitt nicht ausreichend das Bauteil repräsentieren (Bild 5.4.2.2-5). Geht es um vergleichende Werkstoffbeurteilung bei TF-Beanspruchung lassen sich Versuche mit zyklischer örtlicher Aufheizung nutzen. In diesen Versuchen kann das Risswachstum in der Anfangsphase beobachtet werden. Wird die Aufheizung mit Heißgas vorgenommen, ist der Einfluss von Effekten wie Oxidation und Heißgaskorrosion erkennbar. Als Proben werden gewöhnlich solche mit einer scharfen Kante (prismatischer oder keilförmiger Querschnitt, Skizze unten links) verwendet. Die Wärme wird an der Kante bzw. Verjüngung eingebracht (Bild 5.4.2.2-5). Eine besondere Herausforderung ist die **begrenzte quantitative Auswertbarkeit** für verlässliche Berechnungsdaten. Dabei hilft eine Finite-Element-Rechnung der Aufheizzone.

Eine weitere Möglichkeit das TF-Verhalten betriebsnäher zu ermitteln sind zyklische Aufheizversuche an repräsentativen Bauteilen wie Turbinenschaufeln (Skizze Mitte). Dabei kann gegebenenfalls auch eine Konvektionskühlung im Innern simuliert werden. Mit solchen Versuchen lassen sich auch **Rückschlüsse auf die** Lage der Anrissbereiche am Bauteil (z.B. Kühlluftkanäle, Bild 5.4.2.1-9) ziehen. Diese Versuche sind jedoch häufig aufwändig und komplex. Sie simulieren gewöhnlich auch nicht eine Überlagerung der Wärmespannungen mit äußeren Kräften wie Gasbiegung und Fliehkraft. Am realistischsten, aber auch am aufwändigsten, erscheint eine TF-Lebensdauerabschätzung in der Maschine. Auch in diesem Fall ist darauf zu achten, dass es sich um, für die Serie repräsentative, Bauteile handelt. Dazu gehören. Querschnitt, Gefüge (Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8), Beschichtungen und Fertigungsverfahren. Ebenso müssen die Prüfzyklen auf das Verhalten im Serienbetrieb rückschließen lassen. So sind z.B. Temperaturverteilungen in der Gasströmung anlagenspezifisch von großer Bedeutung.

**Regenbogenversuche**, in denen Bauteile mit unterschiedlichen Eigenschaften (z.B. Grundwerkstoff, Beschichtung) im gleichen Lauf zum Einsatz kommen, ermöglichen **vergleichende Untersuchungen**.

Das Thermoermüdungsverhalten eines Werkstoffs wird von vielen Parametern beeinflusst. Deshalb ist es schwer, Auslegungskennwerte für das Betriebsverhalten zu ermitteln.





Bild 5.4.2.1-7 (Lit 5.4.2-3): Für die Festigkeitseigenschaften des Werkstoffs ist die Korngröße (Bild 5.4.3.2-3) neben der Kornorientierung (Bild 5.4.2.1-8) von großer Bedeutung. Im Allgemeinen weisen größere Körner eine höhere Zeitstandfestigkeit (niedrigere Kriechgeschwindigkeit, Diagramm oben links) auf. Dafür nimmt die Schwingfestigkeit (LCF und HCF) mit der Korngröße tendenziell ab (Diagramm oben rechts, Lit 5.4.2-7, Bild 5.4.3.2-8). Feinkorn ist darüber hinaus gewöhnlich duktiler als Grobkorn.

Was die Kornausbildung anbetrifft, sind Bauteile mit komplexer Geometrie und/oder sehr unterschiedlichen Festigkeitsanforderungen besonders anspruchvoll. Ein hoch LCF-beanspruchter Bereich sollte **Feinkorn** aufweisen. Besonders hohe Temperaturbelastung erfordert dagegen **Grobkorn**. Leider lässt sich das oft nicht realisieren. Beim Gießprozess bildet sich in dicken, langsam erstarrenden Querschnitten Grobkorn. Gerade diese sind hoher LCF-Belastung durch Thermoermüdung ausgesetzt. In dünnen bildet sich dagegen wegen der schnelleren Erstarrung Feinkorn. Diese Zonen werden aber im Betrieb wegn schlechter Wärmeabfuhr und niedriger Wärmekapazität

besonders heiß, benötigen jedoch eine hohe Kriechfestigkeit. Zu allem Überfluss ist hier das Feinkorn wegen des Temperaturgradienten bei der Erstarrung, oft quer zur Beanspruchung orientiert.

In einem Feingussteil wäre anzustreben, dass die (üblicherweise) dynamisch höher belastete Oberfläche globulares Feinkorn aufweist. Um dies zu erreichen, können im Feingussprozess die Keramikformen innen (auf der Seite der Schmelze) mit einer besonderen Beschichtung mit vielen Erstarrungskeimen versehen werden. So ist es möglich, dass sich an der Oberfläche eine Feinkornschicht bildet (Skizze unten rechts). Sie erschwert Rissbildung durch Thermoermüdung. Die grobkörnigeren inneren Querschnitte tragen zu ausreichender Kriechfestigkeit bei. Auf diese Weise besteht eine Chance, die Kriech- und Schwingfestigkeit des Bauteils entsprechend den zu erwartenden Belastungen zu optimieren.





Bild 5.4.2.1-8 (Lit 5.4.2-3): Korngröße und Kornform werden von den Erstarrungsbedingungen bestimmt. Die Körner wachsen in Richtung des Temperaturgradienten senkrecht zur Oberfläche. So entsteht längliches, gerichtetes Feinkorn (kolumnare Körner, Stängelkristalle). Die schnellere Erstarrung in dünneren Querschnitten führt zu kleineren Körnern. Diese Kornausbildung ist für Kanten am Übergang zu dünnen Querschnitten typisch (Skizzen unten). In dickeren Querschnitten bilden sich an der Oberfläche und im Inneren eher gleichmäßig geformte Körner ("equiaxed", globular).

Sind die Korngrenzen der Stängelkristalle quer zur Hauptbeanspruchung orientiert, ist dies für die Festigkeit nachteilig. Korngrenzen sind gegenüber Zeitstandbeanspruchung (Bild 5.3.2-6) und Thermoermüdung besondere Schwachstellen. Diese Schwachstellen begünstigen Heißgaskorrosion, Rissbildung und Rissfortschritt. Deshalb wird eine solche kolumnare Gefügeausbildung in bestimmten Bauteilpartien vom Konstrukteur nicht zugelassen. Globulares Korn sorgt dafür, dass Risse auf Korngrenzen stoßen und im Zick Zack abgelenkt werden. Energie wird so absorbiert und der Rissfortschritt verzögert.

In einem Korn bzw. Kristall ist der **Elastizi**tätsmodul von der Kristallorientierung abhängig (Bild 5.4.3.2-1). Parallel zur Erstarrungsrichtung, also in Längsrichtung weisen kolumnare Körner einen 30-40% niedrigeren Elastizitätsmodul als globulare Körner auf.



Diese größere Nachgiebigkeit führt bei einer gleichmäßigen elastischen Beanspruchung örtlich an der Oberfläche zu einer 30-40% niedrigeren Spannung. Zwei unterschiedliche Korntypen (kolumnar und equiaxial) in einem dünnen Querschnitt ergeben eine Spannungsverteilung im Korngrößenbereich die dem der E-Moduli entspricht. Am Übergang der beiden Kornausbildungen kommt es deshalb zu einem **Kerbeffekt** mit einem Spannungssprung (Diagramme oben). Dies gilt auch für Wärmespannungen ( $\Delta \sigma = \alpha . E . \Delta T$ ) die sich auf Grund behinderter Dehnung bilden (Bild 5.4.2.1-2). Damit ist das Thermoermüdungsverhalten merklich betroffen.

Die Folge ist, dass sich Risse bevorzugt an der Oberfläche am Übergang von kolumnarem zu globularem Gefüge bilden.

Bild 5.4.2.1-9 (Lit. 5.4.2-1): Für das Thermoermüdungsverhalten eines innengekühlten Heißteils soll hier eine **Turbinenrotorschaufel** dienen. Die Skizze "A" zeigt die typische Temperaturverteilung mit einem großen Temperaturgradienten. Um die Kühlluftbohrungen sind die Temperaturen relativ niedrig ("C"). Diese Zonen nehmen einen großen Anteil der fliehkraftbedingten Betriebsbelastungen auf. Die Kühlung ist so ausgelegt, dass



die Schaufeltemperatur zum Fuß hin abnimmt, um der steigenden Fliehkraftbelastung gerecht zu werden. Zusätzlich werden die Scheibentemperaturen (an den Schaufelaufnahmen) niedrig gehalten. Die Kanten sind trotz intensiver Kühlung besonders heiß. Die größere Wärmedehnung wirkt hier der Fliehkraftbeanspruchung entgegen. Schaufelkanten sind wegen ihrer hohen Betriebstemperaturen besonders von Oxidation und Gefügeveränderungen betroffen.

Die ungleichmäßige Temperaturverteilung und -belastung im Querschnitt der Schaufel ist auch der Grund, warum eine einfache Längendehnungsmessung zur Ermittlung der Kriechdehnung für die Abschätzung der Restlebensdauer meist ungeeignet ist. Kriechverformungen führen eher zu Verzügen im Blatt und nicht zu auswertbaren Längenänderungen. Erfolgversprechender könnten neueste Vermessungsmethoden mit Laserverfahren sein. Sie erfassen die gesamte Schaufelgeometrie.

So lässt sich das vorher dokumentierte individuelle Neuteil mit dem gelaufenen Zustand vergleichen.

Bei Wärmespannungen sind gewöhnlich die kälteren Zonen eines Bauteils besonders hoch auf Zug beansprucht. Das ist eine Folge der größeren Dehnung der wärmeren Bereiche im verformungsbehinderten System. Das ist für innen gekühlte Heißteile typisch. Um die Kühlluftbohrungen bilden sich Zugspannungszonen von denen bevorzugt Thermoermüdungsrisse ausgehen ("D"). Diese können von außen visuell erst erkannt werden, wenn sie zur Oberfläche durchbrechen und das Bauteil bereits merklich geschwächt haben. Diese Schädigungsform wird von Oxidation oder Heißgaskorrosion in den Kühlluftbohrungen unterstützt.

"E" zeigt das "Aufknöpfen" durch die Prallbohrungen im Inneren. Auslöser sind hohe Schubspannungen. Ursache sind unterschiedliche Temperaturen zwischen der vom Gas-



#### Bild 5.4.2.1-10

strom beaufschlagten Druckseite und der Saugseite (Lit 5.4.2-8).

Bild 5.4.2.1-10 (Lit 5.4.2-2): Thermoermüdungsrisse erhalten vom Schädigungsmechanismus charakteristische Merkmale. Der verzögerte Rissfortschritt bis zum Stillstand lässt starke Oxidation der Rissufer und Kanten zu. Grund und Kanten der Risse werden beim Ausbröckeln der Oxidschicht, unter Stauchung und Dehnung abgerundet. Ist die Oxidation gering, lassen sich ein Aufklaffen der Risse und aufgeworfene Kanten beobach-("**B**"). Das sind Folgen ten des Stauchprozesses beim Aufheizen und der nachfolgenden Schrumpfung beim Abkühlen. Die aufgeworfenen Risskanten zeigen eindrucksvoll die Stauchphase (Bild 5.4.2.1-2).

Bleibt das Oxid haften, ist der **Riss bis zum** ausgerundeten Grund mit Oxid gefüllt ("C"). Dies ist ein sicheres Zeichen für einen sehr langsamen Rissfortschritt. Das weist auf die Chance hin, mit dem Riss noch einige Zeit zu 'leben'. Damit kann eine regelmäßige Überwachung möglich sein. Mit Oxid gefüllte Risse können den Nachweis mit Eindringstoff beträchtlich erschweren. Der schnelle Rissfortschritt eines hochfrequent fortschreitenden Schwingbruchs zeigt dagegen keine vergleichbare Oxidation. Eine solche Situation wird von dem eher feinen Riss am ausgerundeten Rissgrund angezeigt und kündigt baldiges Versagen an.

Probleme der Maschinenelemente

Häufig beobachtet man bei extremen Temperaturgradienten an der Oberfläche Felder parallel orientierter, eher flacher Risse (Lit 5.4.2-20). Sie tragen im Zusammenspiel mit der Oxidation zum rauen, markanten Schadensbild der "**Orangenhaut**" bei (Bild 5.6.1.4.2-4). Derartige Schädigungen sind für heißgasangeströmte Oberflächen, besonders Kanten, typisch.

## 5.4.2.2 Abhilfen gegen Schäden durch Thermoermüdung



In Bild 5.4.2.2-1 liegt der Schwerpunkt bei spezifischen Abhilfen zur Vermeidung von Schäden durch Thermoermüdung. Weitere Abhilfen sind im Kapitel 5.4.1.3 behandelt worden.

Die besondere Eigenschaft der Thermoermüdungsrisse ist es, zum Spannungsabbau beizutragen und bei steil abfallenden Spannungsgradienten (Bild 4.3-11) das Wachstum zu verlangsamen (Bild 5.4.2.1-2 und Bild 5.4.2.1-10). Das lässt häufig in Abhängigkeit von zusätzlichen Beanspruchungen eine gewisse, bauteilspezifische Risslänge akzeptieren. So werden z.B. in Vorschriften und Anweisungen wie Überholhandbüchern oder Bewertungen von Boroskopbefunden bei Zwischeninspektionen, Risse (meist beschränkt auf statische Heißteile) zugelassen. In solchen Fällen kann man gewöhnlich davon ausgehen, dass es sich um Thermoermüdung handelt. Dieser "beherrschbare" Schadensmodus erlaubt mit betriebsnahen Nachweisen ausreichende Lebensdauern trotz Rissbildung. Thermoermüdungsrisse statischer Heißteile wie Gasführungswände/-bleche können mit guten Erfolgsaussichten im Rahmen einer Überholung geschweißt werden. Es muss jedoch bewusst sein, dass weder von einer Reparaturlötung noch von einer Reparaturschweißung eine Festigkeit der Neuteile zu erwarten ist. Es handelt sich also eher um ein Abdichten gegen unzulässigen Kühlluftverlust, Heißgaseinbruch oder um eine umströmte Kontur wiederherzustellen. Deshalb sollten, wenn merkliche zusätzliche Lasten wirken (z.B. Gaslasten oder Lagerkräfte), nie alle tragenden Teile eines Einbausatzes aus Einzelteilen oder alle Strukturen eines integralen Systems (Lagerstreben von Gehäusen, Bild 5.4.2.2-3) repariert sein. So ist es wichtig, immer eine gewisse Zahl mit Neuteileigenschaften sinnvoll (z.B. am Umfang) zwischen den Reparaturteilen zu verteilen. Anderenfalls kann es zum plötzlichen Versagen der gesamten Struktur mit katastrophalen Folgen kommen.

Echte Abhilfe gegen Thermoermüdung ist zu erwarten, wenn es gelingt die **Temperaturverteilung in** einem Bauteil zu vergleichmäßigen. So werden bereits Wärmedehnungsunterschiede und damit Wärmespannungen vermieden. Ist dies nicht möglich, weil beispielsweise sonst das Bauteil thermisch überlastet wird, ist nach einer Möglichkeit zu suchen, die Behinderung der Wärmedehnung zu minimieren. Dafür können elastische Konstruktionen dienen (Bild 5.4.2.2-3).

Abhilfen gegen Thermoermüdungsschäden			
Reparatur	Gestalt	Werkstoff	Beanspruchung
<ul> <li>Schließen der Risse durch Schweißen oder Löten</li> <li>Voraussetzungen:</li> <li>genaue Kenntnisse möglicher Betriebs- belastungen</li> <li>Kenntnis des Versa- gensmechanismus</li> <li>kein unzulässiger Rissfortschritt zu erwarten</li> <li>Funktion des Bau- teils durch den Riss unbeeinflusst</li> <li>Festigkeit des riss- behafteten Bauteils ausreichend</li> </ul>	<ul> <li>örtliche Erhöhung der Elastizität und Massnahmen zur Optimierung des Wärmeflusses durch:</li> <li>Konstruktions- änderung</li> <li>Neukonstruktion</li> <li>Abbohren der Risse</li> <li>Voraussetzungen: Schadensursachen voll verstanden</li> <li>Bauteilfunktion bleibt erhalten</li> <li>ausreichende Er- probung ist gewähr- leistet (Zeit, Aufwand)</li> </ul>	<ul> <li>Wärmefluss optimieren durch:</li> <li>Wärmedämmschichten (Zirkonoxid)</li> <li>Reflexionsschichten (z.B. Silber oder Gold)</li> <li>Werkstoffe mit besserem Thermoermüdungsverhalten (z.B. gerichtet erstarrt, Einkristall).</li> <li>Voraussetzungen: Funktion und Betriebsverhalten des Bauteils bleibt erhalten</li> <li>ausreichende Erprobung ist gewähr-</li> </ul>	<ul> <li>Verringerung der Thermozyklen in Zahl und/oder Höhe</li> <li>Lebensdauerbe- grenzung bezüglich der Thermowechsel</li> <li>Betriebszyklen ändern (z.B. Start- sequenz)</li> <li>Voraussetzungen: Die Betriebsanfor- derungen werden erfüllt</li> <li>Betriebsparameter werden ausreichend genau und sicher überwacht</li> </ul>
			Bild 5.4.2.2-1

**Bild 5.4.2.2-1:** Auch für das Problem der Thermoermüdung gilt "Vorbeugen ist besser als Heilen". Der Vorbeugung entspricht in diesem Fall eine geeignete Auslegung und konstruktive Gestaltung. Den Part der Heilung übernimmt die Reparatur.

Bewertung der Betriebstauglichkeit: Im eingebauten Zustand kann es notwendig werden, die weitere Betriebstauglichkeit eines Heißteils zu beurteilen. Gewöhnlich im Rahmen einer Boroskop-Inspektion. Das Beispiel zeigt eine (Hochdruck-) Turbinenleitschaufel. Die Bewertung der Rissbildung erfolgt anhand von Grenzwerten, die der OEM (z.B. im Wartungshandbuch) vorgibt. Die Festlegung solcher Grenzwerte erfordert genaue, in erster Linie erfahrungsbasierte Kenntnisse

- der Betriebsbelastungen,
- des zu erwartenden Rissfortschritts,
- des Versagensmechanismus und

 der Auswirkungen der Bauteile aufeinander (z.B. etwaige Verbindung des K
ühlluftsystems zum gek
ühlten Hei
ßteil).

Damit ist zu gewährleisten:

- Die Betriebstauglichkeit für die vorgesehene Lebensdauer. Dies bedeutet, dass die Funktion des Bauteils innerhalb der Spezifikationen gewährleistet ist. Hierzu gehören auch ein akzeptables Verhalten als Folgeschaden. Dies erfordert beispielsweise die Gewährleistung einer ausreichenden Energieaufnahme (Containment, Kapitel 5.2.2).

-Kein unakzeptabel vorzeitiger oder erzwungener Ausbau zu einem ungeeigneten Zeitpunkt.

- Kein spontanes, **unvorhersehbares/nicht abfangbares Versagen** des Bauteils.

Konstruktion und Auslegung: Trotz der heute zur Verfügung stehenden umfangreichen analytischen Hilfsmittel (Finite Element-Rechnungen von Temperaturen, Dehnungen und Spannungen) kann für ein akzeptables Betriebsverhalten (insbesondere Thermoermüdungsverhalten) immer noch nicht auf **Erfahrung** verzichtet werden. Dabei sind nach Möglichkeit **bewährte Konstruktionsprinzipien** zu nutzen.

- Gestaltung/Formgebung mit möglichst wenig Kerben. Dazu gehören Steifigkeit/Querschnitte, Querschnittsübergänge und Radien (Bild 5.4.4-1).

- Werkstoffauswahl unter Aspekten wie Grundwerkstoff, Materialkombinationen, Beschichtungen und Fügungen.

- Gewährleistung akzeptabler **Betriebstemperaturen in Höhe und Gradienten**. Voraussetzung ist die richtige Auslegung des "Wärmehaushalts" (z.B. Kühlsystem).

Reparatur: Die Grenzen für eine Reparatur und deren Verfahren (z.B. Hochtemperaturlötungen, Schweißungen) werden üblicherweise vom **OEM** auf Grund umfangreicher Erfahrungen (auch mit anderen Maschinentypen) vorgegeben. Sie sind strikt einzuhalten. Dies gilt auch für scheinbar kleine "Verbesserungen" wie ein anderes Beschichtungsverfahren. Es ist darauf zu achten, ob Restriktionen für die Zahl der zum Einbau kommenden reparierten Bauteile vorliegen. Muss z.B. eine gewisse Anzahl von Teilen oder Strukturbereichen (z.B. Gehäusestreben, Bild 5.4.2.2-3) dem Neuzustand entsprechen? Eine solche Forderung kann bestehen, um gewisse Funktionen zu erfüllen, die einem Lizenznehmer und/oder Betreiber nicht von vornherein erkennbar oder einsichtig sind.



#### Bild 5.4.2.2-2: Das "Abbohren" von Rissen ist ein weitverbreiteter Brauch des Maschinenbaus. So soll auf einfache, schnelle und preiswerte Weise ein Riss gestoppt und zusätzliche Lebensdauer gewonnen werden. Nicht immer ist diese Methode zielführend.

Positiv ist, dass eine Bohrung am Rissende eine deutliche Reduzierung der Kerbwirkung der scharfen Rissspitze durch den vergleichsweise großen Bohrungsradius bedeutet.

Wenn der Riss ("A"), z.B. ein Thermoermüdungsriss, sich bereits verlangsamt ("B", Bild 5.4.2.1-10), ist die dynamische Beanspruchung der Bohrungswand so niedrig, dass hier zumindest über eine nutzbare Lebensdauer ein erneuter Anriss nicht zu erwarten ist ("E").

Befindet sich jedoch die Rissspitze in einem hoch beanspruchten Bauteilbereich der bereits ein deutliches Risswachstum erwarten lässt ("C"), muss in kurzer Zeit nach dem Abbohren mit einem Anriss in der Bohrung gerechnet werden. Der Riss wächst nun sogar noch schneller, weil er mit der Bohrung an Länge zugenommen hat. In diesem Fall ist nur eine geringe Lebensdauerverlängerung wahrscheinlich. Es besteht sogar die Gefahr eines nicht abfangbar schnellen Rissfortschritts ("D").

In allen Fällen ist zu prüfen, ob durch die Bohrung nicht eine **spannungserhöhende**  Querschnittsschwächung entsteht oder durch eine Leckströmung sich die Temperaturverteilung ungünstig verändert. Dies könnte mit höheren Wärmespannungen zur Rissbildung in der Bohrung beitragen.



"Augen" und Flanschstutzen in der Gehäuseoder Stützwand eines Heißteils (Lit 5.4.2-14) ist ein typischer Bereich (besonders bei Gehäusen mit Innendruck/Kesseln) mit Thermoermüdungsbeanspruchung. Dies dürfte mit verformungsbehindernden Steifigkeitsänderungen und Temperaturgradienten in Gehäusewand und Einschweißstück (Wärmezu- und ableitung) zusammenhängen. Mit einer geziel-

ten **Erhöhung der elastischen Nachgiebigkeit** (Skizze oben links) und einer Schweißnaht (Lit. 5.4.2.2-4) im optimalen Abstand zur Stutzenwand lässt sich eine Verbesserung erzielen. Nachteile durch erhöhten Aufwand oder erschwerte Herstellung sind dabei nicht auszuschließen.

Falls Dichtigkeitsforderungen es zulassen, kann bei scheibenförmigen Gebilden die von außen aufgeheizt werden wie Wärmebehandlungsvorrichtungen und -gestelle (Bild 5.4.2.1-1.1), der "Kranzbereich" mit radialen Schlitzen "aufgelöst" werden (Skizze oben rechts). Hier sind jedoch absichernde Bauteilversuche und ausreichende Eprobung erforderlich. Im Grund der Schlitze oder der Abbohrungen von Rissen darf kein erneuter Anriss, diesmal mit möglicherweise höherer Fortschrittsgeschwindigkeit auftreten (Bild 5.4.2.2-2).

Im Bereich von Flanschen, Rotorscheiben, Wellenansätzen, Labyrinthkonen, Gehäusen und anderen tragenden Strukturen treten Steifigkeitssprünge auf. Auch eine elastische Gestaltung des Übergangs zum Flansch vermeidet gefährliche Spannungsspitzen. Bei Labyrinthkonen erreicht man dies mit einer ausreichenden "Abklinglänge" zum ermüdungsgefährdeten Bereich. Dabei kommt es z.B. auf den axialen Abstand der Ringschweißnaht (Skizze unten links) an. Die Abklinglänge lässt sich aus dem Durchmesser des Konus und dessen Wanddicke bestimmen (Lit 5.4.2-13).

An Gehäusen, die hohen Temperaturen und Temperaturgradienten unterliegen (z.B. Turbinenaustrittsgehäuse), sind typische "Strebenrisse" mit einem Schrägstellen der Streben in Umfangsrichtung vermeidbar (Skizze unten rechts). Die Streben verdrehen bei der Wärmedehnung die Nabe gegenüber dem Außenring. So lassen sich Wärmedehnungen als Folge des schnellen Aufheizens und Abkühlens der Streben im Gasstrom ausgleichen. Bild 5.4.2.2-4: Zu unterscheiden ist eine 'erhaltende' Reparatur von Bauteilen mit Thermoermüdungsschäden und eine Abhilfe gegen solche Schäden oder eine Lebensdauerverlängerung. Sie erfordert ein bauteilspezifisches Vorgehen. Dies gilt, obwohl Reparaturlötungen an statischen Heißteilen von Gasturbinen in großem Umfang erfolgreich eingesetzt werden.

#### 'Erhaltende' Reparatur.

Verschließen von Rissen: Haben sich bereits größere Einzelrisse gebildet, die jedoch zum Stillstand gekommen sind (Oxidation, insbesondere im Rissgrund, Bild 5.4.2.1-10) bietet sich ein Fügeverfahren wie Schweißen oder Löten an, um Risse zu schließen. Von diesen Nähten kann erfahrungsgemäß nicht die Festigkeit und Zähigkeit des ungeschädigten Grundmaterials, ganz zu schweigen eines Neuteils, erwartet werden. Dies gilt selbst dann, wenn es gelang die Fügezone ganz von Oxiden zu reinigen. Gewöhnlich ist das Gefüge des lang gelaufenen Teils nicht in einem, für eine Schweißverbindung optimalen Zustand. Deshalb ist zumindest mit Mikrorissen, Lunkern und einer gefügebedingten niedrigen Festigkeit (z.B. weil nach dem Schweißen eine optimale Aushärtung nicht erfolgen kann) zu rechnen.

Die Festigkeit von Hochtemperaturlötungen reagiert besonders **empfindlich auf große Lötspalte** (Bindefehler, Bildung spröder Phasen). Verbliebene Oxide sind selbst bei Spezialbehandlungen (z.B. aggressive reduzierende Glühatmosphäre) kaum zu vemeiden.

Die Reparaturschweißung oder Lötung eines Thermoermüdungsrisses kann also immer eher als eine Abdichtungsmaßnahme angesehen werden, um Luftaustritt oder Heißgaseinbruch zu vermeiden. Solche Reparaturen werden nicht selten als "Kosmetik" bezeichnet.

Es ist deshalb äußerst wichtig, wie viele und in welcher Reihenfolge reparierte Bauteile mit neuen Bauteilen kombiniert werden dürfen,

Reparaturen und Schadensabhilfen an Bauteilen mit Thermoermüdungsrissen. Allein vom Schließen von Rissen ist nicht eine Neuteillebensdauer zu erwarten.



aufnahmevermögen des Gesamtsystems (z.B. eines Turbinenleitapparats) zu garantieren. Bei **Rissfeldern oder flächigen Schädigungen** (z.B. Orangenschaleneffekt) bleibt oft nur ein Auftrag. Ganze Bauteilpartien lassen sich

durch Einschweißen oder Einlöten eines Formstücks sanieren. Immer ist darauf zu achten, dass die **Fügungen außerhalb der thermisch** und TF-beanspruchten Bauteilzonen in möglichst "gesundem" Werkstoff angebracht sind. Zu schneller Rissbildung und kurzer Lebensdauer wird dagegen das Einfügen einer Bauteilzone führen, wenn die Nähte in hochbeanspruchten Zonen wie Radien (Kerbwirkung) liegen.

Abbohren von Rissen (Bild 5.4.2.2-2): Dieses Verfahren dient dazu, die Kerbwirkung des Risses mit dem Bohrungsradius zu entschärfen. Gegebenfalls wird dabei eine geschädigte Zone im Bereich der Rissspitze entfernt. Abbohren ist einfach durchzuführen und mit vergleichsweise geringem Aufwand verbunden. Es hat den weiteren Vorteil, dass die spannungsabbauende Elastizitätserhöhung des Risses ("atmen") erhalten bleibt. Solche Bohrungen sind natürlich nur dort möglich, wo nicht Dichtigkeitsforderungen oder ein überlasteter Restquerschnitt dagegen sprechen. Ein weiteres Problem kann auftreten, wenn die bruchmechanisch wirksame Risslänge um die Bohrung vergrößert wird (Bild 4.3-1 und Bild 4.3-3). Das begünstigt trotz verminderter Kerbwirkung einen erneuten Anriss, diesmal am Bohrungsgrund. Liegt dieser Anriss nun in einer Zone höherer Zugspannungen, kann dies den Rissfortschritt unzulässig beschleunigen. Erhöhung der Bauteilelastizität im Rissbereich. Durch federnde Gestaltung von Gehäusewänden mit Sicken (Bild 5.4.2.2-3) oder "Auflösung" einer Scheibe mit radialen "Schlüssellochbohrungen" am Umfang lässt sich ein Spannungsabbau erzielen der TF-Anrisse eher vermeidet.

#### Reparatur als Abhilfe und Verbesserung gegenüber Neu.

Eine der wirklich Abhilfe schaffenden Maßnahmen, welche die Bauteillebensdauer sogar gegenüber dem Neuteil verbessern kann. Dazu sind konstruktive und/oder technologische Massnahmen erforderlich. In den dargestellten Fällen sind zunächst gefährliche Temperaturgradienten zu vermeiden. Das ist nur in wenigen Fällen mit einem schützenden Kühlluftschleier möglich. Eher bietet sich der Auftrag einer Wärmedämmschicht im Aufheizungsbereich auf der Heißgasseite an. So lässt sich die TF-Belastung darunterliegender Reparaturschweißungen und/oder Lötungen soweit vermindern, dass eine ausreichende Lebensdauer bis zur erneuten Rissbildung erwartet werden darf. Natürlich ist zu gewährleisten, dass die Schicht nicht die Bauteilfunktion beeinträchtigt (z.B. Schichtdicke oder Gleiteigenschaften). Zur Absicherung sind zeit- und kostenaufwändige Bauteilversuche und eine Erprobung notwendig.

**Bild 5.4.2.2-5:** Eigentlich sollte es eine Selbstverständlichkeit sein, dass Proben für die **Ermittlung von Auslegungsdaten** der Bauteile in ihren Werkstoffbesonderheiten an der Auslegungsstelle entsprechen. Diese Forderung ist jedoch gerade bei TF und TMF besonders schwer einzuhalten.

Beispielsweise lässt sich aus dem hoch TMFbeanspruchten Übergang zum Deckband einer Turbinenleitschaufel (Skizze oben links) nur sehr schwer eine, für die Ermittlung von Auslegungswerten brauchbare, d.h. definiert beanspruchbare TMF-Probe (Skizze unten links) entnehmen. Deshalb werden solche **Proben** häufig separat gegossen. Ist der Probenquerschnitt größer als die Wandstärke des Bauteils an der kritischen Stelle, dürften sich beim Gießprozess andere Korngrößen, Kornformen, Kornorientierungen und Porosität einstellen. Je dicker der Querschnitt, umso größer und "runder" ist das Korn (Detail unten rechts). Ein nachträgliches Ausbohren der Pro-



be ändert dieses Problem nicht (Lit 5.4.2-15). Auch an hohl gegossenen Proben dürfte es kaum möglich sein, die Kornstruktur in **kritischen Bauteilkanten** befriedigend zu simulieren. Hier bilden sich häufig, auf Grund des Temperaturgradienten bei der Erstarrung, Stängelkristalle, die etwa parallel zum Deck-

band verlaufen (Detail oben rechts und Bild 5.4.2.1-7). Damit werden die langen Korngrenzen im Bauteil quer beansprucht. Es ergibt sich, im Vergleich zu optimalem Gefüge, ein früher Anriss und schneller Rissfortschritt. Die keilförmige TF-Probe (Skizze Mitte links) scheint eher für eine vergleichende Prüfung

bauteilrelevanter Gefüge geeignet. Hier stellen sich die Belastungszyklen auf Grund der behinderten Wärmedehnung selbst ein (Bild 5.4.2.1-2). So ist auf Grund von Gefügeunterschieden mit großen Abweichungen im Thermoermüdungsverhalten zwischen Probe und Bauteil zu rechnen.

Eine für FEM-gestützte Auslegung ausreichend sicher bestimmbare zyklische Dehnung erscheint in einer solchen Prüfung nicht gegeben. Es handelt sich wie erwähnt um eine vergleichende Werkstoffprüfung.

Noch problematischer wird es bei **beschichteten Bauteilen**. Hier spielen Schichtverhalten (Duktilität, Warmfestigkeit) und Schichtdicke eine zusätzliche Rolle. Auslegungsdaten sollten deshalb an Proben mit bauteilrelevanten Beschichtungen ermittelt werden.

**Phasenverschiebung und Haltezeiten** im Maximum und Minimum beeinflussen in hohem Maß die Anrisslebensdauer. Der Effekt ist weit größer als es eine lineare Schadensakkumulation erwarten lassen würde (Bild 5.4-12 und Bild 5.4-13). Dabei kann z.B. eine "dwell time" in der Entlastungsphase über einen Ausheilungseffekt die Lebensdauer deutlich erhöhen, in einem anderen Fall aber merklich verkürzen. Entsprechendes gilt auch für **Haltezeiten** bei hohen Temperaturen und hohen Belastungen.

## Literatur zu Kapitel 5.4.2

- **5.4.2-1** P.König, A.Rossmann, "Ratgeber für Gasturbinen-Betreiber", ASUE-Schriftreihe, Vulkan-Verlag Essen ISBN 3-8027-2545-x, 1999.
- **5.4.2-2** A.Rossmann, "Untersuchung von Schäden als Folge thermischer Beanspruchung", Beitrag aus J.Grosch "Schadenskunde im Maschinenbau", Band 308, aus der Reihe "Kontakt & Studium Maschinenbau", Expert Verlag, ISBN 3-8169-1202-8, 2. Auflage 1995, Seite 162-187.
- **5.4.2-3** Z. Mazur, J. Kubiak, C. Marino -Lopez, "Failure Analysis of Gas Turbine Last Stage Bucket Made of Udimet 500 Superalloy", ASM International Zeitschrift "Practical Failure Analysis", Volume 2(2) April 2002, Seite 31-56.
- 5.4.2-4 A.K.Koul, "Hot Section Materials for Small Turbines", Proceedings des AGARD Meeting "Technology Requirements for Small Gas Turbines", October 1993, Seite 40-1 bis 40-9.
- **5.4.2-5** G. Lange, "Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle", 4. Auflage, DGM, ISBN 3-88355-070-1, Seite 175 -178.
- 5.4.2-6 S.W. Kandebo, "Coast Guard Orders Operating Limits On HH-65As Following Engine Failure", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", January 8, 1990, Seite 28 und 29.
- **5.4.2-7** H. Huff, A. Rossmann, "Zur Kurzzeitermüdung von Turbinenrädern", Allianz "Bruchuntersuchungen und Schadenklärung", 1976, Seite 98-103.
- **5.4.2-8** W. Peschel, R. Schreieck, "A Contribution on Thermal Fatigue in cooled Turbine Blading" Proceedings Paper AGARD-CP-248 der Konferenz, "Stresses, Vibrations, Structural Integrity (Including Aeroelasticity and Flutter)", Seite 6-1 bis 6-10.
- **5.4.2-9** M.M Ratwani, A.K. Koul, J-P. Immarigeon, W. Wallace "Aging Airframes and Engines" Proceedings Paper AGARD-CP-600 Vol.1, der Konferenz, "Future Aerospace Technology in the Service of the Alliance", 14-17 April 1997, SeiteA18-1 bis A18-15.
- 5.4.2-10 C. Sommer, M. Bayerlein, W. Hartnagel, "Deformation and Failure Mechanisms of DS CM 247 LC Under TMF and LCF Loading", Proceedings CP-569 des AGARD Meeting "Thermal Mechanical Fatigue of Aircraft Engine Materials", 2-4 October 1995, Seite 11-1 bis 11-11.
- 5.4.2-11 NTSB Identification: MIA96FA013. Accident occurred OCT-23-95.
- **5.4.2-12** A. Doyle, "CFMI forced into redesign of CFM56-5A/B", Zeitschrift "Flight International", March 13-19, 1996, Seite 8.
- **5.4.2-13** J.S.Alford, G.W. Lawson, "Dimensional Stability and Structural Integrity of Labyrinth Seals", Proceedings Paper 660048 des "Automotive Engineering Congress" der SAE, Detroit, Mich. January 10-14, 1966.", Seite 1- 30.
- 5.4.2-14 K.G. Rummel, "Investigation and Analysis of Reliability and Maintainability Problems Associated With Army Aircraft Engines", NTIS, Bericht Nr. AD-772 950, August 1973, Seite 57.
- 5.4.2-15 C.C. Engler-Pinto Jr., M. Blümm, F. Meyer-Olbersleben, B. Ilschner, F. Rezai-Aria, "Non-Isothermal Fatigue: Methods, Results and Interpretation", Paper der Proceedings AGARD CP-569, von der Konferenz: "Thermal Mechanical Fatigue of Aircraft Engine Materials", Banff, Canada, October 2-4, 1995, Seite 7-1 bis 7-9.
- 5.4.2-16 Fa. R.R. "The Jet Engine", ISBN 0 902 121 2 35, Fifth edition.
- **5.4.2-17** P. Adam, "Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken", Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 114.
- **5.4.2-18** "Engine fatigue hits Lansens and Drakens", Zeitschrift "FLIGHT International, 13. October 1979, Seite 1177.
- 5.4.2-19 E.E. Affeldt, L. Cerdan de la Cruz, L. Peichl, "Influence of Aluminide Coatings on the Mechanical Behaviour of Aero Engine Turbine Components", Proceedings des "Turbine Forum, Advanced Coatings for High Temperatures", Nice/Port St. Laurent, France, April 21-23, 2004. (3512)

- 5.4.2-20 GJ. Wile, "Materials Considerations for Long Life Jet Engines", Proceeding ASE 660057 des "Automotive Engineering Congress", Detroit, Mich, January 10-14, 1966, Seite 1-13. (3479)
- **5.4.2-21** R.L Dreshfield, "Defects in Nickel-Base Superalloys", Zeitschrift "Journal of Metals", July 1987, Seite 16-21.
- **5.4.2-22** Australian Transport Safety Bureau, Technical Analysis Report No. 40/01, Occurrence No. 200103749 "Examination of a Failed Turboprop engine", Allied Signal TPE331-12UHR-701G, Fairchild Industries Inc. SA227-DC, VH-DMI, Seite 1-9.
- **5.4.2-23** G. Vouros, "Begutachtung von Maschinenschäden aus der Sicht eines Konstruktions-, Betriebs- und Service-Ingenieurs", Books on Demand GmbH, ISBN 3-8311-1475-7, 2001, Seite 444.
- **5.4.2-24** J.W.Price, M.Chang, B.Kerezsi, "Cracking Of Carbon Steel Components Due To Thermal Schock", SIF 2004 "Structural Integrity and Fracture", http://eprint.uq.edu.au/archive/00000836.
- **5.4.2-25** T.Geiger, F.Staub, "Beobachtungen zum Thermoschockverhalten von ferritischen und austenitischen warmfesten Stählen", Allianz "Bruchuntersuchungen und Schadenklärung", 1976, Seite 92-97
- 5.4.2-26 W.Epprecht, B.Walser, "Der Einfluss von langsamen Tempraturwechseln auf das Kriechen von Chrom-Molybdän-Vanadin-Stahlguß", Allianz "Bruchuntersuchungen und Schadenklärung", 1976, Seite 104-109
- **5.4.2-27** R.Niederlein, "Beschleunigung der Festigkeitsberechnungen von Metallträger-Katalysatoren- Untersuchung des Katalysators im Fahrzeugeinsatz", Dissertation an der Universität Karlsruhe (TH), 2005, Seite 1-100.

## 5.4.3 Schwingermüdung im Dauerfestigkeitsbereich (HCF)



# 5.4.3.1 Schwingungsanregung und Schwingbeanspruchung

Von einer **dynamischen Beanspruchung im HCF-Bereich** spricht man, wenn es nach ca. **10<sup>5</sup> Lastwechseln zu Schwinganrissen kommt** (Bild 5.4-1 und Bild 5.4.1.1-2). Bei diesem dynamischen Belastungsniveau erfolgt die Anrissbildung ohne makroskopisch "merkliche" plastische Verformungen.

HCF-Schwingbrüche kommen an einer Vielzahl unterschiedlicher Maschinenelemente vor. Hierzu gehören:

- Wälzlager (Lagerbahnermüdung)
- Beschaufelung in Turbomaschinen
- Bauteile in Motoren wie Pleuel, Kolben, Kolbenbolzen
- Zahnräder
- Schrauben
- Rohrleitungen.

Im Folgenden werden **Bauteile von Gasturbinen beispielhaft für Schwingungen behandelt**. Die beschriebenen Effekte finden sich auch an vergleichbaren Elementen des allgemeinen Maschinenbaus.

Besonders moderne Verkehrsmittel wie Kraftfahrzeuge, Züge und Flugzeuge weisen in ihrer Bauweise viele dünnwandige, leichte, statisch und dynamisch hoch ausgelastete Strukturen auf. Diese unterliegen **hochfrequenten Schwingungserregungen** wie Luft-/ und Gasströmungen, mechanischen Vibrationen sich berührender Bauteile, Unwuchten, Verbrennungsschwingungen und Zahnkräfte aus Getrieben. Eine hohe auslegungsbedingte Auslastung der Festigkeit führt zur entsprechenden Ermüdungsempfindlichkeit. Das gilt besonders, wenn zusätzliche, unerwartet intensive dynamische Beanspruchungen Resonanzen auslösen. Im Fall der Resonanz snd auch kleine Kräfte in der Lagegroße Schwngampltuden mit entsprechend hoher danamischer Belastung hervorzurufen. Fehlt eine nennenswerte Dämpfung werden die Amplituden theoretisch unendlch. Dieser Extremfall kann jedoch bei in der Praxis ausgeschlossen werden weil bei überschreiten der Fließgren-

ze **plastische Verformungen dämpfend** wirken. Im Folgenden soll auf die Möglichkeiten schadensauslösender Schwingungsanregungen besonders betroffener **Bauteile** eingegangen werden (Lit 5.4.3.1-5).

#### Verdichterschaufeln:

Viele Schäden durch Schwingermüdung einseitig eingespannter Träger sind auf **Biegeschwingungen** 1. und 2. Ordnung und die Torsionsschwingung 1. Ordnung (Bild 5.4.3.1-4) zurückzuführen. Eine Tendenz zu dünnen Querschnitten bzw. Profilen mit scharfen Kanten begünstig T-Schwingmoden höherer Ordnung. Es entstehen Schwingrisse an den Ecken und parallel zu Kanten. (Bild 5.4.3.3-10). Der Trend zur **integralen Bauweise begünstigt gekoppelte Schwingungen**. Ein Beispiel sind sog. Blisks (Bild 3-16 und Bild 5.4.3.3-6). Typisch ist das Zusammenwirken von Schaufeln und Scheibe der Rotorstufe einer Turbomaschine. Schwingmoden höherer Ordnung werden wegen der geringen Auslenkung nur wenig vom umgebenden Luftstrom gedämpft. Sie sind nur von Reibungsdämpfung vor Schwingüberlastung "geschützt". Damit werden **integrale Bauweisen** wie **gelötete oder geschweißte Leitapparate** und Blisks besonders schwinganfällig, denn ihnen fehlt konstruktionsbedingt die Reibungsdämpfung (Bild 5.4.3.1-9).

#### Labyrinthe:

Labyrinthe sind schwingungsempfindliche Gebilde. Schwingbrüche werden von Anrissen in Anstreifzonen (Warmrisse) begünstigt.

#### **Rotoren und Wellen:**

Die Erregungsmöglichkeit dieser umlaufenden Systeme sind äußerst vielfältig. Sie beruhen auf mechanischen, aeromechanischen und aerodynamischen Effekten.

**Scheiben:** Schwingungen (Bild 5.4.3.1-6 und Bild 5.4.3.1-9) treten auch mit dem Schaufelkranz gekoppelt auf. Selbst scheinbar massive **Bauteile** (z.B. gegosseneTurbinenräder) können erfahrungsgemäß erstaunlich empfindlich für hochfrequente Schwingungen sein.

# Die Beschaufelung von Verdichter und Turbine kann auf vielfältige Art zu gefährlichen Schwingungen angeregt werden



Bild 5.4.3.1-1: Es handelt sich in der Hauptsache um vier Arten der Schwingungsanregung. Das Erkennen der Anregung und die Art der Schwingung ist eine Voraussetzung für gezielte Abhilfen und aufwändige Verifizierungsversuche an Verdichtern.

**Wirbelschleppenerregung** (Lit 5.4.3.1-5) ist eine Anregung die in einer Strömung häufiger auftritt. **Vor und hinter Störungen** wie von Schaufeln und Streben bildet sich eine Zone niedriger Strömungsgeschwindigkeit. Die hinter den Leitschaufeln entstehende Wirbelschleppe (Nachlaufdelle) verringert in der Störungszone die aerodynamische Kraft auf die dahinter folgenden Laufschaufeln. Vor der Eintrittskante der Leitschaufel steigt der statische Druck an. Laufschaufeln der vorhergehenden Stufen durchlaufen diese Störungszonen. Auch stehende Bauteile (z.B. Leitschaufeln) werden von Strömungsstörungen der benachbarten, vorbeilaufenden Rotorschaufeln getroffen und angeregt. Im ungünstigen Fall fällt diese Impulsfrequenz oder deren Harmonische mit einer Eigenfrequenz der Schaufel zusammen (Resonanzfall, Bild 5.4-4 und Bild 5.4-5.1). Das bedeutet die Gefahr gefährlich hoher Schwingamplituden.

Die Tendenz axiale Abstände der Stufen aus Gründen der Gewichtsminimierung immer

*mehr zu verringern* um den Verdichter zu verkürzen , lässt die Störungen effektiver einwirken.

Flattererregung: Flatterschwingungen (Bild 3-9.2 und Bild 3-9.3) können als Biegeschwingung (Grundbiegeschwingung) und/ oder als Torsionsschwingung auftreten. Es handelt sich um eine Selbsterregung. Sie wird bei aerodynamischer Anregung von Auftrieb und Angriffspunkt der aerodynamischen Kräfte bestimmt. Tritt Flattern auf, ist es schwer, aus diesem Zustand herauszukommen. Schaufelbrüche können innerhalb von Sekunden auftreten.

Flattern kann auch von anderen selbstverstärkenden Einflüssen ausgelöst werden. So können Räder unter Fahrbahnkräften flattern (Bild 3-9.1, Bild 5.4-6 und Bild 5.4-7.2 "F").

Unsystematische Erregungen: Die Erfahrung zeigt, dass in den Schaufelgittern von Verdichtern Biege- und Torsionsschwingungen mit gefährlich hohen schwankenden Amplituden auftreten. Sie sind keiner der angeführten Erregungsarten zuordenbar. Es wird vermutet, dass diese Schwingungen auf sporadische mechanische Anregungen und/oder zufällige Störungen und Wirbel in der Strömung zurückzuführen sind.

Zu solchen Erregungen lassen sich auch Pumpstöße zählen, die mit hochfrequenten Schwingungen zu extremen Auslenkungen der Schaufeln führen können (LCF bei hoher Frequenz).

Ungünstige Einlaufströmung: Ungleichmäßiger Druck, Geschwindigkeit und Temperatur in der Einlaufströmung führen zu sich ändernden aerodynamischen Kräften auf Rotorschaufeln, die diese Zonen durchlaufen.

Bildet sich eine **Bodenvortex**, stört diese massiv beim Eintritt in den Verdichter die Strömung in einem eng begrenzten Bereich. Die Folge ist eine Schwingungsanregung der **vorderen Schaufelstufen** (nicht nur der ersten). Dies tritt auch beim Ansaugen von Heißgasen auf. Das führt zu Temperatur-Ungleichmäßigkeiten in der Einlaufströmung, die im Extremfall gefährliche Schaufelschwingungen auslösen.

Mechanische Anregung: Natürlich können so Schaufeln gefährlich stark angeregt werden. Hierzu gehören mit der Scheibe gekoppelte Schwingungen (Bild 5.4.3.1-9) und Anregungen von Leitschaufeln über das Gehäuse. Dies unterliegt seinerseits hochfrequenten Anregungen der "blade passing frequency" auf Grund der Druckunterschiede zwischen Druck- und Saugseite im Bereich der Schaufelspitze. Diese Schwingungen übertragen sich auf die im Gehäuse befestigten Leitapparate. Befinden sich Schaufeln im Kontakt mit Labyrinthringen (z.B. zur Fixierung), können Schwingungen (Bild 5.4-7.1 "B" und Bild 5.4-7.2 "D") die Beschaufelung anregen.

Eine besondere Anregungsform ist das Anstreifen von Schaufelspitzen. Dabei kann es in kurzer Zeit zu einer Schwingüberlastung kommen (Bild 5.4-7.1 "C"). Um dies zu vermeiden, sind die Anstreifsysteme entsprechend zu optimieren. Typische Einflüsse auf die Schaufelbelastung beim Anstreifen sind:

- Lagerung des Rotors (Anordnung, Art).
- Dämpfung und Steifigkeit des Systems (Rotor, Schaufeln, Gehäuse, Lagerung).
- Schaufelbefestigung im Rotor (integral oder eingesetzt: geklemmt, lose, eingeklebt).
  Schaufelabstützung (z.B. mit oder ohne Deckband, geschlossenes Deckband, verspannte Deckbänder usw.).
- Zustellbewegung (Größe, Geschwindigkeit)
- Kontaktbereiche (Zahl, Länge)
- Spaltausbildung (Symmetrie, Weite, Länge)
- Einlaufverhalten des Tribosystems (Schicht im Gehäuse, Blattspitze).

Extreme Schaufelschwingungen mit Ermüdungsbrüchen können innerhalb von Sekunden als Folgeschäden eintreten. Dies ist z.B. der Fall, wenn sich ein abgebrochenes Schaufelblatt in das Gehäuse legt und von Rotorschaufeln überlaufen wird. Diese erfahren Biegeschwingungen im plastischen Bereich (LCF).

Schwingungen werden nach Möglichkeit bei der Maschinenentwicklung vermieden, aber auch hier gilt "the engine will tell us". Störungen am Umfang 16 14 10 8 2400 f [1/sec] Eigenfrequenz der 2000 Komponente versuchstechnisch ermittelt Frequenz der Komponente 1500 erregende Frequenz "Campbell-Diagramm" 1000 500 Betriebsdrehzahlbereich des Rotors 0 0 50 100 150 200 250 300 Rotorgeschwindigkeit N [U/sec] ig k Resonanzerregung bei N= f/n möglich Bild 5.4.3.1-2

Bild 5.4.3.1-2 (Lit 5.4.3.1-3): Das sogenannte "Campbelldiagramm" ermöglicht es bereits in der Auslegungsphase, aber auch bei der Ursachenermittlung im Schadensfall, Resonanzen an der Beschaufelung von Turbomaschi-

nen zu erkennen und die Quellen der Anregung zu identifizieren (siehe auch Bild 5.4.3.3-2 und Bild 5.4.3.3-3). Im Diagramm ist auf der Abszisse die **Rotorfrequenz** (Hz), entsprechend den Umdrehungen in einer Sekunde, auf der

Ordinate die Eigenfrequenzen der schwingenden Komponente und der Erregungen aufgetragen. Für jede ortsfeste Verteilung der Störung am Umfang lässt sich in diesem Diagramm eine Gerade einzeichnen. Typische Störungen im Gasstrom sind Streben, Leitschaufeln, und Luftentnahmen (Abblasöffnungen). Die Kurve der Eigenfrequenz ist keine horizontale Gerade. Fliehkrafteinfluss und Temperaturabhängigkeit des E-Moduls wirken sich aus. Sie schneidet die Geraden der Erregenden in möglichen Resonanzpunkten im Betriebsdrehzahlbereich (hier einem einzigen, siehe Pfeil). Bei Schadensfällen werden experimentelle Schwingungsanalysen (z.B. Modalanalyse) zur Bestimmung der Eigenfrequenzen/ -schwingungen genutzt. Dabei ist diejenige Schwingungsform (Mode) die wahrscheinlich schadensursächliche, bei der im Anrissbereich des Schadenteils die höchsten Beanspruchungen auftreten würden. Dies ist der Ort mit den höchsten Oberflächendehnungen, d.h. dem kleinsten Krümmungsradius zwischen den Knotenlinien (Bild 5.4-5.2 und Bild 5.4.3.1-5). Messungen mit Dehnungsmessstreifen ermöglichen den Nachweis bzw. eine Bestätigung. Der Einfluss des Betriebs auf die tatsächliche Höhe der entstehenden Belastung wird dann aus Erfahrungswerten abgeschätzt. Natürlich wird man versuchen, die Resonanzmöglichkeiten für wichtige Komponenten konstruktiv außerhalb des Betriebsdrehzahlbereichs des Rotors zu legen. In der Entwicklungsphase einer Turbomaschine wird die Eigenfrequenz der Komponenten so ausgelegt, dass keine gefährliche Resonanz auftritt. Da aber von Start bis Vollast bei der Fülle der strömungsbeeinflussenden Komponenten eine Vermeidung aller potenziellen Resonanzen nicht möglich ist, muss letztendlich der Versuchsbetrieb Klarheit schaffen. "The engine will tell us", wie man im Englischen so schön sagt.

**Bild 5.4.3.1-3:** Eine **niedrige Dämpfung** kann gefährliche Schwingungen und damit Schwingbrüche ermöglichen.

Auch wenn keine gezielten Dämpfungsmaßnahmen (Kapitel 5.4.3.3) vorgesehen sind, wirken auf Bauteile häufig neben der Luftdämpfung weitere schützende Dämpfungen. Meist handelt es sich um Reibungsvorgänge an Kontaktflächen wie Fußbefestigung, und Abstützungen. Doch auch dämpfende Beschichtungen, deren Anwendung eigentlich zu einem anderen Zweck erfolgt (z.B. Erosionsoder Korrosionsschutz), sind nicht zu vergessen. Geht diese häufig unbewusst genutzte Dämpfung verloren, kann es zu Schwingbrüchen kommen. Solche Mechanismen sind:

- Mechanisches Verklemmen von Steckverbindungen.

- Kaltverschweißen ("Fressen", Kapitel 5.9.2) frettingbeanspruchter Auflageflächen.
- Verlöten bzw. Verkleben durch Schmelzen aus Verunreinigungen (Staub; abgelöstes Silber Bild 5.3-8).
- Alterung und/oder Ablösen von Belägen.
- Quellen von Gleitlagerbuchsen aus Kunststoffen.

Die Ursachen sind sehr unterschiedlich. Dazu gehören:

- Konstruktion,
- Montage,
- Reparatur und
- Betrieb.

Fehlt die zum sicheren Betrieb notwendige Dämpfung oder geht diese im Betrieb verloren, erhöht sich die Gefahr von Schwingbrüchen.

Ursachen für ungenügende Dämpfung schwingender Strukturen, insbesonders von Leit- und Laufschaufeln:

- Konstruktion:
- Verklemmen durch ungeeignete Toleranzen,
- Dehnungen (Temperatur, mechanische Belastung),
- Geometrie (z.B. Winkel von Schwalbenschwanzverbindungen, "A").
- Montage:
- Berührungsfreies Positionieren von ("unerkannten") Dämpfungsflächen ("B").
- Verwendung ungeeigneter Hilfsstoffe (z.B. Festsitzen durch Reibrost, "C").
- Reparatur:
- Verwendung von Beschichtungen, die in ihrem Reibverhalten von den Originaloberflächen deutlich abweichen.
- Wartung:
- Verwendung ungeeigneter Hilfsstoffe wie Reinigungsmittel und Schmierstoffe ("C")
- Betrieb:
- Verklemmen durch:
  - ungewöhnliche Dehnungen
  - Korrosion, Oxidation
  - Staubablagerungen ("A", "D")
- Makroskopisches oder mikroskopisches Verschweißen durch Fretting ("D")
- "Verlöten" durch niedrig schmelzende Metalle (z.B. Silber)
- Verlust eines ausreichenden Ölpolsters ("Squeeze-Film") bei gedämpften elastischen Lagerungen



Bild 5.4.3.1-3

Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: HCF mech. Grundlagen



Bild 5.4.3.1-4: Die Grundbiegeschwingung ("A") ist bei einseitig eingespannten Trägern (z.B. Schaufeln ohne Deckband) die häufigste zu Schäden führende Schwingungsform (engl. mode). Ermüdungsrisse befinden sich dann in der Nähe der Einspannung (Fußplattform). Die erste Biege-Oberschwingung ("**B**") verschiebt, je nach Profilierung des Trägers/Blattes, die Lage eines Schwinganrisses weiter zur Blattmitte. Die erste Torsionsschwingmode zeigt "C". Es gibt jedoch auch eine große Zahl von Schwingungsformen höherer Ordnung mit äußerst komplexen Knotenlinienverläufen. Auch sie können zu Schwingbrüchen führen. "D" symbolisiert eine Biegeschwingung um die Hochachse (Hochkantschwingung). Sie belastet besonders die Kanten einer Steckverbindung an der Einspannstelle des Trägers (Schwalbenschwanzfuß). Ein verwundener Träger (Schaufelblatt) erfährt dabei auch eine Querbiegung. Abstützungen der Schaufelblätter über die Spitzen (Deckbänder) und/oder in Blattmitte (engl. clapper, snapper) führen zur Versteifung und so zu einer Erhöhung der Resonanzfrequenzen. Dabei ist von Bedeutung, wie die Kontaktflächen der Deckbänder verlaufen und ob diese gegebenenfalls gegeneinander verspannt sind. Diese Maßnahmen sind erfahrungsgemäß keine Garantie für die Vermeidung gefährlicher Schaufelschwingungen. Lenken z.B. bei einer Biegeschwingung alle Schaufeln im Takt aus ("Ährenfeldschwingung"; "E") ist ein geschlitztes (axial, schräg) Deckband (Skizze "E2" links) offenbar wenig effektiv. In diesem Fall gleiten die Deckbänder bei einer Biegeschwingung wegen dem tordierten Schaufelblatt aneinander vorbei. Eine effektive Abstützung erfolgt nicht. Das gilt ähnlich für eine gekoppelte Schaufel/Scheibe-Schwingung mit einer Spitzenauslenkung überwiegend in Umfangsrichtung ("F"). Dabei gleiten die Anlageflächen der Deckbänder radial. Hier besteht zusätzlich die Gefahr einer Überlappung (engl. "shingling"). Wirksam ist dagegen ein 'Z-Deckband' ("E2" rechts). In diesem Fall behindert die Abstützung der Deckbänder infolge der Drehbewegung eine Biegeschwingung der Schaufeln.

Bei einer "weichen" Abstützung (Deckband) kann sich eine Biegeschwingung höherer Ordnung ausbilden. Die Folge sind Risse am Übergang der Abstützung und/oder in der äußeren Trägerhälfte (Lit. 5.4.3.1-26).

"H" zeigt ein gegossenes Turbinenrad einer kleinen Gasturbine. Trotz etlicher Varianten des angegossenen Deckbandes (ungeschlitzt, geschlitzt in verschiedenen Schaufelabständen) kam es immer wieder zu Schwingbrüchen (HCF) an den Schaufeln. Die Bruchlagen befanden sich sowohl in Kranznähe wie auch in Deckbandnähe.

Bild 5.4.3.1-5: Die höchsten Spannungen treten an einem schwingenden Bauteil im Bereich des Maximums der Schwingungsbäuche auf. Stellt man sich einen Biegestab vor, ist leicht verständlich, dass dessen Biegeradius mit steigender Biegekraft kleiner wird. Die Schwingungsbäuche erfahren eine vergleichbare Auslenkung und sind hoch belastet. Die Knoten bzw. Knotenlinien liegen in Zonen ohne Auslenkung mit geringer Biegebelastung. Eine Ausnahme bildet der einseitig eingespannte Biegeträger (Skizze oben), bei dem in der ruhenden Einspannung die größte Spannungsamplitude und an der am stärksten ausgelenkten Spitze die kleinste Spannung auftritt.

Auch sehr kleine Auslenkungsamplituden können bei Schwingungen hoher Ordnung zu Schwingbrüchen führen. Der einseitig eingespannte Biegeträger ist in der Grundbiegeschwingung ein Sonderfall, hier ist die höchste Beanspruchung am Schwingungsknoten.

Bild 5.4.3.1-5

Je höher die Ordnung der Schwingung, umso schärfer die Krümmung und bei gleicher Amplitude die Beanspruchung am Schwingungsbauch.

Bauch

Knoten

Allgemein kann gesagt werden: Bei gleicher maximaler Auslenkungsamplitude ist die Schwingbelastung eines Bauteils umso höher, je höher die Ordnung der angeregten Eigenschwingung liegt.

So können Spannbolzen bei einer Biegeschwingung hoher Ordnung mit **Frequenzen** bis in den Ultraschallbereich mit minimaler Auslenkung (z.B. Bereich 0,1 mm) Schwingbrüche erleiden (Bild 5.4.3.1-3 "B").

Bild 5.4.3.1-6 (Lit 5.4.3.1-7 und Lit. 5.4.3.1-32): Scheibenförmige Bauteile wie Rotorscheiben und Labyrinthträger von Turbomaschinen oder Radachsen/Radsätze von Zügen können zu sehr unterschiedlichen Schwingformen angeregt werden. Dabei handelt es sich um drei Grundarten:

- Schwingungen mit **Knotendurchmessern** (Fächerschwingungen, "B")

- Schwingungen mit Knotenkreisen (Schirmschwingungen, "A")

- Kombinationen aus Schwingungen mit Knotendurchmessern und Knotenkreisen ("C"). Die hier dargestellten idealen Knotenlinienverläufe werden in realen Bauteilen auf Grund der Querschnittsve+rläufe und geometrischen Besonderheiten zu vieleckähnlichen Gebilden verändert ("B2.2" und "B3.2"). Zu solchen Einflüssen gehören Steifigkeitsänderungen wie ein Wuchtbund (mittlere Skizze unten) oder ein Labyrinthsteg. Dadurch werden auch Lage und Verläufe von Schwinganrissen beeinflusst, die eigentlich im Bereich von Schwingungsbäuchen der unbeeinflussten Schwingung zu erwarten sind.

Amplitude

Unten sind für alle drei Schwingformen Schäden an einstückig gegossenen Turbinenrädern eines Hubschraubertriebwerks dargestellt. Links entsprechend einer 1-Durchmesser-Schwingung (**Fächerschwingung**, "**B1**"). Das Schadensbild in der Mitte entstand als Folge einer 3-Durchmesser-Schwingung (Fächerschwingung "**B3.1**"). Der Schaden rechts dürfte sich einer **Schirmschwingung**, (wahrscheinlich "**A2**") zuordnen lassen. Kombinationen von Schwingformen sind dabei nicht auszuschließen.

Schaufeln die mit der tragenden Scheibe integral verbunden sind, sog. **Blisks** (Bild 5.4.3.3-9), werden nicht wie eingesetzte Schaufeln von der Reibung an den Fußauflagen gedämpft. Deshalb macht sich hier das Problem des **Mistuning**, besonders bemerkbar. Es entsteht durch kleine fertigungsbedingte **Maßabweich**-



**ungen** innerhalb der sonst üblichen zulässigen Toleranzen. Dadurch können einzelne Schaufeln bei **ungünstiger Frequenzkombination mit den Nachbarschaufeln** mehrfach höhere Schwingbelastungen als der Mittelwert der Beschaufelung erfahren. Mistuning als eine Maßnahme der Verstimmung und Vermeidung von Resonanzschwingungen ist deshalb problematisch. Bei **Flatterschwingungen** kann es sich jedoch zur Abhilfe eignen.

Merkmal	erzwungene Schwingung oder Resonanzschwingung	selbsterregte Schwingung oder Instabilitäts-Schwingung	
Abhängigkeit der Schwing- <b>frequenz</b> von der Drehzahl	Die Schwingfrequenz ist gleich (synchron) mit der Drehzahl oder deren ganzzahligen Bruchteilen bzw. Vielfachen (Skizze 1.1/1.2).	Schwingfrequenz ist nahezu konstant und weitgehend unabhängig von der Drehzahl oder einem externen Erreger (Skizze 2.1/2.2).	
Abhängigkeit der Schwing- <b>amplitude</b> von der Drehzahl	Spitze der Amplitude in einem schmalen Drehzahlbereich (kritische Drehzahl), oder deren ganzzahligen Bruchteilen bzw. Vielfachen (Skizze 1.1/1.2).	Die Amplitude steigt beim Erreichen einer Grenzdrehzahl plötzlich an und bleibt dann mit steigender Drehzahl auf hohem oder ansteigendem Niveau (Skizze 2.1/2.2).	
Einfluss der Dämpfung	Zusätzliche Dämpfung kann zwar die Spitzenamplitude (Maximalwert) verkleinern nicht jedoch merklich die Drehzahl, bei der die Spitzenamplitude auftritt (Skizze 1.1/1.2	Zusätzliche Dämpfung kann die Grenz- drehzahl zu höheren Drehzahlen verschieben. Über der Grenzdrehzahl 2). erfolgt keine deutliche Beeinflussung der Amplitude (Skizze 2.1/2.2).	
Rotor- geometrie	Die Stärke der Erregung und damit die Höhe der Schwingamplitude hängen von Ungleich- mäßigkeiten in der Achssymmetrie (Massen- verteilung) oder äußeren Kräften die auf den Rotor wirken ab (z.B. g-Lasten). Die Ampli- tude lässt sich durch geringere Unwuchten verkleinern. Im Resonanzfall gilt dies nicht, weil hier nur die Dämpfung begrenzend wirkt.		
Schwing- frequenz	Die Schwingfrequenz liegt in oder in der Nä der kritischen Drehzahl des Rotors oder dessen Eigenschwingformen.	he Die Schwingfrequenz liegt in oder in der Nähe der kritischen Drehzahl des Rotors oder dessen Eigenschwingformen.	
Vermeidung von Schwing- ungen oder Einführen von Abhilfen	Abstimmung der kritischen Frequenzen aus dem Betriebs-Drehzahlbereich. Reduzierung der Unwuchten aus Fertigung Montage und Betrieb. Dämpfen des Systems um die Spitzen- amplituden beim Durchfahren kritischer Drehzahlen zu begrenzen.	<ul> <li>Betriebsdrehzahlen müssen unterhalb der Grenzdrehzahl liegen.</li> <li>Maßnahmen gegen den Instabilitäts- mechanismus.</li> <li>Dämpfungsmaßnahmen um die Grenz- drehzahl über die Betriebsdrehzahl anzuheben.</li> </ul>	
2 pro Umdr.	1 pro Umdr. 1/2 pro Umdr. kritische Frequenz (kritische Drehzahl)	2 pro Umdr. 1 pro Umdr. 1/2 pro Umdr. kritische Frequenz (kritische Drehzah	
	1.1 g	2.1	
e ultraharmoni- sche oder mehrfach harmonische	Drehzahl     ▷       Synchrone     Subharmonische       Schwingung     Schwingung	Grenzdrehzahl     Drehzahl       höhere Dämpfung führt zu ansteigender Grenzdreh- zahl     hohe Dämpfung — niedrige Dämpfung	
Schwingung			

Bild 5.4.3.1-7 (Lit 5.4.+3.1-16): Werden charakteristische Effekte im Rahmen einer schadensrelevanten Schwingung von Rotoren beobachtet, lassen sich Rückschlüsse auf den Anregungsmechanismus ziehen. Damit sind gezielte Untersuchungen zur Schadensklärung und Abhilfestrategien definierbar.



Bild 5.4.3.1-8.1: Schadensrelevante Kreiselkräfte treten in sehr unterschiedlichen Szenarien auf. Es darf davon ausgegangen werden, dass diese dem unerfahrenen Konstrukteur nicht immer bewusst sind. Hier wurden einige Beispiele zusammengetragen.

Schwungräder werden als hochtourige Energiespeicher (KERS) in Kraftfahrzeugen erprobt ("A", Bild 5.2.2-0). Sie können sich bei Richtungsänderungen, unebener Fahrbahn und Vibrationen schädigend und gefährlich auswirken. Insbesondere muss ein schlechtes

Fahrverhalten vermieden werden (Lit. 5.4.3.1-30). Auch dürfte es erforderlich sein, sie bei der Auslegung der Rotorlagerung zu berücksichtigen.

Radsätze von Hochgeschwindigkeitsbahnen ("**B**", Lit. 5.4.3.1-31). Diese Problematik kann auch stellvertretend für andere Systeme stehen bei denen elastische Auslenkungen durch Schwingungen auf eine Rotorachse wirken. Die Skizze unten rechts ist die stark überhöhte Darstellung der symmetrischen Biegeschwingung eines Radsatzes. Auch wenn das Kippen der Räder und damit der Achse tatsächlich sehr klein ist, dürfte es doch für die Entstehung schädlicher Kreiselkräfte ausreichen. Möglicherweise hat dies einen Einfluss auf den ungleichmäßigen Verschleiß der Radlaufflächen (Polygonalisierung). Dieses Problem ist äußerst gravierend. Ein Zusammenhang mit einem katastrophalen Zugunfall ist zu sehen. Ein weiteres Beispiel ist der Einfluss der Schwingung der Flügel eines Verkehrsflugzeugs auf Triebwerke die in Gondeln mit Pylonen befestigt sind. Deren Rotationsachse wird dabei schnell merklich ausgelenkt. Das beansprucht sowohl die Befestigung als auch die Rotorlagerung und deren Abstützung in den Gehäusen (Festigkeit, Steifigkeit). Diesen Einflüssen ist bei der Auslegung Rechnung zu tragen.

Triebwerke von Kampfflugzeugen: Nicht wie vom Laien wohl vermutet, ist der Kurvenflug aus dem Gesichtspunkt der Kreiselkräfte von entscheidender Relevanz. Hier ist die Auslenkung der Rotorachse des Triebwerks relativ langsam, weil die Physis des Piloten die g-Lasten deutlich begrenzt. Deshalb ist der minimale Kurvenradius mit mehreren 100 Metern immer noch relativ groß. Dabei ist die physische Belastung des Piloten geschwindigkeitsabhängig. Als gefährlich und auslegungsrelevant haben sich extreme Manöver erwiesen. Dazu gehören insbesondere Bewegungen bei denen nahezu im Stillstand ein Abkippen des Flugzeugs in Sekunden erfolgt ("C"). Es entstehen große Kreiselkräfte welche die Struktur des Triebwerks hoch belasten können. Das führt zu elastischen Auslenkungen des Rotors. Diese sind in der Lage **Dichtungsspalte** an Schaufelspitzen und Labyrinthen zu überbrücken. Der Ausrieb beim Anstreifen verschlechtert Triebwerksleistung und Betriebsverhalten bleibend.

Windenergieanlagen Lit. 5.4.3.1-28 und Lit. 5.4.3.1-29): Auch hier lösen Schwingungen auslegungsrelevante Kreiselkräfte am Rotor aus. Dieser dreht zwar relativ langsam, sein polares Trägheitsmoment ist jedoch auf Grund der Größe und der Masse enorm.

- Eine **Biegeschwingung des Turms** lenkt gleichzeitig die Gondel mit einer Nickbewegung vertikal aus.

- **Torsionsschwingungen** des Turms schwenken die Rotorachse horizontal.

Die Kreiselkräfte belasten nicht nur die Lagerung und beanspruchen über elastische Verformungen von Wellen und Gehäusen zusätzlich die Getriebe. Auch die Flügel werden durch die Auslenkkräfte zusätzlich belastet. Diese elastischen Verformungen können auch aerodynamisch relevant werden und die Situation verkomplizieren.



Bild 5.4.3.1-8.2: Kreiselkräfte wirken gewöhnlich einer Auslenkung der Rotationsachse entgegen. Rotoren/Scheiben mit einem großen polaren Trägheitsmoment versteifen sich unter der Kreiselwirkung. Damit erhöhen sich Schwingspannungen im Bereich von Wellenansätzen. So ist es denkbar, dass sich bei gleicher Amplitude die Biegeschwingung einer Welle im Flugbetrieb gefährlicher auswirkt als am Prüfstand. Eine ähnliche Überlastung kann bei einer Auslenkung der Drehachse in einem Flugmanöver auftreten. Die Kreiselkräfte erhöhen dabei die dynamische Belastung am Übergang der Welle zur Scheibe.

Auf einen Schadensmechanismus im Zusammenhang mit Kreiselkräften weist die Rissbildung im Flanschbereich der Turbinenwelle hin (Skizze Mitte links). Man kann den Rastlinien im Labor aufgebrochener Risse entnehmen, dass die **Rissfortschrittsgeschwindigkeit langsamer** wurde (Skizze unten links, siehe auch Bild 4.4-1). Trotz vieler Risse die den tragenden Flanschquerschnitt extrem schwächen, kam es in mehreren Fällen nie zum Bruch des Flanschs. Offenbar konnte ein so geschädigtes Bauteil auch hunderte von Betriebsstunden 'überleben'. In einem solchen Fall liegt die Vermutung nahe, dass infolge der **Rissbildung die Wellenverbindung elastischer** wird. Offenbar baut dann die abnehmende Steifigkeit die Wirkung der Kreiselkräfte ab.





Bild 5.4.3.1-9: Eine beschaufelte Rotorscheibe bildet gewöhnlich ein gekoppeltes Schwingsystem. Dies gilt nicht nur für sog. Blisks, bei denen Schaufeln und Scheibe integral verbunden sind. Auch Scheiben mit eingesetzten Schaufeln verhalten sich vergleichbar. Das ist der Fall, wenn unter den hohen Fliehkräften

bei typischen Betriebsdrehzahlen die Schaufeln sehr fest in der Scheibe sitzen. Die Erregbarkeit zu gefährlichen Schwingungen wird für Blisks, wegen der fehlenden Dämpfung am Schaufelfuß, als besonders bedenklich angesehen. Leider ist bei den typisch hohen Frequenzen gekoppelter Schwingungen die

#### Auslenkung und damit die Luftdämpfung relativ gering.

Scheibenschwingungen sind wegen der Möglichkeit, dass bei Ermüdungsrissen Bruchstücke entstehen, die von den Gehäusen nicht "contained" (siehe auch Bild 5.2.2-0) werden können, besonders gefährlich. Dieses Problem erhält zusätzliche Brisanz in Verdichtern größerer Triebwerke mit der Einführung von Bliskkonstruktionen

#### Anregung über die Beschaufelung:

- Strömungsstörungen (Bild 5.4.3.1-2),

- Anstreifvorgänge (Bild 5.4-6 und Bild 5.4-7.1),
- Fremdkörpereinwirkung (z.B. Vogelschlag),

- Alford-Kraft (Bild 5.4-6).

#### Anregung durch Gaskräfte auf die Scheibe:

Gasschwingungen in Ringkanälen (Lit. 5.4.3.1-32)
Kühlluftzufuhr zum Rotor..

#### Anregung über Labyrinthe:

Labyrinthschwingungen
Gasschwingungen im Labyrinthbereich (Lit. 5.4.3.1-32).
Alford-Kraft.

#### Mechanische Anregungen:

- Vom Wellensystem (Lit. 5.4.3.1-32)

- Von Spannbolzen (Lit. 5.4.3.1-32)
- Zahnkräfte aus einem Getriebe (Lit. 5.4.3.1-
- 32).

# Literatur zu Kapitel 5.4.3.1

- **5.4.3.1-1** P.König, A.Rossmann, "Ratgeber für Gasturbinen-Betreiber", ASUE-Schriftreihe, Vulkan-Verlag Essen ISBN 3-8027-2545-X, 1999.
- **5.4.3.1-2** M.Baumgartner, F. Kameier, J.Hourmouziadis, "Non-Engine Order Vibration in a High Pressure Compressor", Paper des "International Symposium on Air Breathing Engines", ISABE 95-7094, 1994.
- **5.4.3.1-3** B.A. Cowles, "High cycle fatigue in aircraft gas turbines an industry perspective", Zeitschrift "International Journal of Fracture", 80 1996, Seite 147-163.
- **5.4.3.1-4** T. Nicholas, "Critical issues in high cycle fatigue", Zeitschrift "International Journal of Fatigue", 21, 1999 Seite 221-231.
- **5.4.3.1-5** E.K. Armstrong, R.E. Stevenson "Some Practical Aspects of Compressor Blade Vibration", Zeitschrift "Journal of The Royal Aeronautical Society", Volume 64, Nr. 591, March 1960.
- **5.4.3.1-6** D.E. Thomson, J.T. Griffin. "The National Turbine Engine High Cycle Fatigue Program", Zeitschrift "Global Gas Turbine News", Volume 39, No. 11, 1999, Seite 14-17.
- **5.4.3.1-7** E.J. Pohl, R. Bark, "Wege zur Schadensverhütung im Maschinenbau". Allianz Versicherungs-AG., München und Berlin, 1964, Seite 165 168.
- 5.4.3.1-8 N. Klompas, "Limit Cycle Due to Interlocked Shroud Friction: Instrumental to the High-Bypass Turbofan" Proceedings Paper ASME 2000-GT-364 des "International Gas Turbine & Aeroengine Congress" Munich, Germany, May 8-11, 2000. Seite 1-11.
- **5.4.3.1-9** N. Klompas, "Nature of Vibratory Waves in Bladed Disks" Proceedings Paper ASME 2001-GT-0291 der "ASME Turbo Expo 2001" New Orleans, Louisiana, June 4-71, 2001. Seite 1-9.
- **5.4.3.1-10** UK Air Accidents Investigation Branch, "Aircraft Accident Report No:4/90 (EW/ C1095". Flugunfall Jan 1989.
- **5.4.3.1-11** D.R. Abbott, "Advances in Labyrinth Seal Aeroelastic Instability Prediction & Prevention". Proceedings Paper ASME 80-GT-151 der "Gas Turbine Conference & Products Show", New Orleans, La., March 10-13, 1980. Seite 1-6.
- 5.4.3.1-12 M.P. Boyce, "Gas Turbine Engineering Handbook". Gulf Publishing Company.

- **5.4.3.1-13** J.S. Alford, "Nature, Causes, and Prevention of Labyrinth Air Seal Fractures". Zeitschrift "J. Aircraft", Vol 12, No. 4, April 1975, Seite 313-318.
- **5.4.3.1-14** J.S. Alford, "Labyrinth Seal Designs Have Benefitted from Development and Service Experience". Proceedings Paper ASE 710435 des "National Air Transportation Meeting", Atlanta, Ga., May 10-13, 1971, Seite 1-10.
- **5.4.3.1-15** N. Klompas, "Significance of Disk Flexing in Viscous-Damped Jet Engine Dynamics" Proceedings Paper ASME 76-GT-107 der "Gas Turbine Conference" London, England, April 9-13, 1978, und Zeitschrift "Journal of Engineering for Power", October 1978, Vol 100, Seite 647-653.
- **5.4.3.1-16** F.F. Ehrich, "Identification and Avoidance of Instabilities and Self-Excited Vibrations in Rotating Machinery". Proceedings Paper ASME 72-DE-21 der "Design Engineering Conference & Show", Chicago, Ill., , May 8-11, 1972, Seite 1-8.
- **5.4.3.1-17** J. Weber, H. Beckert, "Querkräfte aus Spaltdichtungen eine mögliche Ursache für die Laufunruhe von Turbomaschinen". Zeitschrift "Atomkernenergie (ATKE)" Band 32, 1978, Lfg.4, Seite 239-246.
- **5.4.3.1-18** F.F. Ehrich, "Shaft Whirl Induced by Rotor Internal Damping". Zeitschrift "Journal of Applied Mechanics / Transactions of the ASME", (ASME Paper No. 64-APM-7), June 1964, Seite 279-282.
- **5.4.3.1-19** J.S. Alford, "Protecting Turbomachinery From Self-Excited Rotor Whirl". Zeitschrift "Journal of Engineering for Power / Transactions of ASME", (ASME Paper No. 64-WA/GTP-4), October 1965, Seite 333-339.
- **5.4.3.1-19** M.v. Ardenne, G. Musiol, S. Reball, "Effekte der Physik und ihre Anwendungen". Verlag Harri Deutsch, 2. ergänzte Auflage, Seite 463.
- **5.4.3.1-20** A. Muszynskal, "Characterization of Rub Phenomena in Rotating Machinery". N87-16252, Seite 1-5.
- **5.4.3.1-21** J. Padovan, F.K. Choy, "Nonlinear Dynamics of Rotor/Blade/Casing Rub Interactions" Proceedings Paper ASME 86-DE-6 der "Spring Natl. Design-Engineering Conf.and Show" Chicago, Ill., March 24-27, 1986 Seite1-8.
- 5.4.3.1-22 J.T. Akin, V.S. Fehr, D.L. Evans, "Analysis and Solution of the Rotor Instability Problem in the Advanced Model TF30 P111+ Engine" Proceedings Paper AIAA-88-3166 der "24th Joint Propulsion Conference" Boston, Mass., July 11-13, 1988 Seite 1-9.

- **5.4.3.1-23** J.S. Alford, "Protection of Labyrinth Seals From Flexural Vibration", ASME Proceedings Paper No. 63-AHGT-9 der "Aviation and Space, Hydraulic, and Gas Turbine Conference and Products Show", Los Angeles, Calif.,March 3-7, 1962 und Zeitschrift "Journal of Engineering for Power" April 1964, Seite 141-148.
- **5.4.3.1-24** J.S. Alford, "Protecting Turbomachinery From Unstable and Oscillating Flows" ASME Proceedings Paper No.66-WA/GT-13 des "Winter Annual Meeting", New York, N.Y.,Nov 27- Dec. 1, 1966 und Zeitschrift "Journal of Engineering for Power"October 1957, Seite 1513-520.
- **5.4.3.1-25** S. Radhakrishnan, C.G. Raghuram, R.V. Krishnan, V. Ramachandran, "Fatigue Failure of Titan Alloy Compressor Blades, ASM, "Handbook of Case Histories in Failure Analysis, Volume 2", Seite 299 und 300.
- 5.4.3.1-26 W. Traupel, "Thermische Turbomaschinen" 2. Band, 1960, Seite 321.
- **5.4.3.1-27** G. Kahl, "Aeroelastic Effects of Mistuning and Coupling in Turbomachinery Bladings", Promotionsarbeit an der "Ecole Polytechnique Federale de Lausanne", These No 2629 (2002) Seite 11 21.
- **5.4.3.1-28** "Grundlagen der Windenergienutzung", www.ieh.Kitredu/nrd/wka/Windkraftanlagen, Seite 85-109.
- **5.4.3.1-29** M.Prkun, "Erneuerbare Energien Gesamtüberblick über den technologischen Entwicklungsstand und das technische Gefährdungspotenzial III. Windkraft", Abschlussbericht der Projektgruppe "Erneuerbare Energien", www.gdv.de, (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtshaft e.V., März 2005Seite 1.83.
- **5.4.3.1-30** D.Dilba, "Geborgter Schwung", Zeitschrift "Technology Review", 19.03.2009, Seite 1-5, www.heise.de/tr/artikel/Geborgter-Schwung-276231.html.
- **5.4.3.1-31** A.Volle, "Integration eines Rad-Schiene-Kontaktmoduls in die Simulations-Umgebung NEWSIM", Diplomarbeit DIPL-67, Universität Stuttgart, Institut B für Mechanik, Juli 1997, Seite 1-25.
- **5.4.3.1-32** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken", Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 5.4.3.3, Kapitel 12.6.3.1 und Kapitel 12.6.3.3.

### 5.4.3.2 Werkstoffeinfluss auf das HCF-Verhalten.

Die Steifigkeit in Abhängigkeit von der Kristallorientierung ist bei Einkristallen für die Auslegung bedeutsam.



Unter **HCF-Belastung** wird eine dynamische Belastung verstanden (Zeitfestigkeit, Bild 5.4-1), die über ca. 10<sup>5</sup> Lastwechseln, oft bis in die Nähe der Dauerfestigkeit (um 10<sup>6</sup> Lastwechsel) zur Makro-Schwingrissbildung führt. Makroskopische plastische Verformungen sind im Anrissbereich nicht erkennbar. Bei gleicher Spannungskonzentration gilt das auch für den Rissfortschritt (Bild 4.3-3 und Bild 4.3-6.2). Die relativ große Anriss-Lastwechselzahl setzt gewöhnlich eine hochfrequente Schwingung wie die Resonanzschwingung einer Schaufel voraus, damit in typischen Betriebszeiten ein Schwingbruch entsteht. Trotzdem sei darauf hingewiesen, dass auch niederfrequente Zyklen wie Start-Abstell-Vorgänge über lange Zeiträume für eine HCF-Ermüdung ausreichende Lastwechselzahlen akkumulieren können. Die hohe Frequenz ist also nicht das Kriterium für eine HCF-Belastung, sondern einzig die hohe Lastwechselzahl bis zur Anrissbildung.

Bruchflächen von Rissen unter HCF-Beanspruchung können **typische Merkmale** aufweisen an denen sie **identifizierbar** sind (Bild 4.4-3). Häufig sind im Anrissbereich als Folge von **Nebenrissen Stufen** zu erkennen (Bild 4.4-2). **Rastlinien** sind ein weiteres augenfälliges Merkmal. Sie ermöglichen Rückschlüsse auf Art und Höhe der Beanspruchung (Bild 4.4-6.1). Zu werkstoffabhängigen Besonderheiten gehört die ausgeprägte "**Stadium 1-Phase**" (Bild 4.3-6.1) austenitischer Legierungen.

Die Dauerfestigkeit eines Werkstoffs ist entscheidend von **werkstoffspezifischen Eigenschaften** wie statischer Festigkeit (Härte), Steifigkeit (E-Modul, Schubmodul), Gefüge (z.B. Korngröße, Kornorientierung), Oberflächenzustand (Verfestigung, Eigenspannungen, Rauigkeit) und Schwachstellen (z.B. Porosität bei Guss, Seigerungen, Einschlüsse) abhängig. Bei gerichtet erstarrten oder einkristallinen Werkstoffen beeinflusst die Kristallorientierung die Steifigkeit und damit Eigenfrequenzen und Resonanzen (Bild 5.4.3.2-1). Aus den genannten Gründen ist die richtige **bauteilrelevante Auswahl der Proben für die Ermittlung von Auslegungsdaten** von großer Bedeutung (Bild 5.4.3.2-2 und Bild 5.4.3.2-3). **Oberflächen-Bearbeitungsverfahren** (Bild 5.4.3.2-5 und 5.4.3.2-6) und deren Parameter sind für dynamisch beanspruchte Bauteile von großer Wichtigkeit. Sie müssen strikt in den vorgegebenen Grenzen eingehalten werden.

Lebensdauerabschätzungen von Bauteilen mit Beanspruchungen im HCF-Bereich sind äußerst problematisch. Gewöhnlich ist zu gewährleisten, dass die auftretenden dynamischen Beanspruchungen unterhalb der Dauerfestigkeit oder eines Festigkeitswerts für ausreichend viele Lastwechsel liegt. Deshalb sind Resonanzfälle oder längeres Verweilen in Resonanzen nicht erlaubt. Werden Resonanzen durchfahren, darf die Schadensakkumulation (Bild 5.4.3.2-12) mit ausreichender Sicherheit nicht zum Ermüdungsanriss führen.

Bild 5.4.3.2-1: Technische Einkristalle des Maschinenbaus kommen vorzugsweise in Turbinenschaufeln zur Anwendung. Sie unterscheiden sich deutlich von den hochreinen Versionen ohne Gitterfehler der elektronischen Bauteile. Ein technischer Einkristall hat durchaus Inhomogenitäten, Gitterfehler und Verzerrungen und auch gussbedingte kleine Schwachstellen. Inhomogenitäten (z.B. Aushärtungsphasen) und Gitterfehler (z.B. Karbide) sind sogar eine Voraussetzung für die hohe Warmfestigkeit.

Zum Verständnis soll das folgende **Modell** dienen (Rahmen oben). Es ist richtig, dass auch der technische Einkristall, d.h. das gesamte, durchaus komplex geformte Bauteil aus einem durchgehenden Metallgitter besteht. Das kann man sich wie bei einem orientalischen geknüpften Teppich oder einem Gobelin vorstellen. Hier bilden die Kettfäden ein zweidimensionales Grundgerüst. Das Muster ist mit bunten Fäden eingeknüpft oder mit Schussfäden eingebracht. Selbst der elastische Verformungswiderstand ist in verschiedenen Richtungen ähnlich einem Einkristall unterschiedlich.

Wichtig ist, dass die **Steifigkeit** (E-Modul) metallischer Einkristalle in den unterschiedlichen **Kristallrichtungen** sich deutlich unterscheiden kann. Davon sind die **Eigenfrequenzen** der Bauteile abhängig. Niedrigere Steifigkeit bedeutet niedrigere Eigenfrequenz. Mit einer gezielten Orientierung der Einkristalle in einer Turbinenschaufel lässt sich also deren **Eigenfrequenz** beeinflussen. So kann es gelingen, gefährliche **Resonanzen zu vermeiden**. Die Darstellungen zeigen ein räumliches Modell der Richtungsabhängigkeit von Elastizitätsmodul (=E-Modul, Skizze links) und Gleitmodul (=G-Modul, Schubmodul) des Einkristalls eines typischen Ni-Basis-Werkstoffs. Der E-Modul beeinflusst Biegeschwingungen, der G-Modul Torsionsschwingungen.

Werden vielkristalline Turbinenschaufeln mit Tannenbaumfüßen gegen EK-Schaufeln ausgetauscht (z.B. bei einer Nachrüstung), besteht bei Steifigkeitsabweichungen die Gefahr einer unerwünschten Belastungsverteilung in den Tannenbaumzähnen. Das verringert die LCF-Lebensdauer.

Unter optimierten Erstarrungsbedingungen (geringe Porenbildung) ist die Schwingfestigkeit einkristalliner Werkstoffe besser als die von vielkristallinen (Lit 5.4.3.2-2). Dies wird auf besser kontrollierte Erstarrungsbedingungen mit kleineren wachstumsfähigen Defekten zurückgeführt.

Technische Einkristalle sind nicht mit den hochreinen, von Gitterfehlern freien Einkristallen der Elektronik zu verwechseln. Sie bieten aber dem Konstrukteur in richtungsabhängiger Festigkeit und Steifigkeit interessante Möglichkeiten.

In dieses, einem Teppich vergleichbaren Grundgewebe, das der Kristallstruktur des technischen Einkristalls entspricht, sind die vielfarbigen Muster aus unterschiedlichen Fasern eingewebt. Sie entsprechen den Legierungselementen. Ein technischer Einkristall zeigt im angeätzten Zustand durchaus eine feine komplexe Struktur.

Ein Einkristall verhält sich in seinen Festigkeitseigenschaften richtungsabhängig sehr unterschiedlich. Für den E-Modul kann dies zur Verstimmung eines in der Resonanz schwingenden Systems nutzen.







Bild 5.4.3.2-2: Im Falle von Problemen oder Schäden an Bauteilen sollte man immer auch die Möglichkeit eines schadensbegünstigenden Einflusses nicht bauteilrelevanter Werkstoff-Auslegungsdaten erwägen. Im Fall eines Turbinenrades ist das hoch LCF-beanspruchte Bauteilvolumen im Nabenbereich deutlich größer als das üblicher LCF-Proben. Größere Querschnitte bedeuten in Gussteilen gewöhnlich, auf Grund langsamerer Abkühlgeschwindigkeit beim Erstarren, auch größere Körner und mehr fehlende Restschmelze. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit und Größe von Lunkern (Bild 5.4.3.2-8 und Bild 5.4.3.2-9). Damit wird die dynamische Festigkeit in der Tendenz, im Vergleich zu dünneren Querschnitten separat gegossener Proben, herabgesetzt.

Bei Schmiedewerkstoffen führen dicke Querschnitte im Inneren zu weniger gut verformten Zonen. Die Gefügeausbildung kann sich auf Grund einer langsameren Temperaturänderung bei der Wärmebehandlung verschlechtern. So verbleiben z.B. größere werkstofftypische Schwachstellen wie Seigerungen mit ungünstiger Orientierung zur Hauptbeanspruchung im Bauteil. Grundsätzlich steigt mit größerem belasteten Volumen und/oder größerer belasteter Oberfläche die Wahrscheinlichkeit festigkeitsmindernder Fehlstellen und damit schlechterer dynamischer Festigkeiten. Ein ähnlicher Effekt findet sich auch bei der Bruchfestigkeit spröder Werkstoffe (Bild 5.2.1-9 und Bild 5.2.1-10).

Selbst wenn es sich um separat gegossene (geschmiedete) Proben handelt (Bild 5.4.3.2-3), sollten diese aus der Charge des zu beurteilenden Bauteils stammen. Z.B. Proben und Turbinenschaufeln aus der gleichen Traube. Am besten werden **Proben mit dem Bauteil gefertigt**. Das gilt besonders für zu überprüfende Einflüsse wie Beschichtungen oder Kugelstrahlen.

So lässt sich das Problem nicht repräsentativer Gefüge und Fehlstellen mit der **Entnahme der Probe** in der auslegungsrelevanten Bauteilzone (integrale Probe) reduzieren. Die **Probenbearbeitung** ist eine Frage der Auslegungsphilosophie (Bild 5.4.3.2-5). Es ist nicht einfach eine Probe herzustellen, deren Oberfläche ausreichend der kritischen Bauteilzone entspricht. Man kann aber auch von einer "idealen" (z.B. poliert, ohne nennenswerte Verfestigungen und Eigenspannungen) Probenoberfläche ausgehen. So ermittelte Werte bzw. die damit bestimmte Lebensdauer müssen dann entsprechend dem Unterschied zur realen Baueiloberfläche korrigiert werden. Das gilt insbesondere für Mindestwerte der Auslegung. Solche aus "idealen" Proben müssen entsprechende Korrekturen enthalten.

Die Wahl der zu spezifizierenden **Probenform** beeinflusst ebenfalls das Ergebnis. Ein unterschiedliches Prüflängen/Durchmesser-Verhältnis führt beim Zugversuch zu verschiedenen relativen Bruchdehnungen ( $A = \Delta l/l_0$ ). Ein großer plastischer Anteil der Bruchdehnung " $\Delta l$ " verändert sich dabei nur unwesentlich mit der Prüflänge " $l_0$ ". Aus diesem Grund sind Normproben und möglichst keine Sonderformen zu verwenden.

Eine Änderung der Belastungsanordnung und damit auch der Probenformen führt zu noch größeren Unsicherheiten ihrer Gültigkeit für das Bauteilverhalten. Typisch ist eine große Abweichung des Prüfvolumens und/oder der **Prüfoberfläche** bei Biegeproben gegenüber Zugproben bei spröden Werkstoffen wie **Keramik** und **Glas** (Bild 5.2.1-9 und Bild 5.2.1-10). Umgekehrt lassen sich durch geeignete Prüfkörperauswahl, z.B. mit bauteilähnlich belastetem **Volumen** (z.B. geeignet geformte Schleuderscheiben für PM-Werkstoffe) Unsicherheiten minimieren.

Bild 5.4.3.2-3: Die bauteilrelevante Ermittlung von Schwingfestigkeitswerten und/oder die Übertragung von Probendaten auf das Bauteil (siehe Bild 5.4.3.2-8) kann sich schwierig gestalten. Betrachtet man als Beispiel eine Verdichterrotorschaufel, so stellt sich die Frage, welche Schwingfestigkeit unter welchen Einflüssen zu ermitteln ist. Es ist auch eine Frage der "Auslegungsphilosophie" ob die Proben für die Ermittlung der Werkstoffdaten in Spezifikationen für die Bauteilauslegung möglichst bauteiltypische Oberflächen aufweisen müssen oder ob vergleichbare Standardoberflächen mit möglichst geringen Herstellungseinflüssen (Oberfläche in poliertem Zustand) zu verwenden sind (Bild 5.4.3.2-5).

Beispiele für Einflüsse auf die Schwingfestigkeit eines Bauteils im Unterschied zur Probe:

- Bauteiltypische Bearbeitungsoberfläche (z.B. Riefen, Verfestigungen; Eigenspannungen, Bild 5.2.1-2),
- Betriebseinflüsse (z.B. Fretting, Kapitel 5.9.3; Oxidation),
- Gefügebesonderheiten kritischer Zonen (z.B. vom Schmieden, Gießen, Wärmebehandlung),
- Dicke der Querschnitte (Bild 4.3-19).

Geht man davon aus, dass möglichst allgemeingültige Werte zu ermitteln sind, sollte man sich über mögliche Abweichungen zu den Bauteilen im Klaren sein.

Eine besondere Rolle spielen bearbeitungsbedingte Unterschiede zwischen der Probenoberfäche und der Oberfläche des Bauteils (Buld 5.4.3.2-6 und Bild 5.4.3.2-8). Oft ist es nicht möglich, an den üblichen dünnen Rundproben dem Bauteil vergleichbare Zerspanungsbedingungen anzuwenden. Typische Unterschiede sind:

- Relativ große elastische Auslenkung der dünnen Probe unter den Zerspanungskräften. Dies hat Effekte wie ein **Schwingen der Probe wäh**rend der Zerspanung zur Folge. So können sich z.B. schädigende **Rattermarken** bilden.

- Keine vergleichbar hohe Zerspanungsgeschwindigkeit an der Probe.

- Schnelle Aufheizung des kleinen Probenvolumens.

- Starke Krümmung der Bearbeitungsfläche des zylindrischen Probenschafts.

Als Beispiel soll eine üblicherweise dynamisch hochbelastete Verdichterrotorschaufel dienen. Für Biegeschwingungen liegt die kritische Zone (Skizze oben rechts) im Bereich der Einspannung. Hier befindet sich der Übergangsradius zur Fußplattform. An den überaus dünnen Kanten, insbesondere der Schaufeln hinterer Stufen, kann die **Korngröße** bereits die **Querschnittsdicke** erreichen. Schwingbeanspruchtes Volumen und Oberfläche sind im Vergleich zu den Proben klein (Skizze oben links). Umgekehrtes gilt für die Korngröße.

Spannungsgradienten unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Querschnitt bei gleichem Spannungsausschlag an der Oberfläche (Skizze unten links). Damit beeinflussen Oberflächenbesonderheiten wie Schwachstellen und Eigenspannungen die Schwingfestigkeit querschnittsabhängig (Bild 4.3-19).

In der Tabelle wurden die Einflüsse auf Gund der genannten Unterschiede zwischen Probe und Bauteil qualitativ bewertet.

Schwingfestigkeiten die an Proben ermittelt wurden können sich erheblich von der nutzbaren Schwingfestigkeit an Bauteilen unterscheiden. die Querschnittsbreite des Blattprofils entspricht etwa einem Korn bei der Grundbiegeschwingung hochbelastetes Volumen



typische Proben zur Ermittlung der Schwingfestigkeit

Einflussgröße	Probe	Schaufel	Einfluß auf $\sigma_D$		
Prüfvolumen	groß	klein	σDP <σDS		
Spannungs- gradient	klein	groß	$\sigma DP < \sigma DS$		
Querschnitt	dick	dünn	σ DP ≥σ DS bei deutlichem Korngrößeneinfluss		
Oberflächen- zustand	besser		σDP >σDS		
σ DP = Dauerfestigkeit der Probe					

Bild 5.4.3.2-3

 $\sigma$  DS = Dauerfestigkeit der Schaufel



Haigh-Diagramm für glatte und gekerbte Proben einer Co-Legierung, mit einer Lebensdauer von 2 x  $10^7$  LW bzw. 100 h



Bild 5.4.3.2-4 (Lit 5.4.3.2-4): In diesem Schwingfestigkeitsdiagramm nach Haigh ist für eine Kobalt-Basis-Legierung der ertragbare Spannungsausschlag über der Mittelspannung für eine Lebensdauer von 100 Stunden bzw. ca. 10<sup>7</sup> Lastwechsel aufgetragen (zur Erklärung der Bezeichnungen siehe Bild 5.4-11). Die Zeitbegrenzung ist notwendig, um das Kriechen des Werkstoffs während der dynamischen Belastung zu berücksichtigen. Die Schwingfestigkeit der Werkstoffe ist natürlich temperaturabhängig. Sie ist jedoch nicht immer direkt von der Warmfestigkeit abhängig. Bei hohen Temperaturen ist die ertragbare Kerbspannung "A1" mit 3,4 zu multiplizieren. Sie ist damit deutlich höher als die zugehörige Nennspannung glatter Proben ("A2"). Das heißt der Kerbeinfluss lässt bei hohen Temperaturen nach. Dies ist eine wichtige Erkenntnis für die Akzeptanz größerer Fehlstellen bei

höheren Temperaturen als bei niedrigen im Fall einer dynamischen Belastung. Ein Beispiel sind Poren und kleine Risse in Feingussteilen (Bild 5.4.3.2-8 und Bild 5.4.3.2-9). Auch die Mittelspannungsabhängigkeit der gekerbten Probe ("**B1**") ist geringer (horizontaler Kurvenverlauf) als die der glatten Probe ("B2"). Diese Effekte dürften mit Kriechverformungen im Kerb und der damit verstärkten Stützwirkung (Bild 5.4.3.2-8) zusammenhängen. Weniger hoch beanspruchte benachbarte Bereiche entlasten so eine Kerbe, indem sich der Kerbgrund plastisch verformt. Weiter ist interessant, dass glatte Proben Belastungsbereiche zeigen (z.B. graue Zone, "C"), in denen bei steigender Mittelspannung der ertragbare Spannungsausschlag sogar ansteigt. Auch dieser Effekt dürfte auf Kriechverformungen zurückzuführen sein.



Bild 5.4.3.2-5 (Lit 5.4.3.2-11): Dieses Diagramm soll den Einfluss der Bearbeitung auf die zu erwartenden Schwingfestigkeiten (Biegewechsel) beispielhaft darstellen. In Abhängigkeit von der Zugfestigkeit (niedrig legierter Stahl) ist der Einfluss der Bearbeitungsverfahren sowohl absolut als auch relativ gravierend und unterschiedlich (siehe auch Bild 5.4.3.2-6). Außer bei den polierten Proben nimmt die Biegewechselfestigkeit für Werkstoffe oberhalb einer bestimmten Zugfestigkeit/ Härte ab. Die polierte, hier unverfestigte Oberfläche ergibt in diesem Beispiel die höchsten Schwingfestigkeitswerte. Geschliffene Oberflächen liegen vergleichsweise am besten. Dies widerspricht der praktischen Erfahrung (Bild 5.4.3.2-6). Offenbar gelang der Schleifprozess ohne Induzierung von Zugspannungen oder eines ungünstigen Gefüges (z.B. Härteabfall). Darauf, dass dies nicht eintritt, kann man sich

jedoch erfahrungsgemäß in der Praxis nicht verlassen. **Spanend bearbeitete Proben** liegen bereits deutlich schlechter. Anscheinend entstand keine Verfestigung und/oder eine Induzierung von Druckspannungen. Anzunehmen ist, dass warmgewalzte oder geschmiedete Oberflächen größere Fehlstellen (z.B. Härteabfall durch Entkohlung, Narben/Kerben) aufweisen. Sie setzten die Schwingfestigkeit deutlich herab. Für die Bauteilrelevanz der Proben ist die Vergleichbarkeit des Oberflächenzustands geschmiedeter oder gegossener Oberflächen besonders wichtig.

**Bild 5.4.3.2-6** (Lit.5.4.3.2-10): Damit Schwingbrüche entstehen, bedarf es einer dynamischen Beanspruchung oberhalb der **Schwingfestigkeit**. Je niedriger die Schwingfestigkeit, umso niedriger muss verständlicherweise die Schwingbeanspruchung sein, um nicht gefährlich zu werden.

Die Oberflächenbearbeitungsverfahren haben einen großen Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Der Schluss von der Probe auf das Bauteil muss gewährleistet sein.



Bei hochfrequenten Schwingungen handelt es sich überwiegend um **Biegeschwingungen**. Deshalb kommt der Festigkeit an der höher beanspruchten Bauteiloberfläche (Bild 4.3-19 und Bild 5.4.3.2-3) eine besondere Bedeutung zu. Die Tabelle zeigt anhand je eines Vertreters von Schmiedewerkstoffen für **Titan- und Nickellegierungen** typische Bearbeitungseinflüsse auf die Biegewechselfestigkeit.

Man erkennt bei beiden Werkstoffen, insbesondere bei Raumtemperatur, den gravierend schädigenden Einfluss des Schleifprozesses. Dies gilt besonders bei Titanlegierungen auch für Längsbearbeitung. Die Schwingfestigkeit einer Ni-Legierung ist bei der Prüftemperatur von 540°C deutlich höher als bei Raumtemperatur. Dieser Effekt könnte auf einen Abbau schädigender Zugeigenspannungen (Relaxieren) in der Schleiffläche und die Entschärfung der Kerbwirkung von Schleifriefen durch Kriechen hindeuten (Bild 4.5.1-3). So zeigt sich welche besondere Vorsicht für ein Egalisieren von FOD-Kerben mit einem Schleifverfahren im eingebauten Zustand (Ausblenden) walten muss. Eine verfestigende Nacharbeit dürfte in einem solchen Fall, falls machbar, unbedingt angeraten sein. Ist dies mit normalen Strahlverfahren nicht möglich, kann hier eine Chance im sogenannten "Laser Peening" Verfahren liegen. Es kommt im Gegensatz zum Kugelstrahlen ohne Partikel aus. Eine elektrochemische Bearbeitung zeigt bei Titanlegierungen auch im Vergleich zu mechanisch gefrästen Oberflächen Vorteile. Das dürfte sich aus der geringen Neigung von Titanlegierungen zur Kaltverfestigung erklären. So lässt sich ein günstiger Einfluss der *Zerspanung (Verfestigung, Druckspannungen)* nur eingeschränkt nutzen.

Nicht nachbearbeitete **funkenerosiv** (EDM) hergestellte Oberflächen der **Nickellegierung** zeigen nahezu unabhängig von der Bearbei-

tungsintensität erwartungsgemäß niedrige Schwingfestigkeiten (**spröder** "**recast layer**" mit hohen Zugeigenspannungen), die jedoch immer noch über denen der normal und grob bearbeiteten Schleifflächen liegen. Erstaunlich sind die sehr hohen Schwingfestigkeiten bei Raumtemperatur, nachdem die EDM-Flächen kugelgestrahlt wurden. Diese Werte fallen bei 540 °C deutlich ab, was mit einer Abnahme des Kugelstrahleffekts durch Kriechen (Relaxation, Bild 5.3.2-1) zusammenhängen dürfte.

Bild 5.4.3.2-7 (Lit. 5.4.3.2-13): Es lässt sich zeigen, dass für einen einseitig eingespannten prismatischen Stab im Falle der Grundbiegeschwingung die höchste Spannung  $\sigma_{_{bmax}}$  an der Einspannstelle dem Produkt aus Amplitude "a" und der Eigenfrequenz "f" proportional ist. In der Praxis hat sich die Angabe der Schwingfestigkeit in Form des sog. "axf-Werts" bewährt (Skizze oben). Bei der Amplitude "a" wird die Dauerfestigkeit erreicht. Einseitig eingespannte Schaufeln ohne abstützendes Deckband sind dem entsprechenden Biegeträger ausreichend ähnlich. Der "axf-Wert" ist also unter dieser Voraussetzung ein Werkstoffkennwert für die Schwingfestigkeit von Schaufeln. Dies bestätigt die Erfahrung in der Praxis.

Die Dauerfestigkeit von Schaufeln kann merklich von der üblicher Rundproben des gleichen Werkstoffs abweichen. Dieses Verhalten lässt sich durch herstellungsbedingte Oberflächen- und Gefügebesonderheiten erklären. Deshalb muss zur Qualitätssicherung die Dauerfestigkeit an repräsentativen Originalbauteilen ermittelt werden. Für die Auslegung von Schaufeln hat ein OEM Erfahrungswerte. Damit lässt sich eine ausreichende Betriebssicherheit gewährleisten. Auch die Qualitätssicherung wird mit Schwingversuchen an statistisch den Herstellungslosen entnommenen Schaufeln durchgeführt. Dabei muss ein Mindest-axf-Wert erreicht werden. In der Tabelle rechts oben sind typische "axf-Werte" für "Werkstofffamilien" angegeben. Man erkennt, dass der Wert für Schaufeln aus Titanlegierungen sehr hoch liegt. Dies unterstreicht deren vorteilhafte Anwendung.

Die Ermittlung der "axf-Werte" erfolgt häufig in **Stufenversuchen** (Bild 5.4-3). Man beginnt mit Spannungsamplituden deutlich unterhalb der normalerweise zu erwartenden Dauerfestigkeit. Einen "Durchläufer (>10<sup>7</sup> Lastwechsel ohne erkennbare Schädigungsanzeichen, Bild 5.4-2) setzt man hoch. Die Spannungsamplitude wird angehoben. Diese Vorgehensweise ist nicht ohne Probleme, wie die Diagramme unten zeigen sollen:

In den Wöhlerdiagrammen wird der Hochtrainiereffekt und der Schädigungseffekt dargestellt. Zur Erklärung der Mechanismen im Gefügebereich siehe Bild 5.4-2 (Lit 5.4.3.2-3). Hochtrainieren (mittleres Diagramm): Man beginnt in Mehrstufenversuchen mit Beanspruchungen unterhalb der Dauerfestigkeit. Nachdem jeweils einige Millionen Lastspiele durchgelaufen sind kann man beobachten, dass solche Proben auch Schwingbeanspruchungen oberhalb der Dauerfestigkeit mehr als 10<sup>7</sup> Lastwechsel ertragen. Dieser Effekt ist weit im Kurzzeitbereich weniger ausgeprägt. Das lässt sich in der 'Prüfstrategie' berücksichtigen. Der Hochtrainiereffekt tritt an Stählen mittlerer Festigkeit ausgeprägt auf und kann die Dauerfestigkeit bis zu 30% anheben.

Schädigung (unteres Diagramm) kann ebenfalls im Mehrstufenversuch auftreten. Das ist der Fall, wenn die Schwingbelastungsstufe oberhalb der Dauerfestigkeit angesetzt wird. Dann wird der Versuch vor einem Anriss, d.h. nach geringer Lastwechselzahl abgebrochen. Anschließend kann diese Probe bei einer Belastung unter der Dauerfestigkeit brechen. Sie wurde also von der höheren Laststufe geschädigt. Die Schädigung hängt von der Höhe und Anzahl der vorhergehenden Lastwechsel ab (siehe Schadensakkumulation Bild 5.4.3.2-12). Dieser Effekt tritt oberhalb der Schadenslinie auf. Belastungen zwischen Schadenslinie und Wöhler-Kurve wirken schädigend. Unter-



halb der Schadenslinie kommt die Zerrüttung im Gefüge zum Stillstand und wirkt sich kaum aus (**latente Schädigung**). Oberhalb der Schadenslinie geht die Zerrüttung weiter. Das grau markierte Feld kennzeichnet den **Zerrüttungsbereich**.

*Bild* 5.4.3.2-8 (*Lit* 5.4.3.3-12): *H.Huff schreibt in der zitierten Literaturstelle:* 

"Eine der größten Herausforderungen der Werkstofftechnik ist die Festlegung der zulässigen Beanspruchung unter Ermüdung. Die Schwierigkeit ergibt sich einerseits aus der großen Streubreite der Schwingfestigkeit und der Vielzahl von Einflussgrößen, andererseits aus der Schwankungsbreite der Beanspruchung, der Maschinen im Allgemeinen unterliegen."

Im Folgenden geht es um die Ursachen für die Streuung von HCF-Festigkeiten, nicht um Unsicherheiten in der Bestimmung von Betriebsbeanspruchungen. Eine entsprechende Abschätzung für LCF-Beanspruchung zeigt Bild 5.4.1.1-3. Interessant dürfte sein, die folgenden Erkenntnisse einer Monte Carlo Analyse (Bild 5.4.3.3-1) zu unterziehen.

Betrachtet wird die lebensdauerbestimmende dynamische Beanspruchung eines Bauteils, hier der Nabenbereich eines integralen Turbinenrads (Blisk). In diesem Fall würde es sich um eine LCF-Beanspruchung handeln. Die Vorgehensweise ist jedoch für LCF und HCF geeignet. Es empfiehlt sich ein Ablauf entsprechend der Zahlenfolge (Pfeile).

Fehler und Schwachstellen werden wie folgt definiert: **Fehler** lassen die auslegungsrelevanten Vorschriften nicht zu. **Schwachstellen** sind somit zulässig und werkstofftypisch (Bild 3.2.1-1 und Bild 5.4.3.2-9).

**"1" Abschätzung der Dauerfestigkeit** "F<sub>D</sub>" **des <u>fehlerfreien</u> Werkstoffs** aus der allgemeinen Relation von Härte und Festigkeit. Die im Diagramm dargestellte Beziehung gilt für Stähle. Um die Auslegungsschwingfestigkeit (spezifizierte Schwingfestigkeit) zu erreichen, muss die Härte über einem bestimmten Mindestwert liegen. Liegt die HCF-Festigkeit niedriger als es der Härte entspricht, dominieren Fehler.

"2" Abschätzung der Dauerfestigkeit des <u>fehlerbehafteten</u> Werkstoffs: In einem Werk-

stoff ist immer mit **Schwachstellen** zu rechnen. Die Schwachstellengröße "a" muss unter einem Grenzwert liegen, der sich aus der Beziehung  $F_D = 6 \cdot a^{-1/2}$  ermitteln lässt. Es ist somit nicht sinnvoll, aufwändig zu versuchen die Schwachstellengröße zu verringern, wenn die Dauerfestigkeit in der Auslegung nicht entsprechend angehoben werden kann.

"3" Berücksichtigung der Mittelspannung: Ganz allgemein fällt die Dauerfestigkeit mit der Zug-Mittelspannung  $\sigma_m$  ab (Bild 5.4-11 und Bild 5.4.3.2-4). Weil sich diese Betrachtung nicht auf die Betriebsbelastungen bezieht, wird hier nur der Eigenspannungseinfluss auf die Mittelspannung betrachtet. Druckeigenspannungen wirken den dauerfestigkeitsmindernden Zugeigenspannungen entgegen und erhöhen daher die Schwingfestigkeit. Eigenspannungen können auf vielfältige Weise vom Fertigungsprozess in das Bauteil induziert werden. Sie können sich auf die Oberfläche beschränken (z.B. bei Zerspanungsverfahren) oder im gesamten Bauteilquerschnitt wirken (z.B. Schmiede- und Härtespannungen). Es ist daher von entscheidender Bedeutung, dass die Fertigungsverfahren mit ihren Parametern festgeschrieben sind. Nur so kann von einem reproduzierbaren, akzeptablen Eigenspannungszustand im Bauteil ausgegangen werden.

"4" Berücksichtigung des Spannungsgefälles: Die Dauerfestigkeit steigt mit dem Spannungsgefälle " $\chi$ " das im Gegensatz zur Formzahl " $a_k$ ", die sich bei geometrischer Ähnlichkeit der Kerbe nicht ändert, größenabhängig ist ( $\chi = 2/Kerbradius$ ).

"5" Werkstoffzustand am Anriss: Ein Schwingbruch entsteht immer dort, wo die Schwingfestigkeit unter der dynamischen Beanspruchung liegt, d.h. im Bereich einer Schwachstelle. Weil dynamische Beanspru-

Fortsetzung auf Seite 5.4.3.2-15


#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: Werkstoffeinfluss



Fortsetzung von Seite 5.4.3.2-13

chungen häufig auf Biegeschwingungen zurückzuführen sind und die dadurch höher beanspruchte Oberfläche potenziell schwingfestigkeitsmindernden Einflüssen der Herstellung (z.B. Zerspanung) ausgesetzt ist, liegen Schwingermüdungsrisse gewöhnlich an der Oberfläche. Die Einschätzung solcher Einflüsse muss dem erfahrenen Fachmann überlassen werden. Voraussetzung für ausreichend sichere Schwingfestigkeitswerte ist eine festgeschriebene reproduzierbare Herstellung und Qualitätssicherung des Halbzeugs. Ferner sind die der Auslegung zu Grunde gelegten Daten an repräsentativen Proben zu ermitteln. Dabei ist natürlich auch ein besonderes werkstoff- und belastungsspezifisches Verhalten von Bedeutung. Dies gilt z.B. für die Schadensakkumulation (Bild 5.4-13 und Bild 5.4.3.2-10).

Bild 5.4.3.2-9 (Lit 5.4.3.3-12): Unvermeidliche werkstoffspezifische Inhomogenitäten können die Schwingfestigkeit eines Werkstoffs bestimmen und müssen in den Proben zur Datenermittlung bauteilrelevant vorhanden sein (Bild 5.4.3.2-3). Damit handelt es sich nicht um Fehler, sondern um Schwachstellen (Bild 3.2.1-1) mit denen man auf Grund des Fertigungsprozesses und/oder der Grenzen des serienmäßig einsetzbaren zerstörungsfreien Prüfverfahrens im Bauteil rechnen muss. Bei Ni-Basis-Gusslegierungen, dem häufigsten Werkstoff von Turbinenschaufeln, handelt es sich z.B. um Lunker aus dem Erstarrungsprozess (Detail unten). Diese führen zu einer typischen Streuung der Schwingfestigkeit. Das ergibt eine relativ niedrige "sichere"-Dauerfestigkeit. Sind Lunker unter 1 mm nicht mit der notwendigen Sicherheit auszuschließen, ist für diese Werkstoffe entsprechend der bruchmechanischen Abschätzung eine Dauerfestigkeit von lediglich ca. 180 MPa nutzbar (Diagramm unten) was mit den Probenergebnissen gut übereinstimmt.

# Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: Werkstoffeinfluss

Bei der Ermittlung der Schwingfestigkeit eines beschichteten Bauteils müssen rissbildende Betriebseinflüsse berücksichtigt und Bauteile mit entsprechenden Rissen geprüft werden.



Bild 5.4.3.2-10: Werden Bauteile beschichtet, kann die Schwingfestigkeit unter Betriebsbedingungen gegenüber Laborversuchen gefährlich abfallen. Besonders wenn Beschichtungen sich in bestimmten Bereichen der Betriebstemperaturen spröd verhalten (Bild 5.4.2.1-4). Zu solchen Schichten gehören Diffusionsschichten zum Oxidations- und Heißgaskorrosionsschutz sowie harte Erosionsschutzschichten wie TiN.

Kommt es im Betrieb zur **Rissbildung in einer** Schicht sind die an unbeschichteten Proben oder Proben mit einer ungeschädigten Schicht ermittelten Schwingfestigkeitswerte zu optimistisch hoch. Die Diskrepanz dürfte umso größer sein, je fester die Schicht auf dem Grundwerkstoff haftet (Details unten, Bild 4.2-1). Erfahrungsgemäß muss dann mit einer Häufung von Schwingbrüchen im Betrieb gerechnet werden. Dies ist besonders unangenehm, weil gewöhnlich bereits eine größere Anzahl beschichteter Bauteile ausgeliefert sind, bis statistisch die Häufung erkannt wird. *Rissbildung in einer spröden Schicht auf duktilem Werkstoff kann auf unterschiedliche Weise ausgelöst werden:* 

- Plastische Verformung:

- Beanspruchungen im LCF-
- Bereich (Detail rechts Mitte).
- Fremdkörpereinschlag (Detail links).

- Wärmedehnungsunterschied zwischen Schicht und Grundmaterial (Detail oben rechts).

# Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: Werkstoffeinfluss

Eigenspannungen sind im Gegensatz zur HCF-Festigkeit für die LCF-Festigkeit von untergeordneter Bedeutung, wenn sie durch plastische Verformung abgebaut werden.



Bild 5.4.3.2-11

Bild 5.4.3.2-11 (Lit 5.4.3.3-12): Mit Eigenspannungen (Bild 4.3-15 und Bild 4.5.1-3) aus dem Herstellungsprozess ist in Bauteilen immer zu rechnen. Wärmebehandlungen und Erstarrungsprozesse (z.B. Guss, Schweißung) führen zu Eigenspannungen, die über große Bauteilquerschnitte wirken. Zerspanende Verfahren (z.B. Drehen, Fräsen, Schleifen) induzieren Eigenspannungen im Oberflächenbereich.

Wird ein Bauteil im plastischen Bereich belastet, bauen sich Eigenspannungen bei Überschreiten der Fließgrenze bzw. der Kriechgrenze ab. Dies ist natürlich auch während einer **LCF-Beanspruchung** der Fall, die ja definitionsgemäß mit plastischen Verformungen abläuft. Vergleichbar wirken auch Kriechdehnungen (Bild 5.3.2-10). Weist das Bauteil an der Oberfläche bewusst (z.B. Kugelstrahlen) oder unbewusst (Zerspanung) schützende Druckeigenspannungen auf, ist auch mit deren Abbau zu rechnen. Damit fällt gegebenenfalls auch die HCF-Festigkeit an der Oberfläche ab.

Probleme der Maschinenelemente

#### Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Schwingermüdung: Werkstoffeinfluss

Bild 5.4.3.2-12 (Lit. 5.4.3.2-12): Dargestellt ist die einfachste Form der Abschätzung der Schädigung bzw. des Lebensdauerverbrauchs bei Schwingermüdung. Einer solchen Vorgehensweise liegt die Hypothese der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner zu Grunde. Diese "Miner-Regel" wird in der Industrie häufig angewendet. Annahme ist, dass ein Lastspiel eine Schädigung hervorruft, die sich mit 1/N, ausdrücken lässt. Dabei ist "N" die Bruchlastspielzahl im Einstufenversuch für das jeweilige Niveau der Spannungsamplitude. Die Spannungsamplituden einer dynamischen Betriebsbeanspruchung (Belastungskollektiv) lassen sich in Belastungsstufen zusammenfassen (Diagramm oben links). Eine Bruchlastspielzahl N. für das jeweilige Niveau der Spannungsamplitude einer Klasse lässt sich dann im Wöhlerschaubild des zugehörigen Werkstoffs (Diagramm oben rechts) ermitteln. Hier beispielhaft dargestellt für i=4. Die Schadenssumme bzw. Schädigung oder der Lebensdauerverbrauch für ein Belastungskollektiv beträgt je Belastungsklasse mit "n." Lastspielen pro 10<sup>6</sup> Lastwechsel (Belastungshorizont)  $s = \sum n_i / N_i$ . Definitionsgemäß tritt der Schwinganriss bei einer Schadenssumme ", $s^{"} = 1,0$  ein. Die ertragbare Lastwe chselzahl "N" ergibt sich im dargestellten Fall zu N=10<sup>6</sup>/s. Die Spannungsamplituden unterhalb der Dauerfestigkeit lassen sich durch eine fiktive Verlängerung der Wöhlerlinie, bevor diese in die Horizontale übergeht, berücksichtigen. Das Schaubild unten zeigt auf beeindruckende

Das Schaubild unten zeigt auf beeindruckende Weise die Grenze der Miner-Regel am Beispiel einer hochfesten Al-Legierung. Obwohl alle dargestellten Lastfolgen das gleiche Belastungskollektiv besitzen, ist doch die Schwingschädigung bzw. die verbrauchte Lebensdauer der Betriebsbelastung am größten. Damit ist man mit einem abstrahierenden Laborversuch auf der 'unsicheren Seite'.Selbst scheinbar kleine Änderungen an systematischen Lastfolgen wirken sehr unterschiedlich schädigend.



# Literatur zu Kapitel 5.4.3.2

- **5.4.3.2-1** B.A. Cowles, "High cycle fatigue in aircraft gas turbines an industry perspective", Zeitschrift "International Journal of Fracture", 80 1996, Seite 147-163.
- **5.4.3.2-2** T. Nicholas, "Critical issues in high cycle fatigue", Zeitschrift "International Journal of Fatigue", 21, 1999 Seite 221-231.
- **5.4.3.2-3** E. Siebel, "Handbuch der Werkstoffprüfung, 2. Band, Prüfung der metallischen Werkstoffe", 2. Auflage, Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1955 Seite 201-213, 250-252.
- **5.4.3.2-4** B.J. Lazan, "Fatigue of Structural Materials at High Temperatures", NATO Report 156, November 1957, Seite 1-27.
- **5.4.3.2-5** E. Macherauch, O. Vöhringer, " Das Verhalten metallischer Werkstoffe unter mechanischer Beanspruchung", Zeitschrift "Werkstofftechnik", 9, 1978, Seite 370-391.
- **5.4.3.2-6** D.W. Hoeppner, "Parameters that Input to Application of Damage Tolerance Concepts to Critical Engine Components", Proceedings AGARD-CP-393 der Konferenz "Damage Tolerance Concepts for Critical Engine Components", Seite 4-1 bis 4-16.
- **5.4.3.2-7** M.v. Ardenne, G. Musiol, S. Reball, "Effekte der Physik und ihre Anwendungen", 2. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Seite 471-474.
- **5.4.3.2-8** D.A. Wilson, D.P. Deluca, B.A. Cowles, M.A. Stucke, "Fatigue Crack Growth Resistance of Advanced Blade Materials", ASME Paper No. 86-GT-253, der "31 st International Gas Turbine Conference and Exhibition", Düsseldorf, Ger., March 7, 1986 und "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power", April 1987, Vol. 109, Seite 177-181.
- **5.4.3.2-9** T.J. Dolan, G.M. Sinclair, "Effect of Stress Amplitude on Statistical Variability in Fatigue Life of 755-T6 Aluminium Alloy", Zeitschrift "Transactions of American Society of Mechanical Engineers", July 1953.
- **5.4.3.2-10** P. Koster, "Manufacturing Methods for Surface Integrity of Machined Structural Components", MMP Project Nr. 721-0, Interim Technical Report, April-July, 1971.
- **5.4.3.2-11**M. Hempel, "Beeinflussung der Dauerschwingfestigkeit metallischer Werkstoffe durch den Oberflächenzustand", Klepzig-Fachberichte, Oktober 1963, Seite 371-381.
- **5.4.3.2-12** W. Schütz, "Lebensdauer-Berechnung bei Beanspruchungen mit beliebigen Last-Zeit-Funktionen", VDI-Berichte Nr. 268, 1976, Seite 113-138.

# 5.4.3.3 Abhilfen bei HCF-Schäden

Um HCF-Schäden zu vermeiden, muss die dynamische Beanspruchung genügend niedrig, d.h. unter der Dauerfestigkeit liegen. Dies muss bereits vorbeugend mit der Auslegungsphase erfolgen. Bei erzwungenen Schwingungen sind **Resonanzen zu vermeiden**. Dazu eignet sich das **Campbell-Diagramm** (Bild 5.4.3.1-2). Falls diese kurzzeitig nicht zu vermeiden sind, etwa während des Hochfahrens einer (Turbo-) Maschine, muss die Dämpfung des gefährdeten Bauteils der erregenden Kraft angepasst sein (Bild 5.4.3.3-7 bis Bild 5.4.3.3-16). Hierzu ist die Kenntnis der Anregungsintensität notwendig. Dies ist jedoch in vielen Fällen nicht vorhanden. Ein weiterer Schritt zur Identifikation schwinggefährdeter Bauteile und Abschätzung von deren Schwingbeanspruchungen sind **Schwingtests** (Bild 5.4.3.3-4) und **Modalanalysen** an möglichst betriebsnah aufgebauten Maschinenkomponenten oder ganzen Maschinen (Bild 5.4.3.3-5). Alle diese Versuche können jedoch erfahrungsgemäß nicht den Betrieb in der Serie ersetzen.

Deshalb bleibt nur der **Nachweis in geeigneten Prüfläufen** und **letztendlich in der Serie**. Gerade bei HCF-Beanspruchung gilt in besonderem Maß: "The Engine will tell us" (Bild 3.2.1-2).

Die HCF-Beanspruchung der Bauteile von Wärmekraftmaschinen, insbesondere Gasturbinen steigt tendenziell mit der Leistungskonzentration. Dabei wirken sich die höheren Luft- und Gaskräfte mit ansteigendem Druckniveau zusammen mit kleineren axialen Abständen zwischen den Stufen aus. Eine Minimierung der Dichtungsspalte (Schaufelspitzen, Labyrinthe) zur Eindämmung der Leckverluste erhöht die Wahrscheinlichkeit von Anstreifvorgängen (Bild 5.9.1-8 und Bild 5.4.3.3-5) und Schwingungsanregungen (Bild 5.4.3.1-1). Dieses Risiko muss durch geeignete Tribosysteme beherrscht werden (Bild 5.4.3.3-7).

Hohe Rotordrehzahlen erzeugen entsprechend hohe Fliehkräfte und Mittelspannungen, welche die zulässige Schwingbelastung vermindern (Bild 5.4-11 und Bild 5.4.3.2-4). Somit wird die Aufgabe, HCF-Ermüdungsbrüche zu vermeiden, immer anspruchsvoller.

Vermehrt kommen schwingempfindliche, integrale Bauformen mit geringer innerer Dämpfung zum Einsatz. Dazu gehören "**Blisk**" (engl. bladed disk, Bild 5.4.3.3-6) und "**Bling**" (engl. bladed ring, Bild 3-16). Auch einteilige **Verdichterleitapparate** als Löt- und/oder Schweißkonstruktion (Bild 5.4.3.3-5) sind typische Vertreter. Für einen erfolgreichen Einsatz solcher Technologien sind immer genauere Ermittlungen der Anregungen (Bild 5.4.3.3-2 und Bild 5.4.3.3-3) und der Schwingempfindlichkeit (z.B. Dämpfung, Schädigungen) notwendig. Dabei gilt möglichen Streuungen besondere Aufmerksamkeit (Bild 5.4.3.3-1).

Natürlich reicht es nicht aus, lediglich die für einen sicheren Betrieb notwendigen **Neuteilkenn**werte zu gewährleisten. Zu berücksichtigen sind **Veränderungen im Betrieb** wie Erosion, FOD,

Korrosion, Fretting (Kapitel 3.2.1, Kapitel 4.5.1 Kapitel 5.1 und Kapitel 5.3.1). Auch die Veränderung von Auflagebedingungen an den hochbelasteten Schaufelfüßen wie ein Anstieg des Reibbeiwerts und der geometrischen Auflagebedingungen durch Verschleiß und Kriechen ist zu beachten.

Eine ausreichend bauteilrelevante **Ermittlung von Auslegungsdaten** erfordert viel Erfahrung (Bild 5.4.3.2-2 und Bild 5.4.3.2-3). Sowohl in der Konzeption der Versuche, der Probenauswahl und des Belastungsniveaus (Bild 5.4.3.2-9) als auch in der Bewertung der Ergebnisse. Vom **Sicherheitsstandpunkt** befindet man sich mit zu niedrigen Probenwerten in Festigkeit und Lebensdauer gegenüber den Bauteileigenschaften für die Auslegung auf der "**sicheren Seite**". Dies führt zu einer gewissen Überdimensionierung bzw. "Reserven". Nachteilig wird diese "Philosophie", wenn deshalb die Bauteile und die Maschine zu schwer und/oder zu teuer werden. Die hohe Kunst ist es also, **möglichst hohe Mindestwerte bei ausreichender Datensicherheit** zu gewährleisten. Die der Auslegung zu Grunde liegenden **Werte müssen dann auch im Bauteil sicher realisiert** werden (Bild 3.2.1-1). Hier ist die Qualitätskontrolle vom Rohteilhersteller über die Fertigung bis zur lebensdauerrelevanten Bauteilerprobung gefordert.

Die **Probenentnahme** sollte aus Sicherheitsgesichtspunkten nach Möglichkeit immer im Bereich der **lebensdauerbestimmenden Bauteilzone** entnommen werden, in der die niedrigste Festigkeit zu erwarten ist (Bild 3.2.2-1.1, Bild 5.4.2-6, Bild 5.4.2-7 und Bild 5.4.3.2-3). Hierzu gehören dicke Querschnitte und Fügezonen. So sollten die Proben an stumpfgeschweißten Ringen für Rotorkomponenten und Gehäuse im Bereich dieser Fügezonen liegen.

Versagen Bauteile in der Entwicklungsphase oder im Serienbetrieb, ist eine Schadensanalyse die Voraussetzung einer gezielten erfolgreichen Abhilfe. Die Schadensanalyse kann aus dem Schadensbild wichtige Schlüsse auf die Anregungsursache, deren zeitliches Auftreten, Häufigkeit und die Belastungshöhe im Schadensteil ziehen.

#### Wenn bereits ein Schaden entstanden ist:

Schadensbild im Umfeld: Zunächst dürften bei einem Bauteilbruch zumindest in Turbomaschinen weitere Teile Folgeschäden aufweisen. Es ist also zunächst herauszufinden welches diese sind und was der **Primärschaden** ist. Hierzu gibt es die strategische Vorgehensweise der technischen **Problemanalyse** (Kapitel 2).

Aus dem Schadensbild des ursächlich betroffenen Bauteils und dem Umfeld lassen sich wichtige Schlüsse ziehen. Dies ist eine Voraussetzung für gezielte und erfolgreiche Abhilfemaßnahmen.

**HCF-Schadensteil**: Besteht ein System aus mehreren gleichen Bauteilen (z.B. eine Verdichterstufe oder Ventilfedern eines Kolbenmotors, Bild 4.3-20) sagt die Zahl der Bauteile mit Schwingrissen und/oder -brüchen etwas über das Niveau der verantwortlichen dynamischen Betriebsbeanspruchung aus. Ist nur ein Teil geschädigt, spricht dies für eine HCF-Belastung. Sind mehrere Teile betroffen, weist dies auf eine hohe Schwingbelastung, d.h. LCF, hin (Bild 4.3-21). Die **Auswertung der Betriebsbruch- und/oder Laborbruchflächen** (makroskopisch: Bild 4.4-3 und Bild 4.4-7; mikroskopisch: Bild 4.4-5 und Bild 4.4-6) kann Rückschlüsse auf den **Zeitpunkt**, den **zeitlichen Verlauf** (z.B. Zahl und Folge von Ereignissen) und damit auch auf die **Erregung** (z.B. Pumpstoß in einem Verdichter oder Überdrehzahl eines Motors) ermöglichen.

**Absicherung der Schlussfolgerungen**: Dies erfolgt nach Möglichkeit mit gezielten Untersuchungen (Bild 5.4.3.3-4), Messungen (Bild 5.4.3.3-2) und Versuchen. Ein erfolgreicher **Reproduktionsversuch** bestätigt nicht nur die Schadenshypothese, er ist auch die Voraussetzung für vergleichende Nachweise der Erfolgswahrscheinlichkeit von Abhilfen.



**Bild 5.4.3.3-1:** Die Bauteile moderner Maschinen sind in ihren Betriebseigenschaften immer höher ausgelastet. Das gilt sowohl für mechanische Belastungen, insbesondere dynamische, als auch für die aero- und thermodynamischen Anforderungen. Höhere aerodynamische Belastungen führen leichter zu Schwingbeanspruchungen im HCF-Bereich (stärkere und häufigere Anregungsmöglichkeiten). Will man Problame gusreichend sicher vermei

Will man Probleme ausreichend sicher vermeiden, muss man die Streuung der Eigenschaften und der Einflüsse des Betriebs und Bau-

teils berücksichtigen. Man denke nur an die große Zahl der Schaufeln in einer Gasturbine, die sich mit der Serie noch vervielfacht. Hier reicht es nicht mehr aus, allein nach der Maxime "the engine will tell us" zu verfahren. Der Aufwand für Abhilfemaßnahmen in der Serie kann erfahrungsgemäß viel zu hoch werden. Eine Forderung muss sein, das statistische Verhalten der Bauteile und Betriebseinflüsse mit einzubeziehen. Hierzu gehören sowohl Fertigungseinflüsse wie Maßtoleranzen (siehe dargestelltes Beispiel) als auch Streuungen auslegungsrelevanter Werkstoffdaten (z.B. HCF und LCF) und der **Betriebsparameter** wie Verweildauer in Drehzahlen, Temperaturen und Lastwechsel.

Ein Werkzeug, um mehr Auslegungssicherheit zu erreichen und/oder das Betriebsverhalten besser zu verstehen, ist die "Monte Carlo Methode-Technik". Diese geht in folgenden Schritten vor:

- Erstellung eines "Modells" welches das zu betrachtende Betriebsverhalten des Bauteils mathematisch beschreibt (z.B. Eigenfrequenzen der Schaufel).

- Auswahl der relevanten Eingabeparameter ("Variable": z.B. Länge, Dicke, Dichte, E-Modul) und Bestimmung der statistischen Verteilung.

- Aus jedem Parameter wird ein Wert nach dem Zufallsprinzip aus der Verteilung genommen und mit dem Modell eine Analyse durchgeführt.

- Die benötigten Ergebnisse der Ausgabeparameter (z.B. Eigenfrequenzen) werden aussortiert und gespeichert.

Diese Schritte werden so oft wiederholt, bis sich die Ausgabeparameter stabilisieren (d.h. erkennbaren Werten zustreben = konvergieren) und/oder die Zahl der Simulationen ausreichend erscheint. Alle Simulationen sind auf Grund der Vorgehensweise voneinander unabhängig und können als Punktewolke in einem dreidimensionalen Diagramm (Meta Diagramm unten rechts) dargestellt werden. Mit der **Betrachtung des Zufalls** lassen sich Zusammenhänge erkennen, die bei herkömmlichen Berechnungen verborgen bleiben, der Realität der großen Zahl im Serienbetrieb aber näher kommen.

Mit dieser Methode können Parameter mit dem stärksten Einfluss (z.B. der schlechteste) oder deren ungünstigste Kombination identifiziert werden. So lässt sich die Zuverlässigkeit besser bestimmen. Darüber hinaus erhält man ein Verständnis für die Zusammenhänge im Verhalten des Systems.



Bild 5.4.3.3-2: Schwingungsmessung an der laufenden Maschine ist eine wichtige Aufgabe und erfordert viel Erfahrung. So lassen sich die Auslegung überprüfen und unerwartete Effekte entdecken. Im Folgenden werden typische Messverfahren dargestellt.

Als Beispiel dient eine Verdichterrotorschaufel. Charakteristisch für die Intensität der Grundbiegeschwingung ist die Auslenkung (Amplitude) bzw. Schwinggeschwindigkeit der Schaufelspitze. Die Messung dieser Größen lässt daher umgekehrt Rückschlüsse auf die Schwingbeanspruchung zu (Skizze links, Bild 5.4.3.1-4 und Bild 5.4.3.1-7). Zu diesem Zweck wird in die Schaufelspitze ein dünnes Magnetblech eingebracht und fest verkeilt. So kann es nicht von der Fliehkraft gelöst werden. Die **Po**sition der Magnete darf nicht mit den Knotenlinien übereinstimmen (Detailskizze). In diesem Fall erfolgt trotz einer gefährlichen Schwingbelastung keine messbare Auslenkung. Im Gehäuse wird ein meanderförmiger Leiter (Kupferband) über der zu messenden Schaufelspitze angebracht. Rotiert die Schaufel, wird vom Magneten ein Strom im Leiter induziert. Er verändert sich bei schwingender Schaufelspitze entsprechend der Geschwindigkeitsänderung (Umfangsgeschwindigkeit + gleichund gegengerichtete Schwingbewegung)

charakteristisch. Dieses Verhalten wird zur Bestimmung der Schwingamplitude und Frequenz ausgewertet. Problematisch ist bei diesem Verfahren die Messung von Schwingmodi höherer Ordnung. Wegen der sehr kleinen Auslenkung ist es vorteilhaft, dass keine Messwerte aus dem rotierenden System übertragen werden müssen. So lassen sich auch dort Messungen durchführen, wo sich Funk- oder Drehübertrager nur schwer einsetzen lassen (z.B. bei Mehrwellenmaschinen). Weiterer Vorteil ist die Robustheit und die geringe Überlastungsgefahr durch hohe Schwingspannungen.

Messungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS, Bild 3.3-1.1) erfordern eine diffizile Applikation der Sonde und der Messleitungen zum Übertrager. Dieser bringt die Messwerte aus dem Rotor (Funk, Schleifringe, Skizze rechts). DMS sind empfindlich, sie können vor oder während der Messung versagen (z.B. Schwingüberlastung des DMS und/oder der Messleitungen, Haftprobleme). DMS selbst können das Schwingverhalten von Schaufeln unzulässig beeinflussen (Dämpfung, Bild 5.4.3.3-4).

Einige der Vorteile von DMS-Messungen sind: Die gezielte Messung in schwingbeanspruchten Bereichen verschiedener Schwingmodi. Die gleichzeitige Messung mit mehreren Messstreifen. Direkte Angabe der gemessenen Dehnungen bzw. Spannungen. Bild 5.4.3.3-3: Die Erfahrung zeigt immer wieder, dass DMS-Messungen an filigranen Bauteilen wie Verdichterschaufeln in der Entwicklungsphase eines Triebwerks keine alarmierenden Schwingbeanspruchungen zeigten. Trotzdem traten später im Serienbetrieb Schwingermüdungsschäden auf. Nicht immer ließen sich die HCF-Risse mit einem Abfall der Schwingfestigkeit nach einer betriebsbedingten Beschädigung wie Erosion oder FOD plausibel erklären.

Die Erklärung ergibt sich wie folgt:

Gewöhnlich werden bei Prüfläufen nur wenige Blätter von Leitapparaten und/oder Laufschaufeln einer Stufe an den schwingkritischen Zonen mit DMS ausgerüstet. Gründe sind der große Aufwand, die Beeinflussung der Strömung von Messleitungen und das erhöhte Risiko des Ausfalls der vielen Messstellen. Es hat sich aber gezeigt, dass offenbar gerade bei den filigranen Schaufeln moderner Verdichter, die DMS mit den zugehörigen Messleitungen das Schwingverhalten der Bauteile irreführend beeinflussen können. Haupteinfluss ist die Dämpfung durch die "Messsonde". Weiter ist der Frequenzabfall durch die zusätzliche Masse des DMS und der Anschlussleitungen zu berücksichtigen. Dies kann Resonanzen verändern und Mistuning-Effekte (Bild 5.4.3.3-6) auslösen. Die integrale Bauweise der Leitapparate und Rotoren (Bling) moderner Verdichter mit ihrer geringen inneren Dämpfung reagiert besonders sensibel. Die Schaufeln beeinflussen sich gegenseitig über die materialschlüssige Befestigung. Das Fehlen einer Reibungsdämpfung verschärft die Problematik. Selbst die geringe Masse des DMS kann die Resonanzfrequenz benachbarter Schaufeln einer Stufe merklich verändern. Das macht sich deutlich in der Schwingbeanspruchung bemerkbar. So in einem Fall bei dem lediglich eine Schaufel mit DMS bestückt war. Nach dem Versuchslauf war dies die einzige Schaufel die keinen Schwinganriss aufwies. Dafür ist nicht zuletzt wahrscheinlich folgender Effekt verantwortlich:



Kleine Unterschiede in der Eigenfrequenz führen dazu, dass nicht alle Schaufeln einer Stufe gleichzeitig zu schwingen beginnen. Schwingt eine einzelne Schaufel in einem integralen System (z.B. Leitapparat) zuerst in Resonanz, nimmt diese einen großen Teil der eingespeisten Anregungsenergie auf und verhindert so ein gefährliches Schwingen benachbarter Schaufeln.

Wird nun also die Messschaufel vom DMS und der Messleitung so verändert, dass sie nicht so leicht zu Schwingungen angeregt werden kann wie andere Schaufeln der Stufe, dann schwingen die Schaufeln ohne DMS und verhindern ausgerechnet die Schwingung der Messschaufel.

Abhilfe ist zu erwarten, wenn alle Schaufeln gleich mit DMS und Messleitungen ausgerüstet werden, wobei nicht alle angeschlossen sein müssen. Dieses Vorgehen ist aber nur praktikabel, wenn die Vielzahl der Strömungsstörungen durch die DMS und Anschlussleitungen das Verhalten des gesamten Systems nicht unzulässig verändern.



Bild 5.4.3.3-4: Trotz leistungsstarker Berechnungsverfahren und Modalanalysen ist in komplexen Fällen, zumindest bei betriebsnahen Auslenkungen (z.B. mit von der Amplitude und Verschleiß abhängigen Reibungseinflüssen, Bild 5.9.1-6), ergänzend immer noch zu Untersuchungen am Bauteil mit einem Stroboskop zu raten. Dies gilt besonders in Fällen einer Nachrüstung von Serienmaschinen im Rahmen einer Abhilfe bei Schadensfällen. Gerade bei sehr alten Typen und Lizenzprodukten sind oft keine, für aussagekräftige Berechnungen notwendige Auslegungs- und Konstruktionsunterlagen mehr vorhanden. Als eine besonders anspruchsvolle Aufgabe haben sich wider Erwarten Befestigungen von Peripherie bzw. Anbaugeräten gezeigt (Bild 3-8). Das Zusammenspiel mehrerer Einflüsse ist sehr komplex. Dazu gehören:

- *Massen* und deren Verteilung (z.B. Getriebe und Anbauten, Rohrleitungen),

- Dämpfungen (z.B. Reibung in Aufhängung, Rohrleitungsschellen) und

- Steifigkeiten (Kombination komplexer Bauteile wie Getriebe und mechanische Regler oder Pumpen aus unterschiedlichen Werkstoffen).

Das führt im Betrieb zu überraschenden Abweichungen gegenüber dem berechneten Verhalten. Sehr schwer sind auch Veränderungen während der Betriebszeit wie Verschleiß, Dämpfung oder der Reibbeiwerte in Berechnungen realistisch vorherzusehen und zu berücksichtigen (Kapitel 5.9.1 und Kapitel 5.9.3). Wie die Erfahrung zeigt, hat sich in solchen Fällen, die eine visuelle Auswertung von außen zulassen, das folgende experimentelle Vorgehen hervorragend bewährt:

Elastisches Aufhängen der Maschine (hier ein Triebwerk) bzw. der zu untersuchenden Komponente (z.B. ein Gehäuse) mit allen relevanten Anbauten (Skizze oben).

Schwingungsanregung mit Hilfe eines elektrodynamischen Erregers in allen betriebsrelevanten Frequenzen. Dabei wird mit einer **Stroboskoplampe** der interessierende Bereich beobachtet. Zusätzlich können an bereits erkannten Schwachstellen DMS angebracht werden. Sie zeigen die gefährliche (Schwing-)Frequenz und ermöglichen eine Abschätzung der Belastung.

Gerade **Praktiker wie Konstrukteure** erhalten so eine hervorragende Möglichkeit intuitiv Verformungen, Belastungen und die beanspruchungsrelevanten Zusammenhänge zu erkennen. Es können dann gegebenenfalls sofort Veränderungen vorgenommen, Teile ausgetauscht und ihre Effektivität überprüft werden.

Ähnliche Untersuchungen lassen sich auch an der laufenden Maschine auf einem Prüfstand oder im Serienbetrieb durchführen. Voraussetzung für eine Beobachtung vor Ort sind vorschriftsmäßige **Schutzmaßnahmen**. Selbstverständlich ist ein ausreichender Gehörschutz.



**Bild 5.4.3.3-5:** Um gefährliche Schwingungen zu vermeiden, bieten sich viele Möglichkeiten mit unterschiedlichen Ansätzen. Diese werden hier beispielhaft an Schaufeln von Turbomaschinen aufgezeigt.

• Konstruktive Gestaltung von Schaufeln:

Vermeidung von Resonanzen. Dies ist zuerst eine Frage der Auslegung. Wichtige Werkzeuge sind die heute zur Verfügung stehenden analytischen Methoden (FE-Berechnungen). Doch damit lassen sich meist nicht alle potenziell gefährlichen Resonanzen vermeiden (siehe auch Campbelldiagramm, Bild 5.4.3.1-2 und Bild 5.4.3.3-1), insbesondere wegen notwendiger Drehzahländerungen. Letztendlich muss die Erfahrung mit der Maschine die Schadensfreiheit bestätigen ("the engine will tell us", Bild 3.2.1-2). Häufig erfordert die Weiterentwicklung (Energieeffizienz, Leistungskonzentration) eine schwingungsempfindlichere Gestaltung. Ein Beispiel sind die dünnen, breiten und scharfkantigen Schaufeln sowie filigrane Gehäuse moderner Verdichter (Bild 5.4.3.3-10 und Bild 5.4.3.3-15). Das schränkt die Gestaltung für ein günstiges Schwingverhalten extrem ein. Umso wichtiger sind erfahrungsbasierte Optimierungen.

Wenn trotz gewissenhafter Auslegung HCF-Schwingbrüche auftreten, kommen eher korrigierende Maßnahmen in Betracht. Nicht selten wird bei Rissen längs der Hinterkante die Blattsehne verkürzt oder im Fall von Eckenausbrüchen ("lyra mode"-Schwingungen) diese abgetrennt. So nutzt man zwei Effekte:

- Verstimmung durch Verringerung der Masse (Frequenzanstieg) und Änderung von deren Verteilung. Damit ergibt sich die Chance eine Resonanz zu vermeiden.

- Eliminierung des anrissgefährdeten Bereichs (salopp: 'was weh tut wird weggeschnitten').

Ganz allgemein senken größere **axiale Abstände zwischen Rotor- und Statorschaufeln** die Stärke der gegenseitigen Anregung (Vorlaufund Nachlaufdellen). Dies mag zwar zu Las-



ten des Verdichterwirkungsgrads gehen und die Triebwerkslänge bzw. das Gewicht erhöhen, es reduziert aber erfahrungsgemäß das Risiko späterer böser Überraschungen. Aus diesem Grund wird dringend empfohlen, entsprechende Auslegungsvorschriften in Konstruktionshandbüchern festzulegen.

Mit einer geeigneten Anordnung der Leitschaufeln am Umfang lassen sich gegenseitige Anregungen mit den Rotorschaufeln unterdrücken (engl. cyclic spacing).

Auf gefährliche Schwingformen abgestimmte Abstützungen wie in Blattmitte in Umfangsrichtung angebrachte Nasen (Clapper, Snapper), getrennte oder geschlossene Deckbandringe (z.B. bei Verdichter-Leitapparaten oder bei Turbinenrotorschaufeln) und axiale Aussteifungen (flache axiale Rippe auf der Blattdruckseite



bei Verdichter-Leitschaufeln) können Schwingungen verhindern.

#### Konstruktive Gestaltung von Gehäusen

Gehäusestreben (Lagerstreben) können sich über Strömungsstörungen schwingungsanregend auf Schaufeln auswirken. Mit Dämpfungsmaßnahmen (Bild 5.4.3.3-13 und Bild 5.4.3.3-15) und optimierten Steifigkeitseigenschaften lassen sich aber auch Schwingungen dämpfen und Resonanzen vermeiden. Lagerstreben erzeugen wegen ihres relativ dicken Querschnitts ausgeprägte Strömungsstörungen, die sich in und gegen die Strömungsrichtung ausbreiten (Bild 5.4.3.1-1). Zahl und Anordnung der Streben ist so zu wählen, dass Resonanzen mit Rotorkomponenten vermieden werden. In Verdichtergehäusen sind gewöhnlich Luftentnahmen integriert und/oder Abblasventile angebaut. Diese potenziellen Strömungsstörungen sind so zu positionieren und zu gestalten, dass es zu keinen gefährlichen Schwingungsanregungen der in axialer Richtung benachbarten Schaufeln kommt.

Gehäusewandstärken (Steifigkeiten und Massen) können sich auf Schwingungen der befestigten Leitschaufeln auswirken. Indirekt, über die Vermeidung gefährlicher Spaltveränderungen und damit von Anstreifvorgängen, lassen sich Schaufelschwingungen sowie schwingfestigkeitsmindernde Gefügeveränderungen an den Spitzen vermeiden (gefährlich bei "Lyra Mode", Bild 5.4.3.3-10).

#### • Vermeidung örtlicher Strömungsablösungen (Stall) an der Beschaufelung.

Profilveränderungen durch Erosion, Aufrauung der Blattflächen, Vergrößerung von Spitzenspalten begünstigen örtlich begrenzte Strömungsablösungen ("rotating stall"). Solche Strömungsstörungen führen zur Schwingungsanregung. Maßnahmen zur Vermeidung von Erosion an Schaufeln (erosionsfeste Werkstoffe, schützende Beläge, robuste Schaufelprofile) und Einlaufbeläge (erosionsfeste Beläge) können die Wahrscheinlichkeit von Schwingbrüchen reduzieren. Sie dürften jedoch selbst die Schwingfestigkeit absenken (Bild 5.4.3.2-10).

• Dämpfung (Bild 5.4.3.3-7 und Bild 5.4.3.3-13) kann gefährliche Schwingbeanspruchungen mit dem Aufzehren der eingespeisten Energie vermeiden. Hierfür gibt es mehrere Ansätze:

- Schaufelwerkstoffe mit ausgeprägter innerer Dämpfung (Bild 5.4.3.3-11 und Bild 5.4.3.3-12). Voraussetzung ist, dass ausreichend Volumen am dynamischen Verformungsvorgang teilnimmt (Bild 5.4.3.3-11). Werkstoffe mit hoher innerer Dämpfung sind

> - Kunststoffe, insbesondere Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)

- dispersionsgehärtete Legierungen
- Memorymetalle
- besonders behandelte faserverstärkte Metalle lassen ebenfalls eine nutzbare Dämpfung erwarten.

- Eine weitere Form der Dämpfung kann durch äußere Einwirkung erfolgen. Hierzu gehören:

- **Reibungsdämpfung**, z.B. an den Schaufelauflageflächen oder mit Dämpfern wie Dämpfungsdrähte, Kolbenringe, Reibungsdämpfer an den Fußplattformen (engl. "cowbells").

- Dämpfende Zwischenlagen oder Eingussmassen (z.B. bei Verdichterleitschaufeln) aus Elastomeren (Bild 5.4.3.3-3). So wurden bei älteren Triebwerkstypen die Schwalbenschwanzfüße von Verdichterleit- und -laufschaufeln aus Aluminiumlegierungen mit Silikongummi eingeklebt und damit die werkstoffbedingt schwingempfindlichen Schaufeln (Skizze unten rechts) betriebstauglich gemacht. Ein dämpfender Effekt dürfte auch genutzt werden, wenn die aus Aluminiumprofilen hergestellten Fan-Austrittsschaufeln großer Bypasstriebwerke beidseitig in Elastomere eingegossen werden.

- Metallische Folien die auf zu dämpfende Flächen geklebt werden (Bild

- 5.4.3.3-7 und Bild 5.4.3.3-15).
- dämpfende Beschichtungen wie Kunst stoffe, Email, aufgespritze Memorymetalle oder Piezolegierungen.
- Dämpfungsbandagen aus Elastomeren (Bild 5.4.3.3-15) die z.B. außen um ein Gehäuse gespannt oder innen in das umlaufende Deckband eines Verdichterleitapparates eingeklebt werden.

• Geeignete Anstreifsysteme können Schwingbrüche an Rotorschaufeln vermeiden. Schaufelbrüche werden von Schädigungen der Schaufelspitzen beim Anstreifvorgang begünstigt (Bild 5.4.3.3-9). Die typisch hohen



Reibungstemperaturen führen zu Versprödung, Festigkeitsabfall, Materialaufschmierung und Gratbildung. Eine Schwingungsanregung durch den Anstreifvorgang erhöht die Schwingbruchgefahr. Ein geeignetes Anstreifsystem (Tribosystem) sollte diese Gefahr minimieren. So ist z.B. denkbar, die Schaufelspitze zu panzern oder mit einer geeigneten Formgebung (z.B. feather edging) Anstreifkräfte und Reibungswärme zu minimieren.

#### Bild 5.4.3.3-6:

• Verstimmung der Schaufeln: Durch eine Veränderung der Masse bzw. Massenverteilung und/oder der Steifigkeit (Werkstoff, Bild 5.4.3.2-1 oder Bauteilgeometrie) lassen sich Eigenfrequenzen gezielt verändern und so Resonanzen vermeiden. Dieses Vorgehen wird im Englischen als "Mistuning" bezeichnet. Es ist besonders bei integralen, schlecht gedämpften Strukturen aus einer Vielzahl gleicher Elemente

(z.B. geschweißte oder gegossene integrale Leitapparate und **Blisks**) von Interesse (Lit. 5.4.3.3-19). Fertigungsübliche Abweichungen von 1-2 % können zu einer Streuung der dynamischen Schaufelbelastung um 100 % und zu entsprechend hohen Schwingbelastungen führen. Dieser unerwünschte Effekt lässt sich durch gezielte Variationen der Schaufelblätter vermeiden. Der Einfluss der Änderungen auf die Eigenfrequenz muss dabei deutlich größer sein, als die üblichen fertigungsbedingten Abweichungen (etwa eine Zehnerpotenz). So ist es sogar möglich, die maximale Schwingbelastung deutlich herabsetzen. Bei gefrästen Blisks lassen sich die Fertigungskosten der unterschiedlichen Schaufeln im Gegensatz zu eingesetzten Schaufeln auf ein erträgliches Maß reduzieren. Mistuning bleibt trotzdem aus den genannten Gründen für Resonanzschwingungen eine problematische Abhilfemaßnahme. Flatterschwingungen las-

#### sen sich dagegen besser durch Mistuning vermeiden.

Aus dem Gesichtspunkt von Mistuning-Effekten muss wohl auch die Reparatur von Blisks und vergleichbarer Bauteile gesehen werden. Bei Nacharbeiten (Ausblenden von kleinen FOD-Kerben im Blatt) und eventuellem teilweisem oder ganzem Ersatz von Schaufelblättern ist mit einer, wenn auch begrenzten Veränderung des Schwingverhaltens zu rechnen. Diese darf auch unter statistischen Gesichtspunkten nicht zur gefährlichen Schwingerregung im Betrieb führen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich bereits bei der Entwicklung von Reparaturverfahren solche Einflüsse zu berücksichtigen und zu überprüfen. Bild 5.4.3.3-7 (Lit 5.4.3.3-18): Geschlitzte, federnde Dämpfungsringe in Form von Kolbenringen mit Rechteckquerschnitt oder Drahtringen werden an Zahnrädern, Zahnradwellen (Rahmen oben) und Labyrinthringen (Rahmen unten) genutzt. In rotierenden Bauteilen werden die Ringe von der Fliehkraft zusätzlich angepresst. Bei diesen Dämpfern steht jedoch die Reibung zwischen Ring und Bauteil im Vordergrund.

Das in derLiteratur dargestellte Turbinenrad (mittlerer Rahmen) dürfte zum Pumpenantrieb eines Raketenmotors gehören. Der vorgeschlagene **Dämpfungsring** dient zur Unterdrückung von Grundbiegeschwingungen der Schaufeln. Die Schaufelprofile ähneln in ihrer Dicke eher einer Dampfturbine. Der axialen Komponente der Schwingbewegung dieser sehr steifen Schaufel folgt der relativ dünne Kranz. Hier stützt sich der Dämpfungsring ab. Es wäre im Anwendungsfall zu prüfen, inwieweit diese Dämpfungsmaßnahme bei den für die typischerweise relativ dünnen Schaufelprofile integraler Turbinenräder kleiner Gasturbinen (z.B. für Hubschrauberantriebe), geeignet ist. Auch das Langzeitverhalten (z.B. Fretting an den Auflagen, Kriechbelastung, Oxidation) ist natürlich bei Gasturbinentriebwerken, anders als bei einer Raketenanwendung, von besonderer Bedeutung. Trotzdem kann diese Anwendung, gerade im Hinblick auf den verstärkten Einsatz von Blisks, vielleicht gerade in akuten Fällen, Anregungen für eine Abhilfe bei Schaufel- und Scheibenschwingungen geben.

Das Dämpfungsprinzip gestimmter Massen beruht auf dem bekannten Zweimassen-Zweifeder-System (Skizze oben links). Ein solches System weist in seinem Zusammenspiel eine deutlich andere Resonanzfrequenz als die einzelnen Untersysteme ("1" und "2") auf. Bei geeigneter Wahl der Massen und Federsteifigkeiten bzw. dem Verhältnis der Eigenfrequenzen der Untersysteme lässt sich der Widerstand von Masse "1" (Schaufelkranz) gegen die Erregungskraft deutlich erhöhen. Wählt man z.B. Federsteifigkeit und Masse von

Ein Dämpferring als abgestimmtes Feder-Massen-System kann gefährliche Schwingungen scheiben- und ringförmiger Bauteile verhindern.



Untersystem "2" (Dämpfungsring) so, dass Resonanz des Dämpfungsrings mit der äußeren Anregung auftritt, lässt sich im Prinzip die Schwingung der Masse "1" (Schaufelkranz) ganz unterdrücken. Eine vollkommene Unterdrückung der Schwingung ist jedoch in der Praxis nicht gegeben, weil auch Reibungsdämpfung an den Auflagen des Dämpfungs-

rings auftritt. Zusätzlich ist eine leichte Verstimmung des Dämpfungsrings aus der Resoempfehlenswert (Gefahr der nanz. Schwingermüdung des Dämpfungsrings?). Der einstückige Dämpfungsring soll elastisch in eine flache Umfangsnut (Detail) einschnappen (Montageprobleme?). Durch die Fliehkraft wird der Ring an den Kranz von unten gepresst. Jeder Schaufel ist eine Anlagefläche zugeordnet. Damit soll der Ring wie entsprechend viele einzelne gestimmte Dämpfermassen wirken. Der Anbringungsort des Dämpferrings muss die mit der Grundbiegeschwingung der Schaufeln auftretende Axialauslenkung des Scheibenkranzes möglichst gut nutzen. Hierzu ist eine entsprechende gekoppelte Schaufel-Scheibenschwingung notwendig. Die Auflagen des Dämpfungsrings sollen in der Ebene der Schwingungsknoten (Amplitude =0) erzwingen und auf diese Weise dämpfend wirken.

Bild 5.4.3.3-8 (Lit. 5.4.3.3-3): In Turbomaschinen sind nicht alle Resonanzmöglichkeiten eines Bauteils vermeidbar. Eine Verdichterrotorschaufel weist z.B. Biege- und Torsionseigenfrequenzen auf, deren Anregung im Betrieb (Bild 5.4.3.1-1 und 5.4.3.1-2) beim Durchfahren der Drehzahlen kaum vermieden werden kann. Es muss deshalb versucht werden, mit einer ausreichenden Dämpfung eine gefährlich hohe dynamische Belastung zu verhindern.

Die Wirkung **passiver Dämpfung** beruht auf einer Aufzehrung der Schwingenergie des Bauteils und entsteht während der zyklischen Dehnung des Bauteils. Dabei geht Schwingenergie in Wärme über. Während einer **aktiven Dämpfung wirken gezielt geregelte Kräfte** auf das schwingende System ein. Der passive Dämpfungseffekt kann dagegen auf sehr unterschiedliche Weise mit spezifischer Wirkung auf die Gesamtstruktur (Skizze oben) erreicht werden:

Konstruktiv eingebrachte passive Dämpfungen wie Beschichtungen sind bis auf Ausnahmen deutlich effektiver als die innere Dämpfung des Grundwerkstoffs, wenn es sich um örtliche Vibrationsprobleme (ca. 10%) oder örtliche Schwingformen (bis 40 %) handelt. Dem Konstrukteur steht eine große Auswahl energieverzehrender Mechanismen zur Verfügung. Sie eignen sich zur Schwingungsdämpfung von unterschiedlichen Maschinenkomponenten. Die Tabelle unten gibt hierzu eine Übersicht und versucht für eine Auswahl Hilfestellung zu geben. Sie zeigt charakteristische Eigenschaften der Dämpfungseffekte. Es handelt sich meist um Beschichtungen (Bild 5.4.3.3-13 bis Bild 5.4.3.3-14) und Reibungsdämpfer wie Dämpferdraht, Dämpfungsring, Dämpferbandage (Bild 5.4.3.3-15), Klapperniet, aufgenietete Wandpartien und Verstei-

fungen.

**Eigendämpfungen:** Dieser Effekt entsteht durch Reibvorgänge in einem System, bestimmt jedoch die konstruktive Gestaltung nicht. Hierzu gehört die innere Dämpfung der Werkstoffe. Diese kann auf sehr unterschiedliche Art wirken (Bild 5.4.3.3-11 und 5.4.3.3-12). Eine besonders ausgeprägte innere Dämpfung wird bei metallischen Werkstoffen mit Partikeldämpfung (dispersionsgehärtete Legierungen, Bild 5.4.3.3-13) beobachtet. Die dämpfende Wirkung des homogenen metallischen Werkstoffs ist im Vergleich zu Kontaktflächen mit Relativbewegungen nicht besonders groß. Eine Ausnahme machen faserverstärkte Werkstoffe wie Kunststoffe (FVK), Metalle und Keramiken. Deren innere Dämpfung ist sehr groß. Sie erhöht sich besonders bei FVK gewöhnlich noch, wenn der für die Schwingermüdung typische Schadensmechanismus der Delamination einsetzt (Bild 3-11 und Bild 3-12). Eine besonders geringe Dämpfung haben integra-



le Bauteile wie Schweißkonstruktionen (z.B. Leitapparate), Gussteile (z.B. kleine Turbinenräder von Turboladern, Bild 3-3) und gefräste Schmiedeteile (z.B. Blisk, Bild 3-16 und Bild 5.4.3.3-6). Besser dämpfend wirken gebaute Strukturen wie Scheiben mit eingesetzten Schaufeln (Reibung an den Auflageflächen), verschraubte Flansche und vernietete Bleche (z.B. Blechverkleidungen im Gaspfad) und sich aufeinander bewegende Flächen wie Steckverzahnungen (Vielkeilwellen).



5.4.3.3-9 (Lit 5.4.3.3-3): Passive Dämpfung lässt sich auf sehr unterschiedliche Weise nutzen. Beim Durchfahren von Resonanzen verhindert sie unzulässig starkes "Aufschaukeln" (Skizze oben) durch Strömungsstörungen und Anstreifvorgänge. Vibrationen von Blechstrukturen wie Brennkammern und Gehäusen werden gemindert (Skizze unten rechts), und die Schallabstrahlung (z.B. von Gehäusen und Getrieben) kann deutlich minimiert werden (Skizze unten links).



*Bild 5.4.3.3-10* (*Lit. 5.4.3.3-3*): Die Luftdämpfung nimmt bei Verdichterschaufeln die in der Grundbiegung schwingen (Bild 5.4.3.1-4) den "Löwenanteil" gegenüber der Eigendämpfung des Werkstoffs und der Reibung in den Anlageflächen ein (siehe Balkenhöhe). In der Grundbiegeschwingung macht das Schaufelblatt relativ große Bewegungen gegenüber dem umgebenden Medium (Luft- oder Gasströmung) und kann damit seine Energie an

dieses abgeben. Schwingformen höherer Ordnung (Bild 5.4.3.1-4) sind dagegen mit relativ kleinen Auslenkungen verbunden. Deshalb ist, ähnlich wie bei Scheibenschwingungen, nicht mit einer großen Dämpfung zu rechnen. Die Dämpfungswirkung des Luftstroms ist also entscheidend vom Druck im Umgebungsmedium und der Schwingform des Schaufelblattes abhängig. Dies kann dazu führen, dass sich in der Entwicklungsphase bei Prüfläufen am Boden keine gefährlich hohen Schwingbelastungen an den Schaufeln erkennen lassen. Im Höhenprüfstand oder bei Flügen in großen Höhen können dagegen trotzdem Schwingbrüche auftreten, wenn die Luftdämpfung deutlich geringer ist.

Die Skizzen unten zeigen den Einfluss der Blattgeometrie auf die Luftdämpfung und damit auf die Schwingempfindlichkeit. Rotorschaufeln mit einem schmalen Blatt (links) neigen zu Biegeschwingungen in der Grundform. So entsteht eine hohe aerodynamische Dämpfung. Der Schaufeltyp erfährt so einen gewissen Schutz vor Schwingermüdung. Das breite Blatt auf der rechten Seite hat ein relativ dünnes Profil und neigt zu hochfrequenten Schwingungen höherer Ordnung. Wegen der kleinen Auslenkung werden diese Schwingungen nur wenig von der Umgebungsluft gedämpft. Die Bildung von Schwingrissen an den Kanten ("Lyra Mode"-Risse, siehe auch Bild 5.4.3.3-2) wird so begünstigt.

Bild 5.4.3.3-11 (Lit 5.4.3.3-7): In Fällen kleiner Erregerkräfte und/oder minimaler Luftund Reibungsdämpfung kann die Begrenzung von Resonanzschwingungen entscheidend von der inneren Dämpfung des Werkstoffs abhängen. Die innere "Dämpfungskapazität" eines Werkstoffs wird sinnvollerweise als diejenige Energiemenge angegeben, die von einer Volumeneinheit bei einem Spannungslastwechsel (bzw. Dehnungslastwechsel) absorbiert wird. Für viele Werkstoffe gilt die Dämpfungskapazität  $D=k. \sigma^n$ . Dabei ist " $\sigma$ " die dynamische Belastung. "n" beträgt für die üblichen metallischen Werkstoffe etwa 3 und "k" ist eine von der Belastungsart (Biegung, Torsion, Schub, Zug/Druck) abhängige Materialkonstante. Aus der Volumenabhängigkeit der Dämpfungswirkung ergibt sich eine wichtige Folgerung:

Weil nur Volumen die unter ausreichend hoher Schwingbeanspruchung stehen zur inneren Dämpfung beitragen, ist die Dämpfungswirkung stark von der Schwingungsform abhängig. Das Volumen einer Schaufel unterliegt keiner homogenen dynamischen Belastung und ist deshalb nur begrenzt zur Dämpfung nutzbar. Die untere Skizze (Lit 5.4.3.3-8) zeigt belastungsabhängig für die innere Dämpfung nutzbare Volumenanteile verschiedener Beispiele. Im Extremfall eines gekerbten Zug/Biegung belasteten Stabes ("a") trägt nur das kleine hochbelastete Volumen im Kerbgrund zur Dämpfung bei. Diese dürfte daher extrem niedrig sein. Auch eine Rotorschaufel ("b") lässt nur wenig nutzbare innere Dämpfung erwarten. Ein Stab unter reiner pulsierender Axiallast ("g") weist dagegen eine maximal nutzbare innere Dämpfung auf.

Die innere Dämpfung eines Werkstoffs hängt von einer Vielzahl Faktoren ab, die wichtigsten sind:

- Frequenz der Belastung,
- Höhe der Beanspruchung (Diagramm oben links),
- Gefüge (z.B. Korngröße, Kornstruktur, Dispersions-Partikel, Verstärkungsstruktur),

# - Betriebstemperatur (Bild 5.4.3.3-12 und Bild 5.4.3.3-15),

- Vorhergehende dynamische Schädigungen (Diagramm oben rechts, Bild 5.4-2 und Bild 5.4.3.2-7).

Die innere Dämpfung eines metallischen Werkstoffs (Lit. 5.4.3.3-7) ist nicht linear von der Größe der **dynamischen Beanspruchung abhängig**. Für Stähle erkennt man im Diagramm oben links einen plötzlichen steilen Anstieg der Dämpfung. Der Grund sind makroskopische plastische Verformungen. Dieses Verhalten entspricht der Spannungs-Dehnungs-Hysterese im LCF-Gebiet (Bild 5.4.1.1-4 bis Bild 5.4.1.1-7). Im HCF-Bereich ist die Dämpfung dagegen vergleichsweise gering.

Gusseisen zeigt bereits bei kleinen Belastungsamplituden eine hohe innere Dämpfung. Diese nimmt aber mit der Belastung nur wenig zu. Ein solches Verhalten ist mit der inhomogenen Gefügestruktur (z.B. Grafitlamellen) zu erklären. Es ist auch von dispersionsgehärteten Legierungen zu erwarten. Die Dämpfung von Werkstoffen mit stark verspanntem Gefüge (gehärtete Stähle) kann, entsprechend dem schematisch dargestellten Verlauf, einen Wendepunkt aufweisen.

Die innere Dämpfung verändert sich mit der Lastspielzahl (Diagramm oben rechts). dürften Mechanismen der Hierbei Schwingermüdung (Bild 5.4-2) eine Rolle spielen. Allgemein lässt sich beobachten, dass in der Nähe der Dauerfestigkeit die Dämpfung einem werkstoffspezifischen Grenzwert zustrebt. Bis dahin kann das Dämpfungsverhalten der Werkstoffe sehr unterschiedlich sein. Bei hohen Mikroeigenspannungen (Bild 4.3-15) steigt die Dämpfung zuerst an und fällt dann auf die Grenzdämpfung ab (z.B. gehärtete C-Stähle). Das umgekehrte Verhalten zeigen Werkstoffe mit niedriger Fließgrenze und daher niedrigen inneren Spannungen (z.B.Cr-Ni Stähle). Ist der Werkstoff im Gefügebereich frei von Eigenspannungen, ist mit einem monotonen Abfall der Dämpfung mit der Lastwechselzahl zu rechnen.

Die Belastungsfrequenz hat nur dann einen deutlichen Einfluss auf die innere Dämpfung wenn sie so hoch ist, dass sich der Werkstoff aufheizt und damit der Temperatureinfluss (Bild 5.4.3.3-12) zum Tragen kommt. Dies ist z.B. bei Titanlegierungen (Bild 5.10,1-5) mit der typisch niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Fall. Hier kann es sogar im Ermüdungsbereich zu Anlauffarben und Gefügeveränderungen bis hin zu Anschmelzungen kommen. Auch faserverstärkte Kunststoffe zeigen ein solches Verhalten und können sich bei ausreichend intensiver Anregung stark aufheizen.

Die innere Dämpfung der Bauteile kann sehr unterschiedlich sein und hängt von vielen Einflüssen ab.





Bild 5.4.3.3-12: Weil die innere Dämpfung gewöhnlich von der plastischen Verformung im Mikrobereich (Bild 5.4-2 und Bild 5.4.3.3-11) eines Werkstoffs bei dynamischer Belastung abhängig ist, steigt sie mit der Duktilität und dem Abfall des Formänderungswiderstands (Diagramm rechts). Dies zeigt sich im Temperatureinfluss. Die Dämpfung der Metalle steigt gewöhnlich mit der Temperatur. Werkstoffspezifisch werden dann große Sprünge in der Dämpfung beobachtet, wenn sich temperaturbedingt das Formänderungsvermögen (z.B. Mg) und/oder das Gefüge (Umklappen instabiler Gefügebestandteile bei Stählen) ändert (Lit 5.4.3.3-7).

Viele Kunstharze und Elastomere verfügen über eine sehr große innere Dämpfung, die bis tausend mal höher liegen kann als bei Metallen. Leider ist die innere Dämpfung von Kunststoffen extrem temperaturabhängig. Das linke Diagramm zeigt das Verhalten bei gleichbleibender Frequenz (Lit 5.4.3.3-9). Es sind drei typische Bereiche zu erkennen. Die Elastomere unterscheiden sich untereinander in der **Übergangstemperatur** bzw. der Temperatur mit der maximalen inneren Dämpfung und in der Breite der Temperaturbereiche. Bei niedrigen Temperaturen ist der **E-Modul** hoch und die Dämpfung niedrig. Diese Eigenschaften zeigen sich auch an Klebungen und sind z.B. beim Einsatz aufgeklebter metallischer **Dämpfungs**folien (engl. constrained layer damping) zu berücksichtigen (Lit 5.4.3.3-13, Bild 5.4.3.3-14). **Faserverstärkte Kunststoffe** lassen ein, von der Matrix abhängiges, ähnliches Verhalten erkennen (Lit5.4.3.3-10).

*Bild 5.4.3.3-13* (*Lit 5.4.3.3-3*): *Effekte die zur* passiven Dämpfung von Maschinen geeignet sind:

"1" Dämpfungsfolien (engl. constrained layers): Diese Folien werden auf die Oberfläche des zu dämpfenden Bauteils, z.B. einer Verdichterleitschaufel (Bild 5.4.3.3-14) aufgeklebt. Sie abeiten anders als eine einfache Lack- oder Elastomerbeschichtung. Ihre Dämpfungseffektivität erreichen sie wegen des zweischichtigen Aufbaus (Skizze oben links). An der Oberfläche befindet sich eine dünne Folie aus einem Werkstoff mit hohem Elastizitätsmodul (Bild 5.3-1). Gewöhnlich werden Metallfolien aus CrNi-Stahlblech oder einer Ti-Legierung verwendet. Der Kleber (Kunstharz, Elastomer) mit dem diese Folie auf der zu dämpfenden Oberfläche befestigt wird, muss Verformungskräfte (Bauch der Schwingung) über Schubbeanspruchung auf die steife Folie übertragen. Dabei wird Energie in der weichen Zwischenschicht verzehrt und so die dämpfende Wirkung erzeugt.

Eine besondere Form dieser Technik sind sog. Dämpfungsbandagen, z.B. um dünnwandige Verdichtergehäuse, um hochfrequente Schwingungen zu unterdrücken.

Eine praxisbewährte Ausführung (Bild 5.4.3.3-15) besteht in einer mehrere Millimeter dicken, mehrere Zentimeter breiten CFK-Bandage (C-Faser verstärkter Kunststoff/Epoxid =CFK), die um das zu dämpfende Gehäuse gelegt und tangential verspannt wird. Als "constraint layer" wird ein mehrere Millimeter dicker Gürtel aus Silikongummi zwischen die Gehäusewand und die CFK-Bandage gelegt.

#### Vorteile:

- Sehr gute Dämpfungswirkung
- Meist tolerierbare Veränderung der Oberflächengeometrie (Profil, Rauigkeit).
- Für Serienanwendung verfügbar
- Betriebserfahrungen in Triebwerken

#### Nachteile:

- Schlechte Anformbarkeit für sphärisch gewölbte Blattoberflächen.
- Begrenzte Temperaturstabilität, d.h. nur Einsatz deutlich unter 100°C.
- Dämpfungswirkung sehr temperaturabhängig (siehe Abschnitt 2).
- Alterungsempfindlich und Nachlassen der Haftfestigkeit als Folge von Kriechen (Ablösungen). Schädigung durch Medien wie Kraftstoff, Öl und Reinigungsmittel (siehe auch Kapitel 5.3.1.1).
- Empfindlich gegen Fremdkörpereinschläge und Erosion. Von einem Sandkorneinschlag kann erfahrungsgemäß ein Riss und die örtliche Ablösung der Folie ausgehen. (Bild 5.4.3.3-14).

"2" Beschichtungen aus viskoelastischen Materialien (engl. abgekürzt VEM): Diese Werkstoffe können als relativ dünne Beschichtungen aber auch als massive Bandagen und Füllungen von Hohlräumen zur Anwendung kommen (Bild 5.4.3.3-6). Es handelt sich um Werkstoffe, die nur in bestimmten Temperaturbereichen optimale Dämpfungseigenschaften aufweisen. Für erhöhte Temperaturen um einige 100°C wurde in den siebziger Jahren Email zur Dämpfung von Leitschaufeln untersucht (Lit 5.4.3.3-16). Offenbar hat die Erosionsempfindlichkeit dieser Beschichtungen eine Serienanwendung verhindert. Ein weiteres Problem ist die im Verhältnis zu den Betriebsbelastungen niedrige Viskosität. Allein Strömungskräfte können die Emailschicht verschieben. Aus dem zugehörigen Diagramm erkennt man, dass bei niedriger Temperatur, in der ein glasiger Zustand besteht, der Schermodul des Belags hoch ist. Der die Dämpfung charakterisierende Verlustfaktor ist deshalb niedrig (siehe auch Bild 5.4.3.3-15). Das Einsatzgebiet dieses Werkstoffverhaltens ist auf hohe Frequenzen begrenzt. Email hat den zusätzlichen Nachteil, dass bei Betriebs-

Fortsetzung auf Seite 5.4.3.3-26



Fortsetzung von Seite 5.4.3.3-24

temperatur das **viskose Verhalten** den Einsatz auf Rotorschaufeln verhindert. Das **Email fließt** erfahrungsgemäß nach kurzer Zeit unter der Fliehkraft und den Gaskräften weg. In einem Übergangsbereich mit stark abfallendem Schermodul gibt es eine **Zone** "A" mit an-

steigendem und eine **Zone** "**B**" mit abfallendem Verlustfaktor. Zonen mit maximalem Verlustfaktor sind als Einsatzgebiet jeweils **optimal für eine Dämpfung** geeignet.

In der Zone "C" mit einem gummiartigen Verhalten des Belags liegen Schermodul und Verlustfaktor sehr niedrig. Dieser Bereich befindet sich in, für den jeweiligen Belagswerkstoff, "hohen" Temperaturen und ist nur für niedrige Frequenzen nutzbar.

#### Vorteile:

- Im geeigneten Temperatur- und Frequenzbereich sehr gute Dämpfung,
- Gute Verfügbarkeit,
- Relativ preiswert in Beschaffung und Verarbeitung,
- Auf komplexe Geometrien auftragbar.

#### Nachteil:

- Temperaturempfindlichkeit,
- Alterung (Versprödung, Festigkeitsverlust),
- Schädigung und Ablösung durch einwirkende Medien (z.B. Reinigungsmittel, Öl, Kraftstoff).
- -Haftfestigkeitsprobleme sowohl bei der Fertigung als auch über lange Betriebszeiten.
- Schädigung von dynamischer Überlastung (innere Rissbildung, Ablösung).
- Erosionsempfindlich (flache Auftreffwinkel).

"3" Viskose Fluide: Hier nutzt man den Strömungswiderstand bzw. die Viskosität einer Flüssigkeit, ähnlich wie im Stoßdämpfer eines Fahrzeugs. Derartige Dämpfer kommen z.B. bei einem angelenkten Aggregat zum Einsatz. Beispiele sind Schwingungsdämpfer hochtouriger Flachriemen- und Kettentriebe. Eine besondere Anwendung ist die elastische gedämpfte Lagerung (Bild 5.4.3.3-16). Dabei wird ein zwischen Lageraußenring und der Gehäusewand gedrückter Ölfilm genutzt, der eine radiale Bewegung des Lagerrings auf Grund seines Strömungswiderstands im engen Ringspalt dämpft. Dieser Ölfilm wirkt neben der Dämpfung des Lagers und des Rotors bzw. der Welle auch als "Polster" gegen die Übertragung von Vibrationen auf das Gehäuse.

#### Vorteile:

- Gute konstruktiv auslegbare Dämpfung. Dämpft sowohl Vibrationen mit hohen Frequenzen als auch große Bewegungen bei niedrigen Frequenzen.

- In ein Ölsystem integrierbar (z.B. elastischgedämpfte Lagerung).

#### Nachteile:

- Nachrüstung kann wegen Umkonstruktionen schwierig sein.
- Beschränkt auf Betriebstemperaturen im Einsatzbereich von Ölen.

"4" Magnetische Werkstoffe: Das Dämpfungsprinzip besteht hier in der Erzeugung von Wirbelströmen. Sie entstehen in einem nicht notwendigerweise magnetischen elektrischen Leiter, der quer zu einem Magnetfeld bewegt wird (Prinzip des Stromzählers). Je schneller die Bewegung, umso höher die gegenwirkende Kraft, d.h. umso größer die Dämpfung. Der Einsatz dieser Form der Dämpfung wurde in Triebwerken bisher nicht bekannt.

"5" intelligente Werkstoffe (engl. smart materials): Derartige Werkstoffe befinden sich, soweit bekannt, noch größtenteils in der Grundlagen- und Entwicklungsphase.

In Werkstoffen mit **Piezoeffekt** entsteht bei elastischer Verformung eine elektrische Spannung. Sie kann über einen Widerstand mit einem Stromfluss abgebaut werden. Diese **elektrische Energie** wird dem System als Schwingenergie

entzogen und bewirkt die Dämpfung (Skizze rechts Mitte). Gedacht wird an die Dämpfung von Lagern.

*Elektro- und magnetorheologische Fluide* ändern ihre innere Reibung (Zähigkeit, Kapitel 5.2.3.1) mit dem Aufbringen von elektrischen bzw. magnetischen Feldern (Kapitel 5.2.3.1 und Kapitel 5.12).

Magnetrostriktive Werkstoffe zeigen eine Längenänderung beim Aufbringen eines Magnetfelds.

Gedächtnis- oder Memory-Metalle (engl. memory metals) ändern mit der Temperatur reversibel ihre Form, wenn diese vorher "eingeprägt" wurde. Sie verfügen über eine hohe innere Dämpfung. Falls sich solche Werkstoffe als Beschichtungen realisieren ließen, kann eine gute Dämpfungswirkung erwartet werden.

**"6" Hoch dämpfende Legierungen:** Hierzu gehören dispersionsgehärtete Legierungen. Typische Vertreter sind die Hochtemperaturlegierung Mar M2000 und Mg-Guss mit Thoriumoxid. Ein Nachteil ist, dass Thorium bzw. sein Oxid α-Strahler sind. Diese **Radioaktivität** ist in Fertigung, Reparatur und Entsorgung zu beachten. Eine gezielte Anwendung für die Nutzung der Dämpfungseigenschaften wurde nicht bekannt. Bei Grauguss und Sphäroguss profitiert man von den Dämpfungseigenschaften in den Betten von Werkzeugmaschinen.

"7" Impuls- und Partikeldämpfung: Impulsdämpfung wurde seit Langem bei Turbomaschinen (Industriegasturbinen, Turbolader) in Form von "Klapperniete" angewendet (Skizze unten rechts). An Kreissägeblättern unterdrückt man auf diese Weise das unangenehme 'Kreischen'. Der außer Takt mit dem Schaufelblatt schwingende Niet dämpft über Gegenimpulse und Reibung in der Befestigungsbohrung (siehe auch Bild 5.4.3.3-7). Eine derartige Dämpfungsmaßnahme kommt in modernen Triebwerken nicht zur Anwendung. Nachteile sind Strömungsstörungen, die Schwächung des Schaufelblattes durch die Aufnahmebohrung und die Gefahr des Nietbruchs (Frettingverschleiß, dynamische Beanspruchung) mit Folgeschäden (OOD). Denkbar ist allenfalls ein zeitlich und zahlenmäßig begrenztes Provisorium als Notmaßnahme bei Schäden.

Die Partikeldämpfung besteht aus einem mit Partikeln teilweise gefüllten Hohlraum. Die Partikel können sich zumindest noch gegeneinander und gegen die Hohlraumwand bewegen und so Reibungsenergie aufnehmen. Diese Form der Dämpfung wird in Werkzeugmaschinenbetten durch die Füllung von Hohlräumen mit Formsand angewendet. Sie wird offenbar auch für die Dämpfung von Scheibenschwingungen an integralen Rotoren von Turbomaschinen ('Blisk') diskutiert.



Bild 5.4.3.3-14 (Lit 5.4.3.3-9): Dieses Bild zeigt den Eintrittsleitapparat eines Kampfflugzeugtriebwerks mit gravierenden HCF-Schäden. Es handelt sich um eine typische Anwendung der "constraint layer"-Technologie (Bild 5.4.3.3-13 und Bild 5.4.3.3-15). Dabei wird ein dünnes Blech mit einem hochdämpfenden Kunststoffkleber auf das zu dämpfende Bauteil geklebt. Dehnungen zwischen dem steifen Blech und der Bauteiloberfläche beanspruchen den Kleber dynamisch auf Schub. Dabei entsteht die hohe Dämpfung. Diese Technologie hat sich zur Unterdrückung gefährlich hoher Schwingbeanspruchung bewährt. Sie hat jedoch auch gravierende Nachteile. Bei Beschädigung und Erosion kann es zur Rissbildung und Ablösung kommen. Selbst kleine Partikel können in Turboverdichtern durch Kerbwirkung Schaufelbrüche auslösen. Über lange Laufzeiten begünstigen die Betriebstemperaturen und/oder die Einwirkung von schädigenden Medien (Kraftstoff, Lösungsund Reinigungsmittel, heißes Schmieröl) das Ablösen der Folie. Aufkleben auf sphärisch gewölbte Flächen ohne eine Verspannung ist kaum möglich. So können die Restspannungen großflächige Ablösung unterstützen.





Bild 5.4.3.3-15 (Lit. 5.4.3.3-13): Eine Dämpfungstechnologie für große zylindrische Flächen, die der "constraint layer"-Technik (Bild 5.4.3.3-13 und Bild 5.4.3.3-14) verwandt ist, lässt sich mit einer hochsteifen Bandage und einer Elastomer-Zwischenlage realisieren. Ohne diese ist eine effektive Dämpfung, insbesondere bei hochfrequenten Schwingungen, nicht zu erwarten. Die Bandage besteht aus Gewichtsgründen vorteilhaft aus mit C-Faser verstärktem Kunststoff. Sie wird um die auf dem Bauteil (z.B. Gehäuse) liegende dünne Gummilage gespannt. Auf Grund der unterschiedlichen Steifigkeit gegenüber Gehäuse und Bandage erfährt diese Elastomerlage bei Schwingungen des Gehäuses Dehnungen. Die Schwingenergie aus dem Gehäuse wird von der inneren Dämpfung in Wärme umgesetzt. Erstaunlicherweise ist dieses Dämpfungssystem bei hochfrequenten Schwingungen mit kleinen Amplituden wirksam. Dabei werden erfahrungsgemäß auch Schwingungen der Schaufeln integrierter (eingeschweißter) Leitapparate gedämpft. Das abgebildete Beispiel (Lit. 5.4.3.3-16) zeigt eine Bandage mit der Schwingrisse in wenigen Zehntelmillimeter dicken Wandungen eines Verdichtereintrittsgehäuses aus einer Titanlegierung verhindert werden konnten.





Bild 5.4.3.3-16 (Lit 5.4.3.3-11): Ölgedämpfte Lager haben sich zur Vermeidung unzulässiger Rotorschwingungen hervorragend bewährt und kommen in modernen Triebwerken allgemein zum Einsatz.

Zwischen dem Außenring des Lagers und dem Gehäuse befindet sich ein **abgedichtetes Ölpolster** mit einer Dicke im Zehntelmillimeter Bereich. Ein Verdrehen des Rings wird von Nasen oder einem mit dem Ring fest verbundenen elastischen "Käfig" (mit axialen Streben) übernommen. Die radiale Rückstellung erfolgt über die Wellenelastizität oder den Käfig.
# Literatur zu Kapitel 5.4.3.3

- **5.4.3.3-1** C.B. Meher-Homji, "The Development of the Whittle Turbojet", ASME-Paper No. 97-GT-528, des "42nd International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition". Orlando,Fl. June 2-5, 1997 und Zeitschrift "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power", April 1998, Vol. 120, Seite 249-256.
- **5.4.3.3-2** D. Goldschmidt, "Einkristalline Gasturbinenschaufeln aus Nickelbasis-Legierungen, Teil II: Wärmebehandlung und Eigenschaften", Zeitschrift "Materialwissenschaft und Werkstofftechnik". 25, 1994, Seite 373-382.
- **5.4.3.3-3** D.Johnson, "Design and Application of Passive Vibration Suppression", Paper des "1999 International Symposium on Smart Structures and Materials". February 28, 1999.
- 5.4.3.3-4 M. Nakao, M. Ikeyama, S. Abe, "Analytical Condition Inspection and Extension of Time Between Overhaul of F3-30 Engine", ASME Paper 91-GT-277 des "International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition". Orlando, Fl., June 3-6 1991, Seite 1-7.
- **5.4.3.3-5** K.Y. Sanliturk, D.J. Ewins, A.B. Stanbridge, "Underplatform Dampers for Turbine Blades: Theoretical Modeling, Analysis, and Comparison With Experimental Data", ASME Paper 99-GT-335 des "International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition". Indianapolis, IN, June 7-10, 1999 und Zeitschrift "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power", October 2001, Vol 123, Seite 919-929.
- **5.4.3.3-6** S.W. Kandebo, "GE90 Damper Flaw Prompts Repair Race", Zeitschrift "Aviation Week & Space Technology", January 10, 2000.
- **5.4.3.3-7** E. Siebel, "Handbuch der Werkstoffprüfung 2. Band, Prüfung der metallischen Werkstoffe", 2. Auflage, Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1955 Seite 211 und 212.
- **5.4.3.3-8** B.J. Lazan, "Fatigue of Structural Materials at High Temperatures", NATO Report 156, November 1957, Seite 1-27.
- **5.4.3.4-9** D.I.G. Jones, W.J. Trapp, "Influence of Additive Damping on Resonance Fatigue of Structures", Zeitschrift "Journal of Sound and Vibration" 17 (2), 1971, Seite 157-185.
- **5.4.3.3-10** D.I.G. Jones, "Two Decades of Progress in Damping Technology", Zeitschrift "Aircraft Engineering" January 1979, Seite 9-14.
- **5.4.3.3-11** "The Jet Engine", Fifth Edition, 1996, ISBN 0 902121 2 35, Seite 81.
- **5.4.3.3-12** H. Huff, "Die zulässige Beanspruchung bei Ermüdungsbeanspruchung", Zeitschrift "Materialwissenschaft und Werkstofftechnik", 32, 1-6, 2001.

- 5.4.3.3-13 S. Sikorski, R. Schönacher, M. Schober, "Vibration Damper for Rotor Housings", US-Patent 5,429,477 vom Jul.4, 1995, und Deutsche Patentschrift DE 43 29 014 vom 28.8.1993.
- **5.4.3.3-14** "Schwingungsdämpfer für die EJ200", Zeitschrift "MTU-Aktuell", September 2000 Seite 14.
- **5.4.3.3-15** J.F. Jeffers II, C.E. Meers Jr. "F100 Stall Flutter Problem Review and Solution", Zeitschrift "Journal of Aircraft", April 1975, Vol. 12, No. 4, Seite 350 357.
- 5.4.3.3-16 D.I.G. Jones, C.M. Cannont, "Control of Gas Turbine Stator Blade Vibrations by Means of Enamel Coatings", Zeitschrift "Journal of Aircraft", April 1975, Vol. 12, No. 4, Seite 226-230.
- 5.4.3.3-17 B.-K. Choi, J. Lentz, A.J. Rivas-Guerra, M.P. Mignolet, "Optimization of Intentional Mistuning Patterns for the Reduction of the Forced Response Effects of Unintentional Mistuning: Formulation and Assessment", ASME-Paper 2001-GT-393 der "International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition", New Orleans, LA, June 4-5, 2001 und Zeitschrift "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power", January 2003, Vol. 125, No. 4, Seite 131-140.
- **5.4.3.3-18** J.J. Marra, "Tuned-Mass Damper for Turbine Blades", Zeitschrift "NASA Tech Briefs", October 1993, Seite 99 und 100.
- 5.4.3.3-19 "Jane's All the World's Aircraft", 1995-96, ISBN 0 710 612 621, Seite 725.



Kerben begleiten den Konstrukteur durch sein gesamtes Berufsleben. Es gibt eine **Vielzahl unterschiedlicher Arten** (Bild 5.4.4-1). Nicht immer sind sie geometrisch bedingt und so dem Konstrukteur bewusst. Kerben sind insbesondere an dynamisch belasteten Bauteilen nach Möglichkeit zu vermeiden bzw. ihre Wirkung zu minimieren.

Kerben wirken durch ihre Form und Steifigkeitssprünge. Je schärfer der Kerbgrund bzw. je schroffer der Steifigkeitsunterschied, umso gefährlicher ist gewöhnlich ein Kerb für die Bauteilintegrität bei dynamischer Beanspruchung. Wie ein gekerbtes Bauteil auf statische Überlastung reagiert, hängt nicht zuletzt von der Zähigkeit des Werkstoffs ab (Bild 5.4.4-6).

Das besondere Problem geometrischer Kerben ist der **Abfall der Schwingbelastbarkeit** des Bauteils im Kerbgrund (Bild 5.4.4-2). Das ist die Folge formbedingter Spannungsspitzen. Wie stark sich dieser Effekt auswirkt, hängt besonders von der **Stützwirkung** ab (Bild 5.4.4-2). Dabei kommt es zu einem Abbau der Spannungsspitzen durch plastisches Fließen. Maßgebend ist das sog. **Spannungsgefälle** (Spannungsgradient, Bild 5.4.4-2, siehe auch Bild 4.3-11) und die **Zähigkeit** des Werkstoffs. Die plastische Verformung im Kerbgrund ist auch die Erklärung für ein scheinbares Paradoxon (Bild 4.3-11). Dies führt dazu, dass ein Schwingriss sich unter pulsierenden Druckkräften bildet. Das widerspricht anscheinend dem Grundsatz, dass zumindest ein ermüdender Zugspannungsanteil vorhanden ist.

Formkerben sind **nicht immer eine Schwachstelle** der Konstruktion. Es besteht z.B. die Möglichkeit sie vorteilhaft in sog. **Entlastungskerben** einzusetzen (Bild 5.4.4-2 und Bild 5.4.4-7). Sie minimieren Steifigkeitssprünge und/oder verteilen Spannungen. Dazu dienen z.B. sog. **Entlastungsbohrungen.** 

Ein weiteres Beispiel für 'nützliche Kerben' sind sog. **Sollbruchstellen** (Bild 5.4.4-7). Sie werden genutzt, um gefährliche **Folgeschäden zu vermeiden**. Ihre Auslegung erfordert viel anwendungsspezifische Erfahrung. Bei Überlast ist ein gezieltes Versagen durch Gewaltbruch zu gewährleisten. Dies bei ausreichend Sicherheit gegen einen Schwingbruch im normalen (Auslegungs-) Betriebsbereich.

Die Auslegung eines dynamisch belasteten Bauteils in Kerbzonen ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Im Leichtbau genügt es oft nicht, die geometrisch bestimmte Kerbzahl und die werkstoffabhängige Kerbwirkung zu betrachten (Bild 5.4.4-2), um das Bauteil-/Maschinengewicht zu minimieren. Eine Kombination computergestützter Berechnungsverfahren mit Werkstoffdaten und erfahrungsbasierten Parametern ist dazu eine anspruchsvolle Möglichkeit (Bild 5.4.4-3).



**Bild 5.4.4-1:** Kerben bestimmen häufig als Bereiche mit **Spannungskonzentrationen** die Lebensdauer eines Bauteils. Es besteht für den Konstrukteur die Aufgabe Kerbspannungen möglichst niedrig zu halten. Hierzu muss einem aber die **Kerbe bewusst** sein. Das erscheint nur auf den ersten Blick selbstverständlich. Kerben können sich auf doppelte Weise ungünstig auswirken. Sie vermindern die Ermüdungsfestigkeit und langgezogene Kerben können den Rissfortschritt orientieren und stark beschleunigen (Bild 5.4.4-4.1 bis Bild 5.4.4-4.3). Kerben treten in vielfältiger Art auf:

Formkerben/Steifigkeitskerbe ("1"): Es handelt sich um geometrisch bedingte Kerben. Sie beruhen auf zwei Effekten, dem Formeinfluss (Kerbradius, Bild 5.4.4-2) und/oder einem Steifigkeitssprung. Bereits "unscheinbare" Vergrößerungen des Kerbradius können die Kerbwirkung vermindern und damit die Lebensdauer entscheidend verlängern (Bild 5.4.4-2). Entsprechende Nacharbeiten des Radius bieten sich zumindest als Übergangslösungen in akuten Fällen an. Entlastungsbohrungen an Flanschen und Scheiben (Bild 5.4.4-2) oder Aussparungen (engl. scallops) sind in der Lage, Spannungen auszugleichen, d.h. gefährliche

Spannungsspitzen abzubauen (Bild 5.4.4-2). Formkerben können auch in weniger augenfälligen Bereichen wie an **Übergängen von Beschichtungen** wirksam werden. Mit der Haftfestigkeit, Festigkeit, Sprödigkeit und E-Modul der Schicht steigt die negative Auswirkung auf die Schwingfestigkeit.

**Bearbeitungskerbe** ("2"): Bearbeitungsübergänge unterschiedlicher Zerspanungsverfahren und Schaltstufen des Zerspanungsvorgangs können kerbartig wirken. Sie erzeugen an der Oberfläche einen **Sprung in Festigkeit** und **Eigenspannungszustand.** Dies gilt auch am Übergang zu **Verfestigungszonen** (z.B. Kugelstrahlen). Solche Bereiche sollten außerhalb dynamisch hochbeanspruchter Zonen liegen und nach Möglichkeit "weiche" Übergänge aufweisen.

Lösbare Fügungen ("3"): Bilden sich Formkerben können Mikrobewegungen den Schwingfestigkeitsabfall im Kerbbereich verstärken. Bei elastischer Verformung führen Mikrobewegungen zusätzlich zur Spannungserhöhung (Anstrengung) und Schädigung (Fretting, Kapitel 5.9.3). Ist ein Korrosionsmedium vorhanden (Pumpwirkung), besteht neben Passungsrost die Gefahr von Korrosionskerben (Lochfraß, Kapitel 5.5.1).

Fügungen(,,4"): Schweißnähte wirken auf mehrfache Weise als Kerben. Formkerben entstehen an unbearbeiteten Schweißnähten infolge Nahtüberhöhung und Einbrandkerben. Selbst wenn die Naht bearbeitet wurde, werden weitere Kerbeinflüsse wirksam. Am Übergang eines erstarrungsbedingten gerichteten Gussgefüges der Schweißung zum unbeeinflussten Grundwerkstoff (z.B. feinkörniges Schmiedematerial), entsteht eine Kerbwirkung (Gefügekerbe, Bild 5.4.2.1-8 und Bild 5.4.3.2-9). Festigkeits- bzw. Härteunterschiede und Eigenspannungen verstärken den Kerbeffekt. Lötungen wirken entsprechend ihrer gegenüber dem Grundwerkstoff unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften als Kerbe. Zusätzlich ist bei Lötungen immer mit Bindefehlern zu rechnen. Die Kerbwirkung von Lötungen zeigt sich in der geringen Scherfestigkeit weicher Lote ("Fischbüchseneffekt", Bild 3-13). Arteigene Lote wie **Hochtemperaturlote** weisen gewöhnlich eine hohe Festigkeit und ausreichende Härte auf. Ihre **Sprödigkeit** begünstigt jedoch die Wirkung von Kerben. Bei Lötungen ist deshalb auf geeignete entlastende Formgebung der Übergänge zu achten.

Kerbeinflüsse als Folge örtlicher Temperatureinwirkung ("5"): In der Fertigung (z.B. Hochgeschwindigkeitszerspanen, Schleifen, Trennen, Schweißen) aber auch im Betrieb (Anstreifvorgänge) können Metalltropfen entstehen. Treffen diese auf eine Bauteiloberfläche, kann diese in mehrfacher Weise geschädigt werden. Tropfen von Titanlegierungen sind besonders gefährlich. Während des Flugs durch die Luft brennen Titantropfen und heizen sich dabei auf. Ein festhaftender Tropfen kann als Formkerbe wirken. Aber selbst wenn der Tropfen nicht haften bleibt, kann das Gefüge des Grundwerkstoffs am Kontaktpunkt gefährlich verändert werden (Gefügekerbe):

- Versprödung (spröde Phasen, Oxidation),

Veränderung der Härte bzw. Festigkeit (Weichglühen, Aufhärten, Diffusionsvorgänge),
Zugeigenspannungen.

**Oberflächenkerben (,,6"):** Kratzer entstehen z.B. beim Handling (Fertigung, Montage, Wartung). Sie sind umso ernster zu nehmen je **kerbempfindlicher der Werkstoff** ist. Deshalb kann die Verwendung **von Stahlrohren statt Titanrohren** problematisch sein.

Risse in Beschichtungen sind in der Lage das Risiko besonders zu erhöhen (Bild 4.2-4 und Bild 4.2-5). Es steigt gewöhnlich mit der Schichtfestigkeit und Sprödigkeit. Das ist besonders beim Einfluss von Folgeschäden (z.B. Fremdkörpereinschlag=FOD) zu berücksichtigen (Bild 5.4.3.2-10). So sind im Bereich von Formkerben kritische Beschichtungen (z.B. Vernickeln und Verchromen) möglichst zu vermeiden. Dies gilt besonders in LCF-beanspruchten Bereichen, weil diese Lebensdauer bestimmend sind. Treten merkliche plastische Verformungen auf, lösen diese Risse in spröden Schichten aus (Bild 5.4.3.2-10 und Kapitel 4.2).

Innere Kerben ("7"): Es handelt sich gewöhnlich um Werkstofffehler. Typisch sind Risse, Poren und Lunker (Bild 5.4.3.2-8 und Bild 5.4.3.2-9). Auch Bereiche verminderter Festigkeit wie Seigerungen oder schroffe Gefügeübergänge (Bild 5.4.2.1-7 und Bild 5.4.2.1-8) wirken als Kerben. Eine besondere Problematik ist die schlechtere Auffindbarkeit der kleinen, bereits gefährlichen Kerben eines hochbelasteten Bauteils.

Bild 5.4.4-2 (Lit. 5.4.4-1 und Lit. 5.4.4-8): Dieses Bild gibt einen Eindruck über die Gestaltungsmöglichkeiten des Konstrukteurs für möglichst geringe Kerbwirkung. (siehe hierzu Bild 5.4.3.2-8). Die Kerbform beeinflusst die Spannungsüberhöhung in der Kerbe (Formzahl  $\alpha_{\mu}$ , Bild 5.4.3.2-8) und mindert somit die Schwingfestigkeit des Bauteils. Das Werkstoffverhalten findet sich in der Kerbwirkungszahl  $\beta_{\mu}$  wieder. Sie liegt tatsächlich als ermüdungsbestimmende Größe zwischen 1 und  $\alpha_{\mu}$ . D.h. der Werkstoff 'entschärft' die Kerbe. Dieser nutzbare Effekt wird umso geringer je spröder sich der Werkstoff verhält. In der Tendenz nimmt mit steigender Festigkeit bzw. Härte die Zähigkeit ab. So ist es verständlich, dass hochfeste Werkstoffe davon weniger profitieren können. Auch aus diesem Grund ist beim Einsatz höherfester Werkstoffe Vorsicht geboten (Bild 4.1-3).

Kerben lassen sich auch zur **Entlastung**, d.h. der Verminderung der Spitzenspannung nutzen (**Entlastungskerbe**). Der Schwingfestigkeitsabfall im Bereich eines Steifigkeitssprungs kann so minimiert werden. Im Rahmen oben wird dies mit umlaufenden Kerben erreicht. Die Skizze oben links zeigt die Rotorscheibe einer Gasturbine mit zusätzlichen **Entlastungsboh**rungen.

Es gibt eine Reihe von Effekten welche die Wirkung der Kerben beeinflussen:

- Stützwirkung (Skizzen unten): Wird in der Kerbe bei statischer Belastung die Fließgrenze überschritten, verformt sich dieser Bereich plastisch. Die Spannungsspitze baut sich ab. Dabei spielt das Spannungsgefälle/-gradient  $\chi$ eine Rolle (Bild 5.4.3.2-8). Der steilste Gradient liegt im Bereich der Spannungsspitze im Kerbgrund. Die Last übernehmen tiefer liegende Zonen. So wird der Kerbgrund gestützt. Diese Wirkung ist von der Stützziffer ( $\alpha_{k} / \beta_{k}$ ) gekennzeichnet. Nach dem Entlasten herrschen in den plastischen verformten Zonen Druckspannungen. Zusätzlich sind diese werkstoffspezifisch kaltverfestigt. Damit wird die Schwingfestigkeit (Reduzierung der Mittelspannung, Bild 5.4-11) im Kerbbereich angehoben (siehe auch Bild 5.4.1.1-9).

- Temperatureinfluss: Kriecht bzw. relaxiert der Werkstoff (Kapitel 4.5.1.1) bei erhöhter Temperatur im Kerbgrund, werden ebenfalls Spannungsspitzen bis zur Kriechgrenze abgebaut. Der Effekt hängt von Temperatur und Zeit ab. Er ist auch bei schwingender Beanspruchung zu beobachten. So senken Kerben bei erhöhter Temperatur ähnlich der Stützwirkung die Schwing festigkeit weniger ab (Bild 5.4.3.2-4, und Bild 5.3.2-10). Der Effekt einer Kaltverfestigung ist jedoch beim Kriechvorgang nicht zu erwarten (Bild 5.3.2-8).

- Korrosionseinfluss: Spannungsrisskorrosion (SpRK, Kapitel 5.6.3) tritt erst bei einer werkstoffspezifischen Mindestzugspannung auf. Wegen der Spannungsspitze in der Kerbe kann diese bereits (bei statischer Belastung) einreißen, wenn der glatte Querschnitt offenbar ungefährlich niedrig belastet ist. Typisch sind SpRK-Riss/Brüche in Schraubengewinden (5.6.3.1.1-6). Fortsetzung auf Seite 5.4.4-6



Probleme der Maschinenelemente



Fortsetzung von Seite 5.4.4-4

Kerben lassen sich auch zur **Entlastung**, d.h. der Verminderung der Spitzenspannung nutzen (**Entlastungskerbe**, Bild 5.4.4-1). Der Schwingfestigkeitsabfall im Bereich eines Steifigkeitssprungs kann so minimiert werden. Im Rahmen oben wird dies mit umlaufenden Kerben erreicht. Die Skizze oben links zeigt die Rotorscheibe einer Gasturbine mit einer Entlastung durch zusätzliche **Entlastungsbohrungen**. Bild 5.4.4-3 (Lit. 5.4.4-3): Besonders beim *Leichtbau* (*Kapitel 3*) *stellt sich die Forderung* nach hoher Lebensdauersicherheit. Der Nachweis erfordert Berechnungen und Versuchstechnik. Häufig sind diese in einem iterativen Prozess verknüpft. Auf diese Weise entsteht wichtiges produktspezifisches Know How. Konzepte in historischer Reihenfolge sind: - Nennspannungskonzept, Örtliches Konzept, Bruchmechanisches Konzept, Strukturspannungskonzept. Diese konnten offenbar nicht befriedigen. Das führte für komplexe Bauteilgeometrien zum dargestellten "örtlichen Spannungskonzept auf Gradientenbasis". Das Schema vermittelt einen Eindruck über die Komplexität der Aufgabe. Es handelt sich um

einen Ansatz welcher der Aufgabe gerecht er-

scheint. Wenn man diese Vielzahl an sich zum Teil gegenseitig beeinflussender Größen betrachtet, erscheint die Aufgabe noch schwerer. Man erkennt, dass Erfahrungen mit dem Produkt (Geometrie, Betriebsbelastungen und Werkstoffverhalten (z.B. Festigkeit, Duktilität) in diesen Nachweis eingehen müssen. Ausreichende **erfahrungsbasierte Kenntnisse** sind deshalb eine Voraussetzung.

Dazu muss das lokale elastoplastische Werkstoffverhalten (LCF, Bild 5.4.1.1-5 und Bild 5.4.1.1-7) bekannt sein. Das Verfahren erfordert die Übertragbarkeit von Werkstoffwöhlerlinien auf Bauteilwöhlerlinien. Das erfolgt hier mit Hilfe der Stützwirkung (Bild 5.4.-14 und Bild 5.4.3.2-8). Dabei spielen viele Einflüsse eine Rolle (kein Anspruch auf Vollständigkeit):

- **Beanspruchungsart** (Zug/Druck, Biegung, Torsion)

- Geometrie und Größe (Oberfläche, Volumen, Bild 4.3-19, Bild 5.4.3.2-2). Davon wird die bauteilspezifische Fehlerwahrscheinlichkeit (z.B. Gusslunker, Einschlüsse- Lage und Orientierung, Bild 5.4.3.2-8) beeinflusst.

- *Mittelspannung*. Hierzu gehören auch Eigenspannungen, z.B. in Schweißkonstruktionen oder LCF-beanspruchten Bauteilen (Bild 5.4.1.1-9).

- *Mehrachsige Belastung* (z.B. rotierende Scheiben und Kerben). Siehe hierzu auch Lit. 5.4.4-14.

- Schichten: Hier spielen Effekte wie Verfestigung (Kugelstrahlen, Rollen) und Eigenspannungen eine besondere Rolle. Bei Beschichtungen ist der Einfluss auf Festigkeit, Härte und Duktilität (Bild 5.4.3.2-10) und damit auf die Schwingfestigkeit zu berücksichtigen (Kapitel 4.2).

- Lastfolge (Bild 5.4-12, Bild 5.4-13, Bild 5.4.1.2-2 und Bild 5.4.3.2-12). Werkstoffspezifische Parameter wie Frequenz ud Haltezeit (obere, untere) sind von großer Bedeutung. - Topografie (z.B. Bearbeitungsriefen, Bild 5.4.3.2-5 und Bild 5.4.3.2-6, Anätzungen, Bild 5.6.1-3, Bild 5.6.1-4.1 und Bild 5.6.1-3). - **Temperatur**: Kapitel 5.3, Kapitel 5.4.2 und Bild 5.4.3.2-4.

- Korrosion: Kapitel 5.6.1 und Kapitel 5.6.2.





Bild 5.4.4-4.1 und Bild 5.4.4-4.2 (Lit. 5.4.4-12): In diesem Bild sind typische Schwingbruchflächen zusammengestellt (siehe auch Bild 4.4-5 und Bild 4.4-6). Einige Effekte sind erkennbar:

- Bruchausgang/-ausgänge (Anrisszonen) sind von Stufen in Fortschrittsrichtung gekennzeichnet ("Schießscharten", Bild 4.4-2, Bild 4.4-3 und Bild 5.4.4-4.3, Lit. 5.4.4-11). Sie entstehen aus parallelen Anrissen, die sich mit wachsendem Riss vereinigen.

- Dieser wächst konzentrisch. Abweichungen sind auf Kerbwirkung zurückzuführen.

- Kerbwirkung führt zu einem Vorlaufen des Risses längs dem Kerbgrund. So kommt es zu einem, je nach Stärke der Kerbwirkung, ausgeprägten 'Sichelmond'.

- Belastungsart: Einseitige Biegung unterscheidet sich von beidseitiger durch <u>einen</u> Anriss der Schwingbruchfläche. Bei örtlicher Kerbwirkung ähnelt die Bruchfläche von Umlaufbiegung der dynamischer Zugbeanspruchung. Mit steigender Kerbwirkung am Umfang entsteht ein Sichelmond bis zur konzentrischen Risszone. Bei **Torsion** bildet sich im Grund der Kerbe ein gezackter Rissverlauf (Fräserbruch, Skizzen unten, Bild 5.4.4-4).

- **Belastungshöhe**: Das Flächenverhältnis zwischen Schwingbruch und Restbruch (Gewaltbruch) vermittelt einen Eindruck. Je größer der Restbruchanteil umso höher die Belastung.



# Die Kerbschlagzähigkeit ist vom Konstrukteur bei Werkstoffauswahl und Bauteilsicherheit zu berücksichtigen.



Bild 5.4.4-5 (Lit. 5.4.4-4, Lit. 5.4.4-11 und Lit 5.4.4-13): Die Kerbschlag(biege)zähigkeit ist für den Konstrukteur ein wichtiger Werkstoffkennwert. Sie dient nicht direkt der Auslegung sondern der Werkstoffauswahl. Unter normalen Betriebsbedingungen muss der Werkstoff eine ausreichende Zähigkeit aufweisen, um örtliche Überlastungen im plastischen Bereich abzubauen. Wieviel jedoch erforderlich ist, sagt die bauteilspezifische Erfahrung. Die Kerbschlagzähigkeit tritt dann schadenswirksam in Erscheinung, wenn hohe Belastungsgeschwindigkeiten (Stoß) einwirken. Dies ist bei äußeren Beanspruchungen (z.B. Schlagloch), als Folge eines Schadens (z.B. Zahnradbruch) oder bei Fremdkörpereinwirkung (zwischen Zahnrädern, Vogelschlag, Containment/ Bruchstückaufschlag) zu erwarten.

Die Kerbschlagzähigkeit wird mit genormten Versuchen an gekerbten Proben ermittelt ("A" und "D"). Die zum Bruch notwendige Schlagarbeit wird mit einem Pendelhammer bestimmt. Neben diesem Wert gibt die Auswertung der Bruchfläche Hinweise auf das Werkstoffverhalten.

Makroskopischer Befund (Bild 4.4-2, Bild 4.4-5 und Bild 5.2.1-5): Ein Sprödbruch ("B1"), d.h. ohne merkliche plastische Verformungen zeigt, dass der Werkstoff sich in der Tieflage ("D", Lit. 5.4.4-13) befindet. Er sollte für eine solche Betriebstemperatur nicht verwendet werden.

Im Steilabfall (",**D**") weist die Bruchfläche in der Mitte Gewaltbruchmerkmale auf (",**B2**"), die sich deutlich von dem umgebenden Sprödbruch/Mischbruch abheben. Im Zweifelsfall kann eine mikroskopische Untersuchung Klarheit schaffen (Bild 2.2.2.4-3).

Ein Zähbruch mit deutlichen plastischen Verformungen, insbesondere einer seitlichen Einschnürung ("B3") tritt in der Hochlage ("D") auf. Für diesen Bereich als Betriebstemperatur und darüber ist er für die fragliche Konstruktion als Werkstoff geeignet.

*Mikroskopischer* (*REM*, *Bild* 2.2.2.4-3 und Bild 4.4-3) **Befund**: Spröde Bruchflächenzeigen sich als **Quasi Spaltbrüche**. Ihr Erscheinungsbild sind glatte rosettenartige Zonen ("CI"). Ausgeprägte Zähbrüche haben dagegen typische Zipfelbildung (Dimpels, ("C2")). Die Kerbschlagzähigkeit reagiert auf viele Einflüsse ("E") die sich auch gegenseitig beeinflussen (Diagramm unten). So lassen sich mit allem Vorbehalt nur Tendenzen angeben. Zu erwarten ist ein Zusammenhang zwischen der Bruchzähigkeit und der Kerbschlagarbeit. Der entscheidende Unterschied ist, dass die bruchmechanische Probe statt einem Kerb einen Anriss aufweist (Bild 5.2.1-7). Ein Riss reagiert auf viele Einflüsse deutlich empfindlicher. Das liegt auch an Unterschieden der plastifizierten Zonen (Bild 4.3-5). Trotzdem gelang offenbar die Ermittlung der Bruchzähigkeit aus Kerbschlagbiegeversuchen mit befriedigender Genauigkeit (Lit. 5.4.4-5).

**Bild 5.4.4-6:** Bei statischer Überlastung, wie sie während hoher Überdrehzahlen (Zugbeanspruchung) oder extremen Anstreifvorgängen (Biegebeanspruchung) auftritt, hängt der Bruch eines Bauteils nicht zuletzt von der Zähigkeit des Werkstoffs und eventuellen Kerben bzw. Spannungsgradienten ab. Spröde Werkstoffe reagieren empfindlicher auf Kerben als zähe. Deren Plastifizierung ermöglicht einen Spannungsabbau und dadurch eine gleichmäßigere Belastung des höchstbeanspruchten Querschnitts. Dies führt zu verblüffendem Bauteilverhalten: Eine gekerbte Probe aus einem zähen Werkstoff hält bei statischer Last mehr als eine glatte Probe (Skizze rechts) mit einem dem Kerbgrund entsprechenden Durchmesser. Das erklärt sich mit der behinderten Dehnung (mehrachsiger Spannungszustand), d.h. geringeren Einschnürung im Kerb.

Anders ein **spröder Werkstoff**. Hier kann die gekerbte Probe die Kerbspannung nicht plastisch abbauen. Sie bricht früher als die glatte Probe gleichen Prüfquerschnitts (Skizze links).

# Vom spröden oder zähen Werkstoffverhalten hängt es ab, wie das gekerbte Bauteil bei Überlastung reagiert.

Voraussetzung: Statische Beanspruchung und gleicher Mindestquerschnitt

#### spröder Werkstoff



Der glatte Stab kann sich bei dem spröden Werkstoff nicht einschnüren. Die Spannungserhöhung in der Kerbe kann vom spröden Werkstoff nicht durch plastische Verformung abgebaut werden. Der gekerbte Stab versagt bei niedrigerer Belastung als der glatte Stab.

Werkstoffwechsel müssen auch unter dem Gesichtspunkt einer Überlastung kritisch geprüft werden. Geschieht dies nicht, besteht die Gefahr, dass Bauteile bereits bei unvorhergesehenen kleineren Überlastungen versagen oder Schäden bei Überlast unakzeptabel groß werden.

Ein solcher Fall kann z.B. eintreten, wenn von einem zähen vielkristallinen Werkstoff auf einen unter hohen Verformungsgeschwindigkeiten spröder reagierenden Einkristall-Werkstoff übergegangen wird. Damit wird z.B. ein Bruch aller Schaufeln, der sog. "Haircut", begünstigt.

Ausgeprägtes zähes Verhalten kann sich frühzeitig warnend in einem veränderten Betriebsverhalten, z.B. einer Unwucht bemerkbar machen. Der 'Sicherheitsabstand' eines Bauteils gegen Bruch bei Überlastung bzw. Überdrehzahl hängt also merklich von der Zähigkeit des Werkstoffs ab. Verändert sich das Werkstoffverhalten bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen merklich, sollte dies bei Containmentbetrachtungen (Bild 3-15) oder einer versuchstechnischen Berstdrehzahlermittlung berücksichtigt werden. zäher Werkstoff



Bild 5.4.4-7 (Lit. 5.4.4-2): Kerben lassen sich in sog. Sollbruchstellen vorteilhaft nutzen. Um im sicheren Betrieb einen Gewaltbruch bei außergewöhnlicher Überlast zu gewährleisten, ist viel bauteilspezifische Erfahrung notwendig (Skizzen oben). Ein Beispiel sind Anschlusswellen von Anbaugeräten (Generatoren, Starter, Regler, Pumpen) an Flugtriebwerksgetrieben  $(,, C^{"})$ . Trotz Erfahrung und anspruchsvoller Auslegung kommt es zumindest in der Erprobungsphase immer wieder zu unvorhergesehenem Versagen. Erst der Betrieb bestätigt hier die Auslegung. Das kann im Schadensfall äußerst zeit- und kostenaufwändig werden. Es ist sicherzustellen, dass nicht zusätzliche Einflüsse wie Korrosion oder **Verschleiß** eine Fehlfunktion (Schwingbruch) auslösen. Natürlich ist Werkstofffestigkeit und -zähigkeit auf die Anwendung abzustimmen (siehe auch Bild 5.4.4-6).

Das gilt auch für **gezielte Schwächungen** (z.B. Prägen bei Blechen (,D", ,E", ,G", ,F"). Hier dürfte ein Problem in der gleichmäßigen Fertigungsqualität liegen.

Bei Aufhängungen die Übertragungskräfte begrenzen sollen kommen **Scherbolzen** sowohl für Langzeit ("B") als auch für Kurzzeit ("A") zum Einsatz. Sie unterliegen an den Aufnahmen einem großen Steifigkeitssprung mit Scherung. Der Langzeiteinsatz ist erfahrungsgemäß



(Lit. 5.4.4-2) besonders anspruchsvoll. Schwingverschleiß (Kapitel 5.9.3) und Korrosion (Kapitel 5.6.3.1 und Kapitel 5.6.3.2) dro-

hen die hochfesten Stähle zu schädigen und Betriebsbrüche auzuslösen.

### Literatur 5.4.4

- **5.4.4-1** G. Vouros, "Begutachtung von Maschinenschäden aus der Sicht eines Konstruktions-, Betriebs- und Service-Ingenieurs", Books on Demand GmbH, ISBN 3-8311-1475-7, 2001, Seite 391.
- **5.4.4-2** A.Rossmann, "Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken" Band 2, Kapitel 8.1, Kapitel 10 und Band 3, Kapitel 13".
- **5.4.4-3** W.Eichlseder, A.Werkhausen, B.Unger, "Beurteilung der Betriebsfestigkeit basierend auf Strukturspannungen und Einflussparametern", Proceedings des 19. CAD-FEM User's Meeting 2001, Internationale FEM-Technologietage, 17.-19. Oktober 2001, Potsdam, Deutschland, Seite 1-7.
- **5.4.4-4** M.Marx, "Bruchmechanik, Kapitel 6 Anwendung der Bruchmechanik", Vorlesungsscriktum, Stand 2010, www, Universität des Saarlands, Seite 1-21.
- **5.4.4-5** H.-J. Schindler, "Abschätzung der Bruchzähigkeit aus der Bruch- oder Kerbschlagarbeit", WWM, Universität des Saarlands, Seite 1-17.
- **5.4.4-6** F.Bergner, "Zähigkeitsprüfung intermetallischer Phasen", Forschungszentrum Rossendorf e.V., Bericht FZR 92-07, Mai 1992, Seite 1-24.
- **5.4.4-7** M.Schaper, "Kerbschlagbiegeversuch", Praktikum 3 zur Vorlesung Werkstofftechnik VVT, TU-Dresden, IfWW, Seite 3.1-3.4.
- **5.4.4-8** Th.Sandner, "Kerbwirkungszahl  $\beta_k$ ", Vorlagen zum Fach Festigkeitslehre, FH Nürnberg, Seite Bl. 99.
- **5.4.4-9** P.Ermanni, "Kapitel 3 Kerbwirkung", Vorlesungsunterlage 151-0303-00L, www.structures.ethz.ch, Stand Aug.2010, Seite 31-45.
- **5.4.4-10** "Failure Analysis and Prevention", Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11, American Society for Metals (ASM), ISBN 0-871170-007-1, 1986, Seite 22-23 und 54-71.
- **5.4.4-11** L.Engel, H.Klingel, "Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden", 2. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien, ISBN 3-448-13416-6, 1982, Stand Aug.2010, Seite 15, 38-42 und 49.
- **5.4.4-12** E.J.Pohl, "The Face of Metallic Fractures", Volume II, Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, , Seite 86-167.
- **5.4.4-13** T.Ramm, C.Below, M.Reddemann, A.E.Khamis, "Kerbschlagversuch", Praktikum Werkstoffkunde I, Fachhochschule Köln, 2009, Seite 1-13.
- 5.4.4-14 -H.G Hochleitner, "Bauteilauslegungsproblematik für den mehrachsigen Spann ungszustand", Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrft (ÖIAZ) 137. Jg., Heft 9/1992, Seite 435-439.

# Sachregister

### A

**Abbohren von Rissen** 5.4.2-4, 5.4.2-8 Abdichten von Heißteilen 5.4.2-1 Abdruck mit Folien oder Abdruckmassen 5.3-19 Abfließen der Vogelmasse bei Vogelschlag 5.2.2-18 Druck 5.2.4-6 Abgas Leitung Joukowski-Stoß 5.2.5-6 kollabieren einer dünnwandigen 5.2.5-6 Strömungsabriss in 5.2.5-6 System 5.4.2.1-3 Abgekürzte Versuche bei Schwingbeanspruchung 5.4 - 7Abhilfe bei HCF-Schäden 5.4.3.3-1 LCF-Schäden 5.4.1.2-8 Auslegung 5.4.1.2-9 Fertigung 5.4.1.2-9 Konstruktion 5.4.1.2-9 Qualitätssicherung 5.4.1.2-10 Werkstoffauswahl 5.4.1.2-8 Thermoermüdung 5.4.2-1 Zeitstandschäden 5.3.2-16 Ablagerungen entfernen in Rohrleitungen mit Stoßwellen 5.2.4-8 Ablösung von Belägen Dämpfungsverlust 5.4.3.1-6 durch Stoßwellen 5.2.4-8 Abnahmepflichtige Bauteile 5.4.1-2 Abschätzung der Restlebensdauer 5.2.1-16 bei Zeitstand 5.3.2-20 Schädigung 5.4.3.2-18 Zeitstand 5.3.2-20 zulässige Fehlergröße 5.4.1-9 Abschreckphase, Rissbildung in der 5.4.2.1-8 Absperrschieber, Belastung durch Druckstoß 5.2.4-10 Aerodynamische Anregung führt zu Orbiting 5.4-15 Aeroelastische Vorgänge Anregung von Labyrinthen 5.4-18 Instabilität. Siehe Flattern Schwingung 5.4-18 Ährenfeldschwingung 5.4.3.1-9 α k. Siehe Formzahl Al-Legierungen, Temperatur-Einsatzgrenze 5.3.2-3 Allradantrieb, Viskositätskupplung 5.2.3-2 **Alternative Technologieen** Energien, Betriebstempeaturen 5.3-6 Kraftstoffe 5.3.1-1

Alterungssprödigkeit bei Metallen 5.3-5 Aluminiumlegierung Gehäuse 5.2.2-5 LCF 5.4.1.2-7 Anbaugeräte experimentelle Schwingungsanalyse 5.4.3.3-8 Schwingung 5.4.3.3-8 Anlauffarben 5.3-21 Einfluss von Verschmutzung 5.3-13 Temperaturabschätzung 5.3-13 Anregung von Schwingungen Effekte 5.4-15 Mechanismen, Rückschlüsse auf 5.4.3.1-12 Zerstörungsfreie Prüfung 5.4-2 Kennlinie 5.4-14 Lastwechsel bis bei LCF 5.4-10 Anriss Zerstörungsfreie Prüfung 5.4.1-2 Kennlinie 5.4.1-14 Lastwechsel, LCF 5.4.1-10 Phase 5.3.1-2, 5.4.1-14 bei Schwingermüdung 5.4-4 Anschlussstutzen, konstruktive Gestaltung 5.4.2.1-13 Anschlusswelle, Sollbruchstelle 5.4.4-12 Anschmelzung bei Überhitzung 5.3-13 durch Eingießlegierungen 5.3-17 Titanlegierung 5.2.2-6 Anstreifen Turboladerrad 5.3-20 Schaufelspitzen, Schwingerregung 5.4.3.1-4 Spuren bei Schwingung 5.4-21 Verhalten bei Kriechverformung 5.3.2-14 Vorgänge 5.3-20 Schwingungsanregung 5.4-14, 5.4-18 Atmen von Bauteilen (elastische Verhalten) 5.4.2-8 Atomarer Wasserstoff 5.3-9 Diffusion in Metalle 5.3.1-3 Aufdampfschicht, Thermoermüdungsverhalten 5.4.2.1-12 Aufdrehen von Rotorschaufelblättern 5.3.2-14 Aufgelöster Kranz an integralem Turbinenrad gegen Thermoermüdung 5.4.2-6 Aufgespritzte Schmelzperlen, Überhitzungsmerkmal 5.3-13 Auflösung von Kunstatoffen 5.3.1-8 Aufschlag von Festkörpern 5.2.2-1 Kontaktfläche eines Bruchstücks 5.2.2-10 Ausfrieren von Alkohol 5.3-7 Aushärtungsphase in Ni-Legierungen 5.3.2-2 Auslassventil, Thermoermüdung 5.4.2.1-3

Auslegung, Berücksichtigung von Betriebsatmosphäre 5.3.1-3 Containment 5.2.2-6 LCF-Belastung 5.4.1-2 Erkennen 5.4.1.2-1 Temperaturerhöhungen außerhalb dem Üblichen 5.3.2-6 Thermoermüdung 5.4.2-3 Werkstoffkennwerte/-daten 5.3.2-18, 5.4.1-10 als Schadensursache 5.4.3.2-5 HCF 5.4.3.2-1 Schwingfestigkeit 5.4.3.3-2 Thermoermüdung 5.4.2-10 Zeitstand 5.3.2-16 Auslegungsphilosophie 5.4-9 Schwingfestigkeitsabschätzung 5.4.3.2-6 Auspuffanlage 5.4.2.1-4 Ausscheidungen bei Langzeit Temperatureinfluss 5.3-5 Ausschwitzen von Material bei Überhitzung von Sinterwerkstoffen 5.3-13 von Lotperlen 5.3-13 äußerer Befund, thermische Schädigung 5.3-11 Austenitischen Stähle, Niedertemperaturverhalten 5.3-7 axf-Wert (Kennwert für Schwingfestigkeit) 5.4.3.2-11 Axiale Abstände zwischen Rotor- und Statorschaufel, Einfluss auf Schwingungen 5.4.3.3-9 Axialflansche, Rissbildung durch Thermoermüdung

5.4.2.1-13

### B

Bauteil Bruchmechanisches Verhalten 5.3.1-5 Größe, Einfluss auf Rissfortschritt 5.4-28 Riss Lage 5.3-11 Orientierung 5.3-11 Prüfung, betriebsgleiche Bruchlage 5.3.2-18 Rotierend 5.4.2.1-4 Übertragbarkeit von Werkstoffwöhlerlinien 5.4.4-7 Verhalten, dynamisches, Einfluss der Kriechverformung 5.3.2-14 Beanspruchung, Abhängigkeit der Dämpfung 5.4.3.3-21 Bearbeiten/Bearbeitung Zugeigenspannungen 5.3-21 Einfluss auf Schwingfestigkeit 5.4.3.2-2, 5.4.3.2-6, 5.4.3.2-9 Schutzvorrichtungen 5.2.2-2 Begriffserklärung HCF und LCF 5.4.1-7 Beherrschbarer Schaden 5.4.2-1 Behinderte Wärmedehnung, Thermoermüdung 5.4-18, 5.4.2-1

Beläge, Ablösung, Einfluss auf Dämpfung 5.4.3.1-6 Belastung Abschätzung aus Bruchfläche 5.4.4-9 dehnungsgesteuert 5.4-10 Einfluss von Haltezeiten 5.4-26 Geschwindigkeit Einfluss auf Bruchdehnung 5.2.2-6 Einfluss auf Kerbschlagzähigkeit 5.4.4-6 Werkstoffverhalten 5.2.1-10 Mechanisch-thermisch 5.4-23 Militärische Anwendungen 5.4-1 Nachträgliche Steigerung, Risiken 5.4-2 Stoßartig 5.2.2-6 Thermoermüdung, Belastungsmodell 5.4.2.1-6 Benzinschlag 5.2.4-1, Schaden an Pleuel 5.2.4-2 Kolben 5.2.4-2 Beschädigungen, Ursache für LCF 5.4.1.2-2 Beschichtung Dämpfungswirkung 5.4.3.3-24 Einfluss auf Thermoermüdung 5.4.2.1-10 Einfluss von Eigenspannungen 5.4.1.2-5 Kriecheinfluss 5.3.2-14 LCF-Beanspruchung 5.4.1.2-5 Schwingfestigkeit des Bauteils 5.4.3.2-16 Schwingungsdämpfung 5.4.3.3-16 Thermoermüdung 5.4.2-10 Übergänge, Kerbwirkung 5.4.4-3 Zeitstandschädigung 5.3.2-22 Betastrahlung. Siehe Elektronenstrahlen Beton, Viskositätsverhalten, Vibrationsverteiler 5.2.3-2Betriebsatmosphäre 5.3.1-1 Berücksichtigung bei Auslegung 5.3.1-3 Einfluss auf Faserverstärkte Kunststoffe 5.3.1-10 Einfluss auf unverstärkte Kunststoffe 5.3.1-8 Betriebsbelastung nicht ausreichend bekannt 5.4.1.2-2 Zeitstandbeanspruchung durch 5.3.2-16 Betriebsbruch. Auswerten 5.4.3.3-2 **Betriebseinfluss** Festigkeitsabfall 5.4.1.2-2 Thermoermüdung 5.4.2.1-9 Betriebstauglichkeit Bewertung bei Thermoermüdung 5.4.2-3 Grenzwerte 5.4.2-3 **Betriebsversuch** 5.1-2 Biegeproben, Festigkeiten 5.2.1-13 Biegeschwing Biegeschwingung Belastungsverteilung 5.4.3.2-10 Bruch einer Welle 5.4-20 Verdichterschaufeln 5.4.3.1-2 Biegung, Bruchmerkmal für einseitige 5.4.4-9

Bingham-Körper 5.2.3-6 **Blade passing frequency** 5.4.3.1-4 Bläschenkrankheit 5.3.1-11 Blattgeometrie Einfluss auf die Dämpfung 5.4.3.3-20 Blechstrukturen Dämpfung 5.4.3.3-18 Blei Lötrissigkeit 5.3-21 Bling 5.4.3.3-1 Blisk 5.4.3.3-1 Schwingungen 5.4.3.1-17 **Bodenvortex** Schwingerregung 5.4.3.1-4 **Bohrung** Schwachstellen Fertigungsbedingt 5.4.1-15 Schwachstellen in der Wand 5.4.1-15 Bohrungen Fretting 5.4.1-16 Grate 5.4.1-15 Korrosion 5.4.1-16 LCF 5.4.1-5 Rissprüfung 5.4-16 Schäden durch Handling 5.4.1-15 Montage 5.4.1-15 Boys-Resonator 5.4-19 Bremse Thermoermüdung 5.4.2.1-4 Viskosität bei Viscobremse 5.2.3-2 Bremsscheibe, 'thermische' Schwingung 5.4-23 Brennkammer Gehäuse 5.4.2.1-13 Verbrennungsvorgang 5.4-19 Brennstoffzelle 5.3-7, 5.3.1-3 Bronze, auslösen von Lötrissigkeit 5.3-22 Bruch Ausgang Identifikation 5.4.4-9 Schießscharten als Merkmal 5.4.4-9 Kupplungsscheiben 5.2.2-2 Schwungscheiben 5.2.2-2 Sicherheitsabstand 5.4.4-12 Bruchbild, temperaturbeeinflusst 5.3-12 Bruchdehnung Bei hoher Belastungsgeschwindigkeit 5.2.2-6 temperaturabhängig 5.3-2 Bruchfläche Abschätzung der Belastungshöhe 5.4.4-9 Auswertung, REM 5.3-19 Lage, Bauteilprüfung 5.3.2-18 Makroskopischer Befund 5.4.4-11 Merkmal für einseitige Biegung 5.4.4-9 Kerbwirkung 5.4.4-9

Torsion 5.4.4-9 Umlaufbiegung 5.4.4-9 Oxidation 5.3-12 Sprödbruch 5.4.4-11 Bruchkriechdehnung 5.3.2-6 Bruchmechanik Einsatzmöglichkeiten 5.2.1-1, 5.2.1-11, 5.2.1-16 linear elastische 5.2.1-8 Probe 5.4.4-11 Verhalten von Bauteilen 5.3.1-5 Bruchstückaufschlag Hochgeschwindigkeitsbelastung 5.2.2-2 Kontaktfläche 5.2.2-10 Mindestdurchschlagsgeschwindigkeit 5.2.2-10 Verhalten von Stählen 5.2.2-11 **Bruchverhalten** Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit 5.2.1-7 querschnittsabhängiges 5.2.1-7 Bruchvorgänge 5.2.2-1 Bruchzähigkeit Ermittlung aus Kerbschlagbiegeversuch 5.4.4-11 Zusammenhang mit Kerbschlagarbeit 5.4.4-11 Brückenfahrbahn, Schwingung 5.4-19

# C

Campbelldiagramm 5.4.3.1-5 Chemische Beständigkeit von Kunststoffen 5.3.1-8 Clapper (Schaufelabstützung) 5.4.3.1-9 Cleavage cracks. Siehe Spaltfläche COD-Konzept (Crack Opening Displacement) 5.2.1-Constrained layer damping. Siehe Dämpfungsfolien Containment (Durchschlagswiderstand) 5.2.1-15, 5.2.2-13 Abschätzung der Wandstärke 5.2.2-3, 5.2.2-13 aus Keramik/Kunstfaserlaminat 5.2.2-9 Auslegung 5.2.2-6 Einfluss von Schweißungen 5.2.2-13 Energieaufnahme 5.2.2-9 Nachweis 5.2.2-6 Werkstoffe, Festigkeitsbereiche 5.2.2-8 Crack opening displacement. Siehe COD-Konzept Crashvorgänge 5.2.2-1 CrNi-Stähle, Stabilisierung gegen Korrosion 5.3-5

# D

Dämpferdraht 5.4.3.3-16
Dampfmaschine
Flüssigkeitsschlag, Wasserschlag durch Kondenswasser 5.2.4-1, 5.2.4-2

Dampfschlag 5.2.4-7, 5.2.4-8, 5.2.4-12
bei Solarthermie 5.2.4-8
durch Kondensat 5.2.4-8
Dampfturbine, Wasserschlag 5.2.4-4

Dämpfung 5.4-10

Abhängigkeit von Beanspruchung 5.4.3.3-21 Eigenspannungen 5.4.3.3-21 Schwingermüdung 5.4.3.3-21 Schwingungsform 5.4.3.3-20 Blechstrukturen 5.4.3.3-18 dispersionsgehärtete Legierung 5.4.3.3-16 durch Elektro- und magnetorheologische Fluide 5.4.3.3-27 durch Impulse 5.4.3.3-27 durch Magnetrostriktive Werkstoffe 5.4.3.3-27 durch Reibung 5.4.3.3-12 durch Umgebungsluft 5.4.3.1-17 Eigendämpfung 5.4.3.3-16 Einfluss auf Schwingung 5.4.3.1-6 der Blattgeometrie 5.4.3.3-20 der Frequenz 5.4.3.3-21 der Schwingform 5.4.3.3-20 der Temperatur 5.4.3.3-23 Faserverstärkte Kunststoffe 5.4.3.3-23 Frequenzeabhängigkeit 5.4.3.3-24 gebaute Strukturen 5.4.3.3-17 Gusseisen 5.4.3.3-21 Hoch dämpfende Legierungen 5.4.3.3-27 Innere 5.4.3.3-12 integrale Bauteile 5.4.3.3-17 konstruktiv 5.4.3.3-16 Magnetische Werkstoffe 5.4.3.3-26 mit Zwischenlagen 5.4.3.3-12 mit einer Bandage 5.4.3.3-16, 5.4.3.3-12, 5.4.3.3-29 mit Email 5.4.3.3-12 mit Folien 5.4.3.3-12 mit Klappernieten 5.4.3.3-27 mit Partikeln 5.4.3.3-16, 5.4.3.3-27 Passive 5.4.3.3-16, 5.4.3.3-18 Rohrleitung 5.2.4-9 Umgebungsluft 5.4.3.3-19 Verschlimmbesserung 5.4-12 Volumenabhängigkeit 5.4.3.3-20 von Beschichtungen 5.4.3.3-24 von Elastomeren 5.4.3.3-23 von Kunstharzen 5.4.3.3-23 von Schwingungen 5.4.3.3-12 von viskosen Fluiden 5.4.3.3-26 Wirkung des Piezoeffekts 5.4.3.3-26 Zwischenlagen 5.4.3.3-12 Dämpfungsbandage 5.4.3.3-12, 5.4.3.3-24 Dämpfungsfolien 5.4.3.3-12, 5.4.3.3-23, 5.4.3.3-24, 5.4.3.3-28, 5.4.3.3-29 Dämpfungskapazität 5.4.3.3-20 **Dämpfungsring** 5.4.3.3-14, 5.4.3.3-16 Datenermittlung an Proben 5.4.3.2-15

**Dauerbruch** 5.4-2, 5.4.1-7 Dauerfestigkeit 5.4-1, 5.4-3, 5.4.3.1-1, 5.4.1-6 Deckband einer Turbomaschinenschaufel, Einfluss auf Schwingung 5.4.3.1-9 Definition einer Schwachstelle 5.4.3.2-13 eines Fehlers 5.4.3.2-13 LCF-Beanspruchung 5.4.1-5 Dehngeschwindigkeit, Einfluss auf Werkstoffeigenschaften 5.2.2-16 Dehnungsbehinderung 5.4.2.1-6 Dehnungsgesteuerte Belastung 5.4.1-10 LCF 5.4.1-13 Vorgang 5.4.2.1-2 Dehnungsmessstreifen 5.4.3.3-6 Messung 5.4.3.1-6 an Verdichterschaufeln 5.4.3.3-6 Verfälschungsgefahr für Messergebnis 5.4.3.3-6 Dehnungszustand, ebener 5.2.1-7 Design, begünstige3ndes für LCF 5.4.1.2-7 Detonation, Gasleck 5.3-10 **Diffusion** von Silber 5.3-25 Diffusionskriechen 5.3.2-11 Diffusionsschicht, Einfluss der Thermoermüdung 5.4.2.1-10 **Dilatantes Verhalten** 5.2.3-5 Directionally solidified. Siehe gerichtete Erstarrung **Dispersionsgehärtete Legierung** 5.3.2-4 Dämpfung 5.4.3.3-16 DMS. Siehe Dehnungsmessstreifen Dosieren Pastösen Fluids (Viskositätseinfluss) 5.2.3-3 Drehübertrager (Messwerte aus rotierendem System) 5.4.3.3-6 Drehzahl, Kritische 5.4-12 Drosselventil gegen Druckschläge 5.2.4-15 Druckeigenspannungen, Beeinflussung der Eindringprüfung 5.4.1-16 Druckfluktuation in einem Gasstrahl 5.2.5-2 Druckgasflasche, LCF 5.4.1-2 Druckimpuls/-stoß in Gasen 5.2.5-4 Druckkessel 5.4.1.2-1 LCF 5.4.1-2 Drucklager, Überlastung durch Wasserschlag 5.2.4-4 Druckluftkanone (Vogelschlagversuche) 5.2.5-2 Druckoszillation bei Vogelschlag 5.2.2-18 Druckrost. Siehe Fretting Druckschlagdämpfer 5.2.4-14 Blase 5.2.4-14 Dämpfungskörper 5.2.4-14 Druckschlag, Abhilfe mit Drosselventil 5.2.4-15 Druckschwingungen in einer Brennkammer 5.4-19 Druckstoß 5.2.4-9 an Pumpen 5.2.4-12 Auswirkungen 5.2.4-13 Belastung der Halterungen von Rohrleitungen 5.2.4-10

Belastung von Absperrschieber 5.2.4-10 Einflüsse 5.2.4-11 in Flüssigkeiten 5.2.4-1 Kräfte 5.2.4-10 Öl-Pipeline 5.2.4-11 Resonanz durch 5.2.4-13 Schäden 5.2.4-13 Halterung für Rohrleitung 5.2.4-13 Sicherungen 5.2.4-14 Spitzendruck (Joukowski-Stoß) 5.2.4-9 Vermeidung mit aktiven Anlagen 5.2.4-16 Druckverlauf bei Vogelschlag (Hugoniot Druck) 5.2.2-18 Druckwellen in Flüssigkeiten 5.2.4-1 DS (Directionally Solidified). Siehe gerichtete Erstarrung Durchdringungsgeschwindigkeit (für Durchschlag notwendige) 5.2.2-13 Durchschlag, elektrisch in Öl 5.2.3-6 Durchschlagswiderstand, mechanisch, von Gehäusen 5.2.2-3 Duty Cycles (engl.). Siehe Lastzyklen Dwell Time (engl.). Siehe Haltezeit Dwell Time Fatigue (engl.). Siehe Haltezeiten (wichtig für LCF-Lebensdauer) Dynamische Steifigkeit, Reibungseinfluss 5.4-14 **Dynamische Beanspruchung** 5.4.3.1-1

### E

**E-Modul** abhängig von Kristallorientierung 5.4.2.1-17 Temperature influss auf Eigenfrequenz 5.4-14 Ebener Dehnungszustand 5.2.1-7 Ebener Spannungszustand 5.2.1-7 Edelgas, verunreinigtes, schädigende Wirkung 5.3.1-4 Edelrost. Siehe Fretting EDM. (Electric Discharge Machining) Siehe Funkenerosion Effekte, bei Auslegung zu berücksichtigen Gegenseitige Beeinflussung 5.1-2, 5.3.1-6 Zusammenwirken 5.3.1-2 Eigendämpfung (Innere Dämpfung) 5.4.3.3-16 Eigenform (Schwingform in Eigenfrequenz) 5.4-9 Eigenfrequenz Einfluss der Kristallrichtung 5.4.3.2-2 Veränderung durch Kriechen 5.3.2-14 Eigenspannungen 5.3-21 Abhängigkeit der Dämpfung 5.4.3.3-21 durch Bearbeitng 5.4.4-3 durch LCF 5.4.1-7, 5.4.3.2-17 Einfluss auf Beschichtung 5.4.1.2-5 Schwingfestigkeit 5.4.3.2-6 Herstellungsbedingt 5.4.3.2-17

Temperatureinfluss auf 5.3-2, 5.3-14 Unwucht als Folge 5.3-21 Veränderung bei LCF 5.4.1-16 Vergleichmäßigen durch Schleudern 5.4.1-18 Eindringprüfung, beeinflusst von Druckeigenspannungen 5.4.1-16 Einflüsse Abschätzung einer Kombination 5.4.3.3-3 auf Druckstoß 5.2.4-11 ungünstigste Kombination identifizieren (Monte Carlo Methode-Technik) 5.4.3.3-4 Eingeschweißte 'Augen' (in Druckkessel) 5.4.2-5 Eingießlegierungen (niedrig schmelzend), gefährliche Anschmelzungen 5.3-17 Einkristall (- legierungen, -Werkstoff) Bruchverhalten 5.4.4-12 Fehlkörner 5.3-17 Porenbildung in 5.3.2-14 Steifigkeitseigenschaften 5.4.3.2-2 Thermoermüdung 5.4.2.1-10 Turbinenschaufeln 5.4.3.2-2 Zeitstandfestigkeit 5.3.2-4 zur Vermeidung einer Resonanz 5.4.3.2-2 Einlaufkanal (Ansaugkanal) eines Triebwerks, Festigkeitsauslegung 5.2.5-4 Einlaufströmung, Schwingerregung 5.4.3.1-4 Einsatzgrenze faserverstärkter Kunststoffe 5.3.1-12 Einseitige Biegung, Bruchmerkmal 5.4.4-9 Elastisch gestalteter Übergang an Einspannung 5.4.1.2-11 Elastische gedämpfte Lagerung 5.4.3.3-26 Elastische Konstruktion zum Schutz vor Thermoermüdung 5.4.2-1 Elastische Verformung bei Schwingung 5.4-9 Elastizität, temperaturabhängig 5.3-2 Elastizitätsmodul, abhängig von Kristallorientiertung 5.4.2.1-17 Elastomere Dämpfung 5.4.3.3-23 Versprödung bei niedriger Temperatur 5.3-6 Elektrische Funken, Stoßwelle in Flüssigkeit 5.2.4-7 Elektrischer Durchschlag in Öl 5.2.3-6 Elektro- und magnetorheologische Fluide, Dämpfung 5.4.3.3-27 Elektroerosion an Gleitlager 5.2.3-7 Elektronenstrahlen, Wirklung auf Kunststoffe 5.3-1 Elektronischer Regler. Siehe Digitaler Regler Elektrorheologie 5.2.3-7 Elektrorheologisches Fluid 5.2.3-6 Email, Dämpfungswirkung 5.4.3.3-12 Energieaufnahme durch Zersplittern 5.2.2-9 im Containmentfall 5.2.2-9 Energiespeicher 5.4.3.1-13 kinetisch (KERS) 5.4-23

Energieübertragung beim Stoß 5.2.2-1 Entfestigung durch Kriechen 5.3.2-6 Werkstoffeigenschaft 5.4.1-12 Entlackungsanlagen, Niedertemperatur 5.3-6 Entlastungsbohrung 5.4.4-1, 5.4.4-2, 5.4.4-4 Entlastungskerbe 5.4.4-1, 5.4.4-4 Equi Axed (engl.) Werkstoffgefüge 5.4.2.1-17 Erdgas, Wasserstoffbildung 5.3.1-3 ERF. Siehe Elektrorheologie Ermüdung Ausbrüche auf Lauffläche eines Wellenlagers 5.4-20 isotherme 5.4.1-4 Nicht-isotherme- 5.4.1-4 Ermüdungsbruch 5.4-2 Erosion 5.1-2 verstärkt durch aufgeschmolzene und abplatzende Staubpartikel 5.1-4 Erosion und Oxidation, Kombinationsbeanspruchung 5.1-4 Ersatzmasse bei Vogelschlagversuch 5.2.4-5 Erweichungstemperatur. Siehe Glasübergangstemperatur (Kunststoffe) Erzwungene Schwingung 5.4-9. Siehe Resonanzschwingungen Experimentelles Vorgehen bei Schwingung von Anbaugeräten 5.4.3.3-8 Explosionen 5.2.2-1

### F

Fächerschwingung 5.4.3.1-10 False Brinelling (engl.). Siehe Fretting Fan, Schwingerregung 5.4.3.1-4 Fasertechnik, Schwungscheibe 5.2.2-3 Staubexplosionsgefahr 5.2.2-3 Faserverstärkte Kunststoffe 5.3.1-8 Dämpfung 5.4.3.3-23 Einfluss der Betreibsatmosphäre 5.3.1-10 Einsatzgrenze 5.3.1-12 Schwingbruch 5.4-19 Steifigkeit 5.3.1-12 Vogelschlagverhalten 5.2.4-6 Wärmedehung 5.3.1-12 Fehler an Gussteilen 5.4.3.2-5 an Schmiedewerkstoffen 5.4.3.2-5 Größe, Einfluss auf Zulässige LCF-Beanspruchung 5.4.1.2-2 Häufigkeit in Scheibenwerkstoffen 5.4.1-9 Fehlkörner in Einkristallen 5.3-17 Fehlstellen, Vermeidung bei LCF, 5.4.1.2-8 Feinkorn, Gussteil, Problem bei Kriechbeanspruchung 5.4.2.1-16 Ferrofluid 5.2.3-6

S 1B-6

Fertigung Einfluss auf Thermoerüdung 5.4.2.1-9 Schwachstellen in Bohrungen 5.4.1-15 Verfahren Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Schutz 5.2.2-1 Schwingungsanregung 5.4-18 Festigkeit Abfall unter Betriebseinfluss Kunststoffe 5.3.1-8 Metalle 5.4.1.2-2 Einfluss von belastete Volumen und Oberfläche 5.2.1-13 Korngröße 5.4.2.1-16 Kornorientierung 5.4.2.1-16 Temperatur 5.3-2 von Biegeproben (Problematik) 5.2.1-13 Feuchtigkeitseinfluss auf FVK 5.3.1-11 Fingerring, Lötrissigkeit durch Gold 5.3-23 Flatterschwingung 5.4.3.1-11 Erregung 5.4.3.1-4 Rad 5.4-19 Schwingungsmechanismus 5.4-19 Fließgelenk (Hochgeschwindigkeitsbiegung) 5.2.2-15, 5.2.2-16 Flight Envelope (engl.). Siehe Flugbereich Floßbildung Langzeit-Gefügeveränderung 5.3-15, 5.3.2-12, 5.3.2-14 Flugmanöver, Kreiselkräfte am Triebwerksrotor 5.4.3.1-14 Flugzeug Flügel, Schwingung 5.4-19, 5.4.3.1-14 Zelle, LCF 5.4.1-2 Fluid/Flüssigkeit Elektrorheologisches 5.2.3-6 Magnetisches 5.2.3-6 Magnetorheologisches 5.2.3-6 Newtonsches 5.2.3-1 Nicht Newtonsches 5.2.3-1 Flüssiger Wasserstoff, Probleme 5.3-7 Flüssigkeit Druckstoß/Druckwelle 5.2.4-1 Innere Reibung 5.2.4-11 Schlag 5.2.4-17 Dampfmaschine 5.2.4-1 Motor 5.2.4-1 Stoß 5.2.4-1, 5.2.4-2, 5.2.4-3 Welle 5.2.4-4, 5.2.4-7 Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit 5.2.4-9 FOD (Fremdkörperschaden) -Kerben egalisieren 5.4.3.2-10 Folgeschäden bei Stoßwellen/Schockwellen 5.2.4-7 Foliendämpfung (mit Dämpfungsfolie) 5.4.3.3-12 Formdesign, Probleme bei LCF 5.4.1.2-7 Formgebung durch Schockwellen 5.2.4-7 Formkerbe 5.4.4-1 LCF 5.4.1-5

Formzahl (Kerbe) 5.4.1-13 Fortschrittsgeschwindigkeit Riss bei Temperatur 5.3-11 Fortschrittsphase Riss 5.3.1-2 Freie Schwingung 5.4-9 Freizeitgerät, LCF-Probleme 5.4.1.2-6 Fremderregung, Schwingung 5.4-12 Fremdkörperaufschlag, Verformungsverlauf 5.2.2-15 Frequenz Änderung mit E-Modul 5.4-14 Einfluss auf die Dämpfung 5.4.3.3-21, 5.4.3.3-24 Fressen 5.3-9. Siehe auch Kaltverschweißen Fressspuren, Einfluss auf LCF 5.4.1.2-2 Fretting (engl.). Siehe Schwingverschleiß Bohrungen 5.4.1-16 Steckverzahnungen 5.1-4 Funken, Stoßwelle in Flüssigkeit 5.2.4-7 Funkenerosion (engl. EDM), Einfluss auf die Schwingfestigkeit 5.4.3.2-10 FVK 5.3.1-8. Siehe auch Faservertärkte Kunststoffe

### G

Gamma-Strich-Phase ( $\gamma$ '-Phase) 5.3-15, 5.3.2-2 Orientierung im Betrieb 5.3.2-22 Gammastrahlen, Wirkung auf Kunststoffe 5.3-1 Gas Druckimpuls/Stoßwelle 5.2.5-1, 5.2.5-4 Leck Detonation 5.3-10 Stichflamme 5.3-10 Schwingung in Hohlraum 5.4-18 Strahl Druckfluktuation 5.2.5-2 Mischungsgeräusch 5.2.5-2 Strömung, pulsierende 5.4.2.1-4 Temperaturen, historischer Anstieg in Turbinen 5.4.2.1-1 Verflüssigungsanlagen 5.3-6 Gedächtnismetalle. Siehe Memory-Metalle Gedämpfte Lagerung von Wellen mit Wälzlagern 5.4.3.3-26, 5.4.3.3-30 Gefangene Medien, in Rotortrommel 5.4-15 Gefüge (Werkstoff) Änderungen reversible 5.3.2-22 unter Temperatureinfluss 5.3-15 Langzeit 5.3-5, Zeitstandschädigung 5.3.2-22 Einfluss auf Orientierung, Einfluss auf den Rissfortschritt 5.4-28 Thermoermüdung 5.4.2.1-14 equi axed 5.4.2.1-17 Schwingfestigkeit 5.4.2.1-16

Orientierung, Einfluss auf den Rissfortschritt 5.4-28 Struktur, Einfluss auf Rissfortschritt 5.4-28 Temperature influss 5.3-4 Volumenveränderungen 5.3-21 Zeitstandfestigkeit 5.4.2.1-16 Gefügekerbe 5.4.4-3 Gehäuse Aluminiumlegierung 5.2.2-5 Brennkammer 5.4.2.1-13 Magnesiumlegierung 5.2.2-5 Strebenrisse 5.4.2-6 Wandstärke eines Containments 5.2.2-3 Gekoppeltes Schwingsystem 5.4.3.1-16 Gekühlte Schaufeln, zeitstandbeanspruchten Zonen 5.3.2-20Gelötete Leitapparate in Turbomaschinen 5.4.3.1-2 Geräusch, Rohrleitung 5.2.4-17 Gerberparabel (im Schwingfestigkeitsdiagramm) 5.4-26 Geschlossenes System, Rissbildung 5.2.1-2 **Gestaltung** (Formgebung) geringe Kerbwirkung 5.4.4-4 Sollbruchstelle 5.4.4-12 Gesteinszertrümmerung mit Stoßwelle 5.2.4-8 Gewaltbruch 5.2.1-1, 5.2.1-2, 5.2.1-3 Gewichtsreduzierung, begünstigt LCF 5.4.1.2-7 GFK. Siehe Glasfaserverstärktes Polyester GFK-Pest 5.3.1-11 Glas Korrosion 5.3-1 Thermoschock 5.4.2.1-9 verzögerte Rissbildung 5.3-1 Glasbereich (Kunststoffe) 5.3.1-11 Glasfaserverstärktes Polyester (GFK), Osmose 5.3.1-11 Glasübergangstemperatur (Kunststoffe) 5.3.1-11 Gleitfläche, typische Rissorientierung 5.4.2.1-9 Gleitlager Elektroerosion 5.2.3-7 Reibung 5.2.3-2 Schwingung 5.4-15 Temperatur 5.2.3-2 Tragfähigkeit 5.2.3-2 Viskosität des Öls 5.2.3-2 Gleitschichten, Oxidation 5.3-9 Gold, Lötrissigkeit 5.3-23 durch Fingerring 5.3-23 Goodman Linie (im Schwingfestigkeitsdiagramm) 5.4 - 26Grate an Bohrungen 5.4.1-15 Grenzbereich der Einsatztemperatur (Grenztemperatur) metallischer Werkstoffe 5.3.2-6 Kriechen 5.3.2-3 Grenzen der Reparierbarkeit 5.2.1-17

**Grenzwerte** der Betriebstauglichkeit 5.4.2-3 **Grobkorn** (Werkstoffgefüge) 5.4.2.1-16 **Grundbiegeschwingung** 5.4.3.1-9 **Gussteil**, Fehler 5.4.3.2-5

# Η

Haftfestigkeit von Schichten, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 5.4.3.2-16 Haigh-Diagramm (Schwingfestigkeit) 5.4-25, 5.4.3.2-8 Haircut (Schaufelbruch) 5.4.4-12 Halbfrequenzwirbel 5.4-15 Halterung von Rohrleitungen Belastung durch Druckstoß 5.2.4-10 Schaden durch Druckstöße 5.2.4-13 Haltezeit bei zyklischen Prüfungen 5.4.1.2-5 Einfluss auf die Rissfortschrittsgeschwindigkeit 5.4-27 Einfluss bei Belastung 5.4-26 LCF-Lebensdauer 5.4-28, 5.4.1.2-4 Thermoermüdung 5.4.2-10 Hammerschock (Druckstoß in Ansaugkanal) 5.2.5-4 Handling (Handhabung), Schäden an Bohrungen 5.4.1-15 Harmonische Schwingung 5.4-2, 5.4-9 Härte Abfall bei Überhitzung 5.3-17 Temperature influss 5.3-14 Härterisse 5.3-20 HCF 5.4.3.1-1. Siehe auch High Cycle Fatigue Auslegungsdaten 5.4.3.2-1 Beanspruchungssteigernde Einflüsse 5.4.3.3-1 Begriffserklärung 5.4.1-7 Beispiele 5.4-24 Belastung Definition 5.4.3.2-1 Werkstoffverhalten 5.4.3.2-1 Festigkeit, Streuung 5.4.3.2-13 Schäden, Abhilfen 5.4.3.3-1 Werkstoffeinfluss 5.4.3.2-1 Heat Soaking (engl.). Wärmestau nach Abstellen. Hebezeuge 5.4.1.2-1 LCF 5.4.1-2 Heißgaskorrosion 5.3.1-3 Müllverbrennungsanlage 5.3.1-6 Heißriss 5.3-20 Heißteile Abdichten durch Reparatur 5.4.2-1 innen gekühlte 5.4.2.1-19 in Turbomaschinen 5.4.2.1-4 Heizung, Joukowski-Stoß 5.2.5-6 Helium, schädigendes verunreinigtes 5.3.1-4 Heliumturbine 5.3.1-4 Helmholtz-Resonator 5.4-18

High Cycle Fatigue (HCF) 5.4-4 High Temperature Corrosion. Siehe Hochtemperaturkorrosion Hilfsstoffe, Schmiermittel, Korrosion durch 5.4.1-16 HIP-Behandlung zur Regeneration 5.3.2-22 Hochfeste Werkstoffe, LCF 5.4.1.2-7 Hochfrequente Schwingungen 5.4.3.1-1 Hochgeschwindigkeitsbelastung 5.2.2-1 durch Bruchstücke 5.2.2-2 Hochgeschwindigkeitsverformung 5.2.2-1 Versprödungseffekt 5.2.2-1, 5.2.4-6 Hochgeschwindigkeitsversprödung 5.2.2-16 Hochtrainiereffekt Hochtrainieren von Werkstoffen 5.4-6, bei Schwingprüfung 5.4.3.2-11 Hohlproben, TMF-Prüfung 5.4.2.1-6 Hot Start. Siehe Heißstart Hugoniot Druck 5.2.2-18 Hump-Effekt bei Kupplung 5.2.3-5 Hydrodynamisches Paradoxon 5.4-15, 5.4-18 Hysteretic Whirl (engl.). Siehe Orbiting

#### Ι

Impulsdämpfung 5.4.3.3-27 Inhomogenitäten im Gusswerkstoff, unvermeidliche 5.4.3.2-15 **Inkubationszeit** 5.1-3, 5.4.1-9 bei Schäden 5.1-3 Schadensverlauf nach 5.1-4 Innenkühlung von Heißteilen 5.4.2.1-19 **Innere Dämpfung** 5.4.3.3-12, 5.4.3.3-23 Innere Kerben 5.4.4-4 Innere Reibung, Flüssigkeit 5.2.4-11 Inspektionsintervall, sicheres 5.2.1-8 Instabiler Rissfortschritt 5.2.1-1, 5.2.1-2, 5.2.1-5 Instabilitäts-Schwingungen 5.4-12 Instationäre Strömungszustände, Ursachen 5.2.4-10Isotherme Ermüdung 5.4.1-4 Intelligente Werkstoffe. Siehe smart materials

### J

Joukowsky-Stoß (auch Joukowski-Stoß) 5.2.4-9, 5.2.5-4 im Schornstein 5.2.5-6 in Abgasleitung 5.2.5-6 in Heizungen 5.2.5-6

#### K

Kadmium, auslösen von Lötrissigkeit 5.3-21 Kaltmahlen (Zerkleinern) 5.3-6 Kaltverformung, kritische 5.3-6

Kaltverschweißen (Fressen) 5.3.1-3, 5.4.3.1-6 im Vakuum 5.3.1-4 Kaltversprödung (Tieftemperaturversprödung) 5.3-6 Kamin, Schwingung eines Blechrohrs 5.4-19 Kapillarwirkung bei Zentrierbohrungen 5.4.1-16 Katalysator 5.4.2.1-3 Katalysatoreffekt frischer Metallflächen 5.3.1-3 Kavitationserosion 5.1-6 Kavitationsschlag 5.2.4-9, 5.2.4-10, 5.2.4-12 Wasserschlag 5.2.4-2 Keilproben für Thermoermüdungsprüfung 5.4.2.1-1, 5.4.2.1-6 Keramik Schwungscheibe 5.2.2-3 Verzögerte Rissbildung 5.3-1 Keramikscheibenventil 5.2.4-17 Kerbe Arten 5.4.4-1 Innere Kerben 5.4.4-4 Auswirkungen 5.4.4-2 Einfluss auf Streuung der Schwingbeanspruchung 5.4-6 der Temperatur 5.3-4, 5.4.3.2-8 Stützwirkung 5.4.4-1 von Kriechverformung 5.3.2-14 im Gefüge 5.4.4-3 Spannungsgefälle 5.4.4-1 Steifigkeitssprung 5.4.4-1 Kerbempfindlichkeit 5.4.1.2-8 Enfluss der Zähigkeit 5.4.4-1 Kerbradius 5.4.4-2 Kerbschlagarbeit, Zusammenhang mit Bruchzähigkeit 5.4.4-11 Kerbschlagbiegeversuch, Ermittlung der Bruchzähigkeit 5.4.4-11 Kerbschlagzähigkeit Auswirkung auf Schaden 5.4.4-11 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit 5.4.4-6 Temperatureinfluss 5.3-5 Steilabfall 5.4.4-6 Tieflage 5.4.4-6 Kerbwirkung 5.4.1.2-11 Temperatureinfluss 5.4.4-3 Merkmal an Bruchfläche 5.4.4-9 Minimierung durch Gestaltung 5.4.4-4 KERS. Siehe Energiespeicher K<sub>1</sub>SCC (Risszähigkeit bei Korrosionseinfluss) 5.2.1-Klaffende Risse (Thermoermüdung) 5.4.2.1-20 Klapperniet (Schwingungsdämpfer) 5.4.3.3-16, 5.4.3.3-27 Klemmen eng tolerierter Bauteile durch Volumenvergrößerung 5.3-21 Knotendurchmesser von Scheibenschwingungen 5.4.3.1-10 Knotenlinie

Einfluss auf Schwingbelastung 5.4.3.1-6 Spannungsverteilung 5.4.3.1-9 Verlauf 5.4.3.1-9 Kolben 5.4.2.1-3 Schaden durch Benzinschlag bei Motoren 5.2.4-2 Viskosität des Mediums bei Pumpen 5.2.3-2 Kolbenring als Schwingungsdämpfer 5.4.3.3-14 Kollabieren dünnwandiger Abgasleitung 5.2.5-6 Kolumnare Körner (Gussgefüge) 5.4.2.1-17 Kombination mehrerer Enflüsse, Abschätzung 5.4.3.3-3 Kondensat, Auslösen eines Dampfschlags 5.2.4-8 Konstruktion Einfluss auf Thermoermüdung 5.4.2.1-9 Gestaltung gegen Thermoermüdung 5.4.2-3 von Gehäusen 5.4.3.3-11 Mangel bei LCF-Beanspruchung 5.4.1.2-2 Korn (Gefüge) Größe, Einfluss auf die Festigkeit 5.4.2.1-16 Orientierung durch Temperaturgradient beim Gießen 5.4.2.1-17 Einfluss auf die Festigkeit 5.4.2.1-16 Temperatureinfluss auf Form 5.3-17 Wachstum, Versprödung 5.3-6 Korngrenzen Einfluss der Orientierung 5.4.2.1-17 Kriechen 5.3.2-11 Schädigungen durch Temperatur 5.3-15 Sensibilisierung (Korrosion) 5.3-15 Kornzwickel, Risse 5.3.2-9 Korrosion an Gläsern 5.3-1 durch Hilfsstoffe 5.4.1-16 MoS<sub>2</sub>-haltiges Schmiermittel 5.4.1-16 Schwitzwasser 5.4.1-16 Silberverbindungen 5.4.1-16 in Bohrungen 5.4.1-16 Müllverbrennungsanlage 5.3.1-6 Kräfte bei Druckstoß in Flüssigkeiten und Gasen 5.2.4 - 10Kraftfahrzeug, Schwingungen 5.4-22 Kraftstoff Alternative, Probleme 5.3.1-1 Einspritzung 5.2.3-2 Kraftstoffschlag (Benzinschlag) 5.2.4-1, 5.2.4-2 Krananlagen, LCF-Beanspruchung 5.4.1-2 Kreiselkräfte 5.4.3.1-13 Flugmanöver 5.4.3.1-14 Radsatz Bahn 5.4.3.1-14 Rissbildung 5.4.3.1-15 Rotorlagerung 5.4.3.1-14 Versteifungseffekt bei Wellen 5.4.3.1-15

Windenergieanlagen 5.4.3.1-14 Kriechbereich Primärer 5.3.2-6 Sekundärer 5.3.2-6 Tertiärer 5.3.2-6 Kriechdehnung 5.3.2-2 Dehngrenze 5.3.2-2 Einfluss auf Beschichtungen 5.3.2-14 dynamisches Bauteilverhalten 5.3.2-14 Messung 5.4.2.1-19 temperaturabhängig 5.3-2 Thermoermüdung 5.3.2-14 Kriechen Entfestigung 5.3.2-6 Grenztemperatur 5.3.2-3 Maßveränderung 5.3.2-20 Mechanismen 5.3.2-2 Porenbildung (Kriechporen) 5.3.2-9, 5.3.2-2, 5.3.2-20 Restlebensdauer 5.3.2-11 Schädigung 5.3.2-11 Veränderung der Eigenfrequenz 5.3.2-14 Verformung an Kerben 5.3.2-14 Bauteilverhalten 5.3.2-14 Einfluss auf das Anstreifen 5.3.2-14 den Wirkungsgrad von Turbomaschinen 5.3.2-14 Schädigungsmechanismus 5.3.2-8 Verzug 5.3.2-20 Kriechgrenze 5.3.2-6 Kriechkurve 5.3.2-5 Kriechlebensdauer Auswirkung einer Temperaturerhöhung 5.3.2-2 Streuung 5.3.2-12 Kriechporen 5.3-15, 5.3-19, 5.3.2-10 Abschätzung der Restlebensdauer 5.3.2-12, 5.3-15 Bildung 5.3-5, 5.3.2-12 Probenentnahme 5.3.2-20 Kriechschädigung 5.3.2-10 Regeneration 5.3.2-12 Kriechversuch abgekürzter 5.3.2-11 Bestimmung der Restlebensdauer 5.3.2-11 Kristallorientierung/-richtung Einfluss auf Eigenfrequenz 5.4.3.2-2 Elastizitätsmodul 5.4.2.1-17 Vermeidung von Resonanz 5.4.3.2-2 Kritische Bruchzähigkeit 5.2.1-8. Siehe auch kritische Risszähigkeit Kritische Drehzahl 5.4-12 Kritische Kaltverformung 5.3-6

Kritische Risslänge 5.2.1-1, 5.2.1-2, 5.4.1-5, 5.4.1-9 Kritische Risszähigkeit 5.2.1-7, 5.2.1-8 Kugelstrahlen, Einfluss auf Schwingfestigkeit 5.4.3.2-11 Kühlluftbohrungen Aufknöpfen 5.4.2.1-19 Rissbildung in 5.4.2.1-19 Kühlung, Raketendüsen 5.3-7 Kühlwasser, Wasserschlag 5.2.4-2 **Kunststoff**/Kunstharz Auflösung 5.3.1-8 Chemische Beständigkeit 5.3.1-8 Dämpfung 5.4.3.3-23 Einfluss der Betriebsatmosphäre 5.3.1-8 Festigkeitsabfall 5.3.1-8 Materialabtrag 5.3.1-8 Quellen 5.3.1-8 Schädigung durch Tau (Bewitterung) 5.3.1-8 mechanismen 5.3.1-8 Schrumpfen 5.3.1-8 Sprödigkeit 5.3-7 Versprödung bei niedriger Temperatur 5.3-6 Volumenveränderung 5.3.1-8 Wirkung von Elektronenstrahlen 5.3-1 Gammastrahlen 5.3-1 Licht 5.3-1 Neutronenstrahlung 5.3-1 Röntgenstrahlung 5.3-1 Umgebungseinflüssen 5.3-1 Kupfer, auslösen vonm nLötrissigkeit 5.3-22 **Kupplung** 5.4.2.1-4 Magnetorheologisches Fluid 5.2.3-7 Scheiben, Bruch 5.2.2-2 Silikonölfüllung 5.2.3-5 Viskosität von Übertragungsfluid 5.2.3-2 Kurzzeit Ermüdung. Siehe LCF-Beanspruchung Festigkeit 5.4-3

### L

Laborbruchflächen, Auswertung 5.4.3.3-2 Labyrinth (-dichtungen) Abrieb 5.1-2 Erosion 5.1-2 Schwingung 5.4-15, 5.4.3.1-2 Lack, Viskosität 5.2.3-2 Lager Buchsen (Gleitlager) mit PTFE 5.3.1-10 Laufspur (Wälzlager) 5.4-21 Steifigkeit bei Wellenschwingung 5.4-21 Lagertemperatur, Gleitlager 5.2.3-2 Lagerung, elastisch gedämpft 5.4.3.3-26 Längenänderung, Rotorschaufel 5.3.2-20

Laser Peening (Verfestigung) 5.4.3.2-10 Laufspur (Wälzlager) Wellenlager bei Schiefstand 5.4-21 Lavaldüse (Überschallströmung) 5.2.5-2 LCF-Beanspruchung 5.4.1-1, 5.4.1-4. Siehe auch Low Cycle Fatigue (engl.) Aluminiumlegierungen 5.4.1.2-7 an Bohrungen 5.4.1-5 an Formkerben 5.4.1-5 an Spindelpresse 5.4.1.2-3 Anrisslastwechsel 5.4.1-10 Auslegung von Bauteilen 5.4.1-2 Begriffserklärung 5.4.1-7 begünstigt durch Gestaltung 5.4.1.2-7 durch Konstruktionsmängel 5.4.1.2-2 vom Design (Sportgerät) 5.4.1.2-7 Beispiele 5.4-24 Beschichtungen 5.4.1.2-5 Definition 5.4.1-5, 5.4.1-7 Dehnungsgesteuerte Belastung 5.4.1-13 Eigenspannungen 5.4.1-7 Induzieren 5.4.1.2-8, 5.4.3.2-17 Verändern 5.4.1-16 Einfluss von Fressspuren 5.4.1.2-2 Erkennen 5.4.1-2 Freizeitgerät 5.4.1.2-6 gefährdetes Bauteil erkennen 5.4.1.2-11 Hochfester Werkstoffe 5.4.1.2-7 Lebensdauer Einfluss von Haltezeiten 5.4.1.2-4 Nachweis 5.4.1.2-10 Nabenbohrung von Rotorscheiben5.4.1-5 Probe 5.4.1-13 Versuche 5.4.1-10 Prüfung mit Pulser 5.4.1-13 Risikobewertung 5.4.1-5 Schaden/ Schäden 5.4.1.2-1, 5.4.1.2-2 Abhilfe 5.4.1.2-8 konstruktive Maßnahmen 5.4.1.2-9 Qualitätssicherung 5.4.1.2-10 Werkstoffauswahl 5.4.1.2-8 Auslegung 5.4.1.2-9 Fertigung 5.4.1.2-9 Montage 5.4.1.2-10 durch Werkstofffehler 5.4.1.2-1 erkennen 5.4.1.2-1 identifizieren 5.4.1.2-1 Mechanismus 5.4.1-5 Vorgehensweise bei 5.4.1.2-10 Sportgeräte 5.4.1.2-6 Titanlegierungen 5.4.1.2-7 ursächliche Beschädigungen 5.4.1.2-2 zulässige Fehlergröße 5.4.1.2-2 Lebensdauer

Abschätzung Kriechbeanspruchung 5.3-15 Thermoermüdung (TF, TMF) 5.4.2.1-14 Verbrauch bei dynamischer Belastung 5.4.3.2-18 Mindestwerte 5.3.2-12 Nachweis, LCF 5.4.1.2-10 Sicherheit 5.4.4-7 Streuung bei Schwingbeanspruchung 5.4-6 Leckströmung Schwingungsanregung 5.4-18 Temperaturverteilung durch 5.4.2-4 Leerstellen (Kriechporenbildung), Kondensation 5.3.2-8 Leichtmetalllegierungen Niedertemperaturverhalten 5.3-7 Temperatur-Einsatzgrenze 5.3.2-3 Leistungsschallimpulse 5.2.4-7, 5.2.4-8 Leitapparat (Turboverdichter), gelötet 5.4.3.1-2 Leitende Flüssigkeit (elektrisch), Einfluss eines Magnetfelds 5.1-7 Licht, Wirkung auf Kunststoffe 5.3-1 Line Packing (Druckerhöhungm in Pipelines) 5.2.4-10, 5.2.4-11 Lippendichtungen 5.3-6 Liquid Metal Embrittlement (LME). Siehe Lötrissigkeit Lotperlen, ausschwitzen bei Übertemperatur 5.3-13 Lötrissigkeit 5.1-5, 5.3-23, 5.3-24, 5.3.1-5, 5.3.1-6, 5.3.1-11 durch Blei 5.3-21 Bronzen 5.3-22 Gold 5.3-23 Kadmium 5.3-21 Kupfer 5.3-22 Messing 5.3-22 Silber 5.3-21, 5.3-23 Wismut 5.3-21 Metallkombinationen 5.3-21 Lötspalt 5.4.2-6 Lötung 5.4.4-3 überhitzt 5.3-13 Low Cycle Fatigue (siehe LCF) 5.4-4 Luft- und Raumfahrt, LCF-Belastungen 5.4.1-1 Luftdämpfung 5.4.3.1-6, 5.4.3.1-17, 5.4.3.3-19 Lyra Mode-Risse (engl., Schwingungsform) 5.4.3.3-20

# M

Mach'scher Kegel 5.2.5-1 Magnesiumlegierung, Gehäuse 5.2.2-5 Magnetfeld Einfluss auf leitende Flüssigkeit 5.1-7

Wirkung auf Viskosität 5.2.3-6 Magnetisches Fluid 5.2.3-6 Magnetofluiddynamik/Magnetohydrodynamik 5.1 - 7Magnetorheologie 5.2.3-6 Fluid 5.2.3-6 Kupplung 5.2.3-7 Magnetrostriktive Werkstoffe, Dämpfungswirkung 5.4.3.3-27 Makrokavitation (Dampfschlag) 5.2.4-10, 5.2.4-12 Makroskopischer Befund, Bruchfläche 5.4.4-11 Maßänderung durch Kriechen 5.3.2-20 Materialabtrag (Erosion) an Kunststoffen 5.3.1-8 Mechanische Anregung einer Schwingung 5.4.3.1-4 Meeresatmosphäre 5.3.1-3 Einfluss auf Risswachstum 5.4-28 Memory-Metalle (Gedächtnislegierungen) 5.4.3.3-27 Messergebnis Verfälschung durch DMS und der Anschlussleitungen 5.4.3.3-6 Messing, Schaden durch Lötrissigkeit 5.3-22 Metall/metallische Werkstoffe -brände/-feuer 5.3-9 Diffusion atomaren Wasserstoffs 5.3.1-3 Grenzbereich der Einsatztemperatur 5.3.2-6 Kombinationen, Gefahr für Lötrissigkeit 5.3-21 Oberfläche, Katalysatoreffekt 5.3.1-3 Schmelzen, Reaktion mit 5.3-17 Metallografische Untersuchung bei Überhitzung 5.3-14 Schliff, Auswertung im REM 5.3-19 Mikroanalyse im REM 5.3-19 Mikrobewegungen, Reibverschleiß/Fretting 5.4.4-3 Militärische Anwendungen (LCF-Belastung) 5.4.1-1 Mindestwerte Durchschlagsgeschwindigkeit 5.2.2-10 Kriechlebensdauer 5.3.2-12 Miner-Regel (Belastungsüberlagerung) 5.4-26, 5.4.3.2-18 Minizyklen (für LCF-Lebensdauer) 5.4.2.1-5 Mischungsgeräusch eines Gasstrahls 5.2.5-2 Mistuning (Verstimmung von Eigenfrequenzen) 5.4.3.1-10, 5.4.3.3-13 Mittelspannung 5.4-25 Einfluss auf die Schwingfestigkeit 5.4.3.2-8, 5.4.3.2-13 Modalanalyse (Schwingungsformanalyse) 5.4.3.1-6, 5.4.3.3-1 Mode. Siehe Schwingungsform Montage Abhilfe bei LCF-Schäden 5.4.1.2-10 Schäden an Bohrungen 5.4.1-15 Monte Carlo Methode-Technik 5.4.3.3-4 MoS,-haltiges Schmiermittel, korrosionsauslösend 5.4.1-16

Motor, Flüssigkeitsschlag (Wasserschlag, Benzinschlag) 5.2.4-1
MRF. Siehe Magnetorheologisches Fluid
Müllverbrennungsanlage, Heißgaskorrosion 5.3.1-6
Multiaxiales Gefüge. Siehe Ungerichtetes Gefüge

# Ν

Nabenbohrung (in Rotorscheibe), LCF-Beanspruchung 5.4.1-5, 5.4.1-18 Nachweis Containment 5.2.2-6 Lebensdauersicherheit 5.4.4-7 Näherungsverfahren von Neuber (Bestimmung plastischer Verformung ) 5.4.1-14 Nahrungsmittelindustrie, Niedertemperaturanwendung 5.3-6 Nahtüberhöhung (Schweißen) 5.4.4-3 Nebenluftvorrichtung (im Kamin gegen Druckstoß) 5.2.5-7Nennspannungskonzept 5.4.1-14 Neuber/Neuber-Hyperbel, Näherungsverfahren zur Bestimmung plastischer Verformung 5.4.1-14 Neue Technologien, Versagenseigenshaften 5.4.1.2-7 Neutronenstrahlung, Wirkung auf Kunststoffe 5.3-1 Newtonschem Verhalten eines Fluids (Newtonsches Fluid) 5.2.3-1, 5.2.3-5 Ni,Al. Siehe  $\gamma$ '-Phase Nicht-isotherme-Ermüdung 5.4.1-4 Nicht-Newtonsches Verhalten/Nicht Newtonsches Fluid 5.2.3-1, 5.2.3-2, 5.2.3-5 Nickellegierungen (Superlegierungen) Gusslegierungen, typische Schwachstellen 5.4.3.2-15 Niedertemperaturverhalten 5.3-7 Niedertemperatur Anwendungen 5.3-6 Nahrungsmittelindustrie 5.3-6 Entlackungsanlagen 5.3-6 Pulverherstellung 5.3-7 Verhalten Austenitische Stähle 5.3-7 Leichtmetalllegierungen 5.3-7 Nickellegierungen 5.3-7 Titanlegierungen 5.3-7 Weltraumbedingungen 5.3-6 Zerkleinern 5.3-6, 5.3-7 Niedrig schmelzende Legierung. Siehe Eingießlegierungen No start (engl.). Siehe Fehlstart

### 0

O-Ring, Versprödung 5.3-6

#### Oberfläche

Einfluss der Größe auf 'Auslegungsfestigkeit' 5.2.1-13 von Umgebungsatmosphäre bei Anrissen 5.3.2-8 Versprödung, Hinweise auf 5.3-13 Oberspannung (Schwingbeanspruchung) 5.4-25 Öl Elektrischer Durchschlag 5.2.3-6 Viskosität im Gleitlager 5.2.3-2 Öl-Pipeline, Druckstoß 5.2.4-11 Ölschlag, Turboladerschaden 5.2.4-2 Orangenhaut (Heißteiloberfläche) 5.4.2.1-20 Orbiting 5.4-14 aerodynamische Anregung 5.4-15 Osmose bei GFK 5.3.1-11 Oxidation einer Bruchfläche 5.3-12 Gleitschichten 5.3-9 Oxidationsschicht, Störung 5.3-16

# P

PA. Siehe Polvamid Partikeldämpfung 5.4.3.3-16, 5.4.3.3-27 Passflächenkorrosion. Siehe Fretting Passive Dämpfung 5.4.3.3-16 Passungsrost. Siehe Fretting Pastöse Fluids Dosieren 5.2.3-3 PC. Siehe Polycarbonat PE. Siehe Polyethylen Periodischen Schwingung 5.4-2 Phasenverschiebung bei Thermoermüdung 5.4.2-10 Piezoeffekt als Dämpfung 5.4.3.3-26 Pleuel, Schaden durch Benzinschlag 5.2.4-2 Plexiglas (PMMA) 5.3.1-8 Polyamid 5.3.1-8 Polycarbonat 5.3.1-8 Polyethylen 5.3.1-9 Polypropylen 5.3.1-9 Polyvinylchlorid 5.3.1-9 POM (Thermoplast) 5.3.1-9 Porenbildung Kriechen (Kriechporen, engl. Creep Voids) 5.3-15. 5.3.2-9 bei Einkristallen 5.3.2-14 PP, Siehe Polypropylen Prallplatte gegen Thermoschock 5.4.2.1-9 Pressen (in der Produktion), LCF 5.4.1.2-1 Pressure surge (engl.) Siehe Stoßwelle 5.2.4-9 Prestressing (engl.) 5.4.1-16 Primärer Kriechbereich (Primärkriechen) 5.3.2-6, 5.3.2-22 Primärschaden, ermitteln 5.4.3.3-2

#### Probe

Bauteilrelevant 5.3.2-18

Bruchmechanische 5.4.4-11 Datenermittlung 5.4.3.2-15 Dicke, Einfluss auf Risszähigkeit 5.2.1-10 Entnahme 5.4.3.2-5 bei Kriechporen 5.3.2-20 Schwingfestigkeit 5.4.3.3-2 Einfluss auf die Schwingfestigkeit Form 5.4.3.2-5 Oberfäche 5.4.3.2-6 LCF an Titanlegierung 5.4-27 Queschnitt 5.3.2-18 Thermoermüdung 5.4.2-8 Volumeneinfluss 5.4.3.2-5 Probenversuche, LCF 5.4-26, 5.4.1-10 Probeteile, geeignete Auswahl 5.3.2-18 Probleme von Sollbruchstellen 5.4.4-12 Prospektangaben, begrenzte Aussage 5.2.1-14 Prozessgase, Einfluss auf Bauteile 5.3.1-1 Pseudoplastisches Verhalten eines Fluids 5.2.3-5 **PTFE (Teflon (R)** 5.3.1-10 Pulsationsdämpfer (für Rohrleitungen) 5.2.4-15 Pulsierende Gasströmungen 5.4.2.1-4 Pulverherstellung, Niedertemperatur 5.3-7 Pumpe, Druckstoß 5.2.4-12 PVC (Thermoplast) 5.3.1-9

# Q

Qualitätssicherungsstrategie 5.4.1-9 Quasi Spaltbrüche 5.4.4-11 Quellen von Kunststoffen 5.3.1-8 Querschnittsdicke, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 5.4.3.2-6

### R

Rad. Flattern 5.4-19 Radachsen, Schwingungen 5.4.3.1-10 Radsatz (Bahn) 5.4.3.1-10, 5.4.3.1-14 Kreiselkräfte 5.4.3.1-14 Raftening (engl.), Gefügeorientierung, Siehe Floßbildung, Raketendüsen, Kühlung 5.3-7 Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) 5.3-15, 5.3-18 Rattermarken, Einfluss auf Schwingfestigkeit 5.4.3.2-6 Raumfahrt 5.4.1-1 Recast layer (engl.), siehe 'Wiedererstarrte Zone' 5.4.3.2-11 **Reckalterung** 5.3-5 Reflektierende Schichten, Einfluss auf Thermoermüdung 5.4.2.1-12 Regenbogenversuch 5.4.2.1-14 Regeneration (einer Werkstoffschädigung)

HIP-Behandlung 5.3.2-22 Kriechschädigung 5.3.2-12, 5.3.2-17, 5.3.2-22 Regenerosion. Siehe Tropfenschlag Reibkorrosion. Siehe Fretting Reibrost. Siehe Fretting Reibung Gleitlager 5.2.3-2 Schwingungsdämpfung 5.4.3.1-6, 5.4.3.3-12 Reibungseinfluss auf die dynamische Steifigkeit 5.4-14 Reibverschleiß. Siehe Fretting Rekristallisation (Gefüge) 5.3-17 Relaxation 5.3.1-2, 5.3.2-1 Vorgänge 5.4-26 REM. Siehe Raster-Elektronen-Mikroskop Reparatur Kombination von Bauteilen 5.4.2-6 von Rissfeldern 5.4.2-7 von Thermoermüdungsschäden 5.4.2-3, 5.4.2-6 Reparierbarkeit, Grenzen 5.2.1-17 Reproduktionsversuch bei Schäden 5.4.3.3-2 **Resonanz** 5.4.3.1-5 Ermittlung 5.4.3.1-6 in Rohrleitungen 5.2.4-17 mit Druckstößen 5.2.4-13 Schwingungen 5.4-12 Vermeiden 5.4.3.3-16 Vermeidung durch Kristallorientierung (Einkristallwerkstoff) 5.4.3.2-2 Resonator 5.4-19 **Restbruch** 5.2.1-1, 5.2.1-5 Restgewaltbrüche 5.2.1-7. Siehe auch Restbruch Restlebensdauer Abschätzung 5.3.2-10, 5.2.1-16 an Hand von Kriechporen 5.3-15, 5.3.2-12 mit Kriechversuch 5.3.2-11 Zeitstand 5.3.2-20 Kriechen 5.3.2-11 Plastische Dehnung 5.4.2.1-19 **Reversible Gefügeveränderung** 5.3.2-22 Rheologie 5.2.3-1 Rheopexie 5.2.3-1, 5.2.3-5 Riffelbildung (bei Thermozyklen) 5.3.2-14 Risikobewertung, LCF 5.4.1-5 Riss Abbohren 5.4.2-4 beherrschbar bei Spannungsgradient 5.4.2-1 Bildung an Heißteilen mit Innenkühlung 5.4.2.1-19 beim Schleifen 5.3-20 bei Überhitzung 5.3-11 durch Kreiselkräfte 5.4.3.1-15 Entlastung durch 5.4.2.1-6 erschwerte bei Thermoermüdung 5.4.2.1-17

Fortschrittsgeschwindigkeit bei Temperatur 5.3-11, 5.3-17 in der Abschreckphase 5.4.2.1-8 in geschlossenem System 5.2.1-2 in Kornzwickeln 5.3.2-9 in Kühlluftbohrungen 5.4.2.1-19 in spröder Schicht 5.4.3.2-16 Verzögerte bei Keramik 5.3-1 bei Glas 5.3-1 Einfluss von Meeresatmosphäre 5.4-28 Klaffend 5.4.2.1-20 Lage am Bauteil 5.3-11 Länge akzeptable 5.4.2-1 Kritische 5.2.1-1, 5.2.1-2, 5.4.1-5 Orientierung am Bauteil 5.3-11 in Gleitfläche 5.4.2.1-9 Verschließen 5.4.2-6 Zuklemmen 5.4.1-16 Zuschweißen 5.4.2.1-2 Risszähigkeit aus Kerbschlagzähigkeit, Temperatureinfluss 5.3-4 **Rissbild**, Ermittlung des Schadensmechanismus 5.3-17 Rissfeld, Reparatur 5.4.2-7 Rissfortschritt/-wachstum 5.2.1-2, 5.4.1-14 Einfluss der Bauteilgröße 5.4-28 Einfluss der Gefügeorientierung 5.4-28 Einfluss der Gefügestruktur 5.4-28 Instabiler 5.2.1-2 Stabiler 5.2.1-2 stabiler 5.2.1-5 **Rissfortschritts-**Geschwindigkeit bei Haltezeit 5.4-27 Linien 5.3-19 Phase 5.3.1-2 Rissgrund, Ausbildung bei Thermoerüdung 5.4.2.1-20 Risskorrosion 5.4.1.2-8 Rissöffnungsart 5.2.1-7 Rissprüfungin Bohrungen 5.4.1-16 Risszähigkeit 5.2.1-3, 5.2.1-6 Einfluss von Probendicke 5.2.1-10 kritische 5.2.1-7 **Rohr**/-leitung LCF 5.4.1.2-1 Dämpfung 5.2.4-9 Geräusche in 5.2.4-17 Schwingungsanregung 5.2.4-17 Resonanz 5.2.4-17 Röntgenstrahlung, Wirkung auf Kunststoffe 5.3-1 **Röschenbildung**, Anzeichen für Lötrissigkeit 5.3-24 Rotierende Bauteile, Rissbildung 5.4.2.1-4 Rotor

Lagerung, Kreiselkräfte 5.4.3.1-14 Schwingungsanregung 5.4.3.1-2 von Turbomaschinen, LCF 5.4.1-3 **Rotorschaufel** (Turbine), Längenänderung 5.3.2-20 Rückfedern verspannter Systeme 5.2.2-1 **Rührwerke** 5.2.3-2 **Rumble** (engl.) niederfrequente Gasschwingung 5.4-19 **Rumbling** (engl). *wellige Oberflächentopografie, Siehe* Riffelbildung

### S

Scanning Electron Microscopy. (engl. SEM = REM) Siehe Raster-Elektronen-Mikroskop SCC (engl. Stress Corrosion Cracking) 5.2.1-7 Schaden Auswirkung der Kerbschlagzähigkeit 5.4.4-11 beherrschbarer 5.4.2-1 Ermitteln des Primärschadens 5.4.3.3-2 Inkubationszeit 5.1-3 LCF 5.4.1.2-1 Reproduktionsversuch 5.4.3.3-2 Ursache Auslegungsdaten 5.4.3.2-5 Temperatur 5.3-1 Verlauf auf zeitlichen rückschließen 5.4.3.3-2 nach Inkubationszeit 5.1-4 Schadensakkumulation 5.4.3.2-18 Zeitstand 5.3.2-20 Schadensbild bei Schwingungen 5.4-20 Schadenslinie/Schädigungslinie (im Wöhlerdiagramm) 5.4-6, 5.4.3.2-11 Schadensmechanismus LCF 5.4.1-5 Rissbild als Hinweis 5.3-17 Schadenszeitpunkt 5.4.3.3-2 Schädigung Abschätzung 5.3.2-20, 5.4.3.2-18 beim Mehrstufenversuch 5.4.3.2-11 durch versilberte Bauteile 5.3-25 bei Temperatur durch Verunreinigungen 5.3-14 Kriechen 5.3.2-11 Schädigungsmechanismus bei Kriechverformung 5.3.2-8 bei Kunststoffen 5.3.1-8 Schall Abstrahlung 5.2.5-2, 5.4.3.3-18 Schwingung 5.4-11 Schallermüdung 5.2.5-2 Schattenoptik (Sichtbarmachung von Strömunseffekten) 5.2.5-1 Schaufel (von Turbomaschine) Schwingungen 5.4-19

Verformung durch Schlagbeanspruchung 5.2.2-16 Scheiben (Rotor) Schwingung 5.4.3.1-2 Schwingformen 5.4.3.1-10 Werkstoff Spannungs-Dehnungs-Kurve 5.4.1-12 typische Fehlerhäufigkeit 5.4.1-9 Scherbolzen, Problematik 5.4.4-12 Scherbruch 5.2.1-7 Schergeschwindigkeit/Scherrate bei einem Fluid, Einfluss auf Viskosität 5.2.3-3, 5.2.3-5 Scherverflüssigung (Beton) 5.2.3-5 Scherversuch 5.2.2-6 Scherviskosität 5.2.3-5 Schichten Einfluss auf Thermoermüdung 5.4.2.1-12 reflektierende 5.4.2.1-12 Rissbildung in spröden 5.4.3.2-16 'Schießscharten', Merkmal am Bruchausgang 5.4.4-Schirmschwingung (Scheiben) 5.4.3.1-10 Schlag in Flüssigkeit 5.2.4-1, 5.2.4-17 Schlagbeanspruchung 5.2.1-7 spröder Werkstoff 5.2.1-14 Verformung der Schaufel einer Turbomaschine 5.2.2-16 Zeitlicher Verformungsverlauf 5.2.2-15 Schleifen Einfluss auf die Schwingfestigkeit 5.4.3.2-9, 5.4.3.2-10 Rissbildung 5.3-20 Schleudern (von Rotorteilen) auf Überdrehzahl 5.4.1-16, 5.4.1-18 Schlierenoptik (Sichtbarmachung von Srömungseffekten) 5.2.5-1 Schließgeschwindigkeit Absperrventil 5.2.4-17 Schlüssellochbohrung zur Elastizitätssteigerung 5.4.2-8 Schmelzperlen/-tropfen, Schädigung durch aufgespritzte 5.3-13 bei Titan 5.3-13 Schmiedestück. LCF-Riss von Werkstofffehler 5.4.1.2-4 Schmiedewerkstoff, Fehler 5.4.3.2-5 Schockbeanspruchung, Wirkung auf Stähle 5.2.2-11 Schockdruck in einem Fluid (Hugoniot Druck) 5.2.2-18 Vogelschlag 5.2.4-6 Schockwellen Technische Anwendungen 5.2.4-7 Formgebung 5.2.4-7 Zerkleinerung von Mineralien 5.2.4-7 Vogelschlag 5.2.2-18 Schornstein, Joukowski-Stoß im Gasstrom 5.2.5-6 Schrumpfen von Kunststoffen 5.3.1-8 Schubmodul (G-Modul), Einfluss auf Torsions-

schwingung 5.4.3.2-2 Schutzvorrichtungen an Bearbeitungsmaschinen gegen abfliegende Teile 5.2.2-2 Schwachstelle 5.4.1.2-8 Definition 5.4.3.2-13 Schwächung als Sollbruchstelle 5.4.4-12 Schweißen/Schweißung Einfluss auf das Containmentverhalten 5.2.2-13 von Thermoermüdungsrissen 5.4.2.1-2 Schweißspritzer bei Titan 5.3-13 Schwellbeanspruchung 5.4-26 Schwellbereich 5.4-26 Schwellenwert 5.1-3 Einfluss von Spannungskonzentration 5.1-3 Schwinganregung durch Zahnrad 5.4-19 Schwinganriss, Lage und Verlauf 5.4.3.1-10 Schwingbeanspruchung/Schwingbelastung 5.4.3.1-1 Abgekürzte Versuche 5.4-7 Einfluss der Knotenlinie 5.4.3.1-6 Kerbeinfluss 5.4-6 Lebensdauer Streuung 5.4-6 Verbrauch 5.4.3.2-18 Schädigungslinie 5.4-6 statistische Betrachtung 5.4.3.3-4 ungünstigste Kombination von Parametern 5.4.3.3-4 Verdichterleitapparate 5.4.3.3-1 von Überschallprofilen 5.4.3.3-1 Wechselzerrüttung 5.4-6 Schwingbewegung/-dehnung, durch innere Reibung örtliche Überhitzung 5.4-12 Schwingbruch 5.4-2, 5.4.1-7 Fahrradlenker 5.4.1.2-11 Faserverstärktem Kunststoff 5.4-19 Stadium 1-Phase 5.4.3.2-1 Schwingermüdung 5.4-1 Abhängigkeit der Dämpfung 5.4.3.3-21 Anrissphase 5.4-4 bei äußerer Druckbeanspruchung 5.4-29 im Dauerfestigkeitsbereich 5.4.3.1-1 Riss durch Lyra Mode 5.4.3.3-20 zulässige Beanspruchung 5.4.3.2-13 Schwingerregung Anstreifen von Schaufelspitzen 5.4.3.1-4 Bodenvortex 5.4.3.1-4 durch Einlaufströmung 5.4.3.1-4 Fan eines Turbotriebwerks 5.4.3.1-4 Schwingfestigkeit 5.4.3.2-9 Abhängigkeit von der Temperatur 5.4-3 Auslegungsdaten 5.4.3.3-2 Auslegungsphilosophie 5.4.3.2-6 axf-Wert 5.4.3.2-11 Bearbeitungsverfahren 5.4.3.2-2

beschichteter Bauteile 5.4.3.2-16 Diagramm nach Haigh 5.4.3.2-8 Einfluss der Bearbeitung 5.4.3.2-9 Einfluss der Funkenerosion 5.4.3.2-10 Einfluss der Haftfestigkeit von Schichten 5.4.3.2-16 Einfluss der Mittelspannung 5.4.3.2-8, 5.4.3.2-13 Einfluss der Probenform 5.4.3.2-5 Einfluss der Probenoberfäche 5.4.3.2-6 Einfluss der Querschnittsdicke 5.4.3.2-6 Einfluss des Kugelstrahlens 5.4.3.2-11 Einfluss des Schleifens 5.4.3.2-9 Einfluss des Spannungsgefälles 5.4.3.2-13 Einfluss des Spannungsgradienten 5.4.3.2-6 Einfluss von Rattermarken 5.4.3.2-6 Enfluss der Bearbeitung 5.4.3.2-6 Enfluss von Eigenspannungen 5.4.3.2-6 Ermittlung 5.4.3.2-6 Gefügeeinfluss 5.4.2.1-16 Grenzen der 5.4-26 Hochtrainieren 5.4-6, 5.4.3.2-11 Probenentnahme 5.4.3.3-2 Schädigungseffekt 5.4.3.2-11 Temperaturabhängiger enfluss einer Fehlstelle 5.4.3.2-8 Schwingform an Scheiben 5.4.3.1-10 Einfluss auf die Dämpfung 5.4.3.3-20 Schwingung Abhilfe durch konstruktive Gestaltung 5.4.3.3-9 Aeroelastische 5.4-18 Anregung 5.4.3.1-1, 5.4-15, Arten 5.4.3.1-3 durch Anstreifvorgänge 5.4-18 deformierten Zahnradzahn 5.4-19 Fertigungsverfahren 5.4-18 Leckströmung 5.4-18 Strömungsablösung 5.2.4-17 Zahnfrequenz 5.4-19 Anstreifvorgänge 5.4-14 Spuren, Rückschlüsse 5.4-21 Aufheizen einer Titanlegierung 5.4.3.3-21 Blade passing frequency (engl.) 5.4.3.1-4 Blisk 5.4.3.1-17 Bremsscheibe 5.4-23 Brücke, Fahrbahn 5.4-19 Campbelldiagramm 5.4.3.1-5 Dämpfung 5.4.3.3-12 durch Reibung 5.4.3.1-6 durch gefangene Medien 5.4-15 Halbfrequenzwirbel 5.4-15 Hydrodynamisches Paradoxon 5.4-15 E-Modul Änderung als Abhilfe 5.4-14

Eigenform 5.4-9 Einfluss axialer Abstände in Turbomaschine 5.4.3.3-9 der Dämpfung 5.4.3.1-6 des Deckbands 5.4.3.1-9 Elastische Verformung 5.4-9 Erzwungene.Schwingung Siehe Resonanzschwingungen 5.4-9 Flattern/'Flatterschwingung 5.4-19 Erregung 5.4.3.1-4 Flugzeugflügel 5.4-19, 5.4.3.1-14 Freie Schwingung 5.4-9 Fremderregung 5.4-12 Gekoppelte Schwingung 5.4.3.1-16 Gleitlager 5.4-15 Grundbiegeschwingung 5.4.3.1-9 Harmonische Schwingung 5.4-2, 5.4-9 hochfrequent 5.4.3.1-1 Identifikationsmerkmale 5.4.3.1-12 Instabilitäts-Schwingungen 5.4-12 Kamin 5.4-19 Knotendurchmesser 5.4.3.1-10 Knotenlinienverlauf 5.4.3.1-9 Kraftfahrzeug 5.4-22 Kritische Drehzahl 5.4-12 Labyrinth 5.4.3.1-2 Dichtungen 5.4-15 Luftdämpfung 5.4.3.1-6 Mechanische Anregung 5.4.3.1-4 Modalanalyse 5.4.3.1-6, 5.4.3.3-1 Orbiting 5.4-14 Periodische Schwingung 5.4-2 Resonanzschwingungen 5.4-12 Rohrleitung 5.2.4-17 Rotor einer Turbomaschine 5.4.3.1-2 Rückschlüsse auf Anregungsmechanismus 5.4.3.1-12 Schadensbilder 5.4-20 Schallabstrahlung 5.4-11 Schaufeln in Turbomaschinen 5.4-19 Verdichter 5.4.3.1-2 Scheibenschwingung 5.4.3.1-2 selbsterregte 5.4-12 Spannbolzen 5.4-12 Torsionsschwingung 5.4.3.1-9 Turbinenräder 5.4.3.1-2 Überhitzung einer Steckverbindung (Reibung) 5.4-12 überkritischer Betrieb 5.4-9 Unsystematische Erregungen 5.4.3.1-4 Unterkritischer Betrieb 5.4-9 von Anbaugeräten 5.4.3.3-8 Welle 5.4.3.1-2 Wirbelschleppenerregung 5.4.3.1-3 Zerrüttungsbereich in Wöhlerdiagramm 5.4.3.2-12

Schwingungsanalyse 5.4.3.1-6 experimentelle 5.4.3.1-6 mit den Stroboskop 5.4.3.3-8 Schwingungsbauch, Spannungen 5.4.3.1-9 Schwingungsdämpfer, Kolbenring 5.4.3.3-14 Schwingungseffekte, Überblick 5.4-9 Schwingungsform/Schwingform 5.4.3.1-6 Abhängigkeit der Dämpfung 5.4.3.3-20 Schirmschwingungen (Scheiben) 5.4.3.1-10 Schwingungsmessung an Verdichterrotorschaufeln 5.4.3.3-5 Behinderung durch Messsonde 5.4.3.3-6 Schwingungsrisskorrosion (SRK) 5.3.1-3 Schwingverschleiß 5.3-9, 5.3.1-5, 5.4.1.2-8. Siehe auch Fretting Fahrradlenker 5.4.1.2-11 Schwitzwasser Auflösung von Silber 5.3-25 Korrosion 5.4.1-16 Schwungscheibe/-rad, 5.4-23, 5.4.3.1-13 Bruch 5.2.2-2 Fasertechnik 5.2.2-3 keramische 5.2.2-3 Sekundärer Kriechbereich 5.3.2-6 Selbsterregte Schwingung 5.4-12 Selbstheilung bei Schwingermüdung 5.4-4 **SEM.** Siehe Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) Severity (engl). Siehe Lebensdauerverbrauch Sichelmond, Beruchflächenmerkmal 5.4.4-9 Sicherheit durch Verfestigungsverfahren 5.4.1-10 Sicherheitsabstand, gegen Bruch 5.4.4-12 Sicherungen gegen Druckstöße 5.2.4-14 Sigma-Phase, Versprödung 5.3-5 Silber/-verbindungen Auflösung durch Schwitzwasser 5.3-25 Bruch einer Verdichterscheibe 5.3-25 Diffusion in Heißteile 5.3-25 Korrosionswirkung 5.4.1-16 Lötrissigkeit durch 5.3-21, 5.3-23 Schädigung von Titanlegierungen 5.3-25 Sulfidation 5.3-25 Verschraubung 5.3-25 Silikonöl 5.2.3-2 Füllung von Kupplung 5.2.3-5 Sinterwerkstoff, ausschwitzen bei Überhitzung 5.3-13 Smart materials 5.4.3.3-26 Snapper (Schaufelabstützung) 5.4.3.1-9 Solarthermie, Dampfschlag 5.2.4-8 Sollbruchstelle 5.4.4-1 Anschlusswelle 5.4.4-12 Gestaltung und Probleme 5.4.4-12 gezielte Schwächung 5.4.4-12 Scherbolzen 5.4.4-12 Spacer. Siehe Rotorzwischenstufenring

Spanende Bearbeitung, Einfluss auf Schwingfestigkeit 5.4.3.2-9 Spannbolzen, Schwingung 5.4-12 Spannungen am Schwingungsbauch 5.4.3.1-9 Spannungs-Dehnungs-Kurve, zyklische 5.4.1-10 Spannungsamplitude/Spannungsausschlag 5.4-25 Spannungsgefälle/Spannungsgradient an einer Kerbe 5.4.4-1 Beherrschbarkeit eines Risses 5.4.2-1 Einfluss auf die Schwingfestigkeit 5.4.3.2-6, 5.4.3.2-13 Spannungsintensität 5.2.1-3, 5.4.4-2 Spannungskonzentration Einfluss auf Schwellenwert 5.1-3 gefährliche 5.4.1.2-2 Spannungskonzept, örtliches auf Gradientenbasis 5.4.4-7 Spannungsrissbildung in Kunststoffen 5.3.1-8 Spannungsrisskorrosion (SpRK) 5.2.1-7, 5.3.1-3 Spannungsverläufe (zeitliche) bei dynamischer Belastung, Beispiele 5.4-25 Spannungsverteilung an Knotenlinien 5.4.3.1-9 Spannungszustand, Ebener 5.2.1-7 Spindelpresse, LCF 5.4.1.2-3 **Spitzendruck** bei Druckstoß (Joukowsky-Stoß) 5.2.4-9 Sportgeräte, LCF 5.4.1.2-6 Spritzschicht, Einfluss auf Thermoermüdung 5.4.2.1-10 Sprödbruch. Siehe Trennbruch Bruchfläche 5.4.4-11 durch hohe Verformungsgeschwindigkeit 5.2.2-13 Spröde Werkstoffe 5.2.1-13 Festigkeit 5.2.1-14 bei Volumenfehlern 5.2.1-12 Kunststoffe 5.3-7 Metalle 5.3-7 Verhalten bei Schlagbeanspruchung 5.2.1-14 Versagensbild bei Gewalt 5.4.4-11 Spröde Schichten, Rissbildung 5.4.3.2-16 Sprödes Verhalten bei Überhitzung 5.3-11 Sprühdüsen, Einfluss der Viskosität 5.2.3-2 Stabiler Rissfortschritt 5.2.1-2, 5.2.1-5 Stabilisieren austenitischer CrNi-Stähle 5.3-5 Stadium I (Anrissphase) 5.3.1-2, 5.4.3.2-1 Stähle Schockbeanspruchung 5.2.2-11 Verhalten bei Bruchstückaufschlag 5.2.2-11 Versprödung unter Temperatureinfluss 5.3-5 Stall Siehe Strömungsabriss: Verdichter Standzeit (Zeitstand) 5.3.2-6, 5.3.2-8 Stängelkristalle 5.4.2.1-17. Siehe auch Kolumnare Kornausbildung Statistisches Verhalten von Bauteilen unter Schwingbeanspruchung 5.4.3.3-4

Staubpartikel, Auslösen von Erosion durch Aufschmelzen 5.1-4 Steckverbindung/Zentrierung, Überhitzung durch Schwingung 5.4-12 Steckverzahnungen (Vielkeilverbindung), Fretting 5.1-4 Steifigkeit dynamischer Reibungseinfluss 5.4-14 faserverstärkte Kunststoffe 5.3.1-12 Lager, Wellenschwingung 5.4-21 Eigenschaften von Einkristallwerkstoff 5.4.3.2-2 Steifigkeitssprung 5.4.1.2-11, 5.4.4-2 als Kerbe 5.4.4-1 Steilabfall, Kerbschlagzähigkeit 5.4.4-6 Stichflamme bei Gasleck 5.3-10 Stoß Beginn, Phase bei Vogelschlag 5.2.2-18 Belastung 5.2.2-6 Energieübertragung 5.2.2-1 Versagensverhalten 5.2.2-1 Vorgänge in Flüssigkeiten 5.2.4-3 Werkstoffkennwerte 5.2.2-1 Stoßdämpfer, Viskositätsverhalten 5.2.3-2 Stoßwelle Ablösung spröder Beläge 5.2.4-8 Entfernen von Ablagerungen in Rohrleitungen 5.2.4-8 Folgeschäden 5.2.4-7 Gesteinszertrümmerung 5.2.4-8 in Flüssigkeit 5.2.4-4, 5.2.4-7 in Gasen 5.2.5-1 kegelige Form 5.2.5-1 Stoßzentrum bei Vogelschlag 5.2.2-18 Strainrange Partitioning (engl.) LCF, 5.4-27 Strebenrisse in Gehäusen 5.4.2-6 Stress Corrosion Cracking (SCC engl.). Siehe Spannungsrisskorrosion Streuung der Kriechlebensdauer 5.3.2-12 von HCF-Festigkeiten 5.4.3.2-13 Striations (engl.). Siehe Rissfortschrittslinien Stroboskop zur Schwingungsanalyse 5.4.3.3-8 Strömungsablösung Schwingungsanregung 5.2.4-17 Vermeidung 5.4.3.3-12 Strömungsabriss in Abgasleitung 5.2.5-6 Strömungsbedingte Resonanzen 5.2.4-17 Strömungszustände, Ursachen für instationäre 5.2.4-10 Stufenversuch (Schwingfestigkeit) 5.4.3.2-11 Stützwirkung 5.4.3.2-8, 5.4.4-4, 5.4.4-7 bei einer Kerbe 5.4.4-1 Stützziffer 5.4.4-4 Sulfidation durch Silber 5.3-25 Superisolierung 5.3-7 Superplastisches Umformen 5.3.2-8

# Т

Taubildung, (bei Bewitterung) kunststoffschädigend 5.3.1-8 Tauglichkeitsnachweis 5.1-2 TBC (Thermal Barrier Coating, engl.). Siehe Wärmedämmschicht TCP (Tricresylphosphat) 5.3-7 Technischer Einkristall. Siehe Einkristall Temperatur Abhängigkeit der Schwingfestigkeit 5.4-3 beeinflusstes Bruchbild 5.3-12 Einfluss auf Bruchdehnung 5.3-2 Gefüge/-änderungen 5.3-4, 5.3-15 Dämpfung 5.4.3.3-23 Eigenspannungen 5.3-2 Elastizität 5.3-2 Festigkeit 5.3-2 Härte 5.3-14 Kerbverhalten 5.3-4 Kornausbildung 5.3-17 Kriechdehnung 5.3-2 Verfestigung 5.3-2 Wärmedehnung 5.3-4 Wärmeleitfähigkeit 5.3-5 einer Fehlstelle auf die Schwingfestigkeit 5.4.3.2-8 Erhöhung, Auswirkung auf die Kriechlebensdauer 5.3.2-2 nicht auslegungsgemäße 5.3.2-6 Grenzbereich für Werkstoffeinsatz 5.3.2-2 schadensursächliche 5.3-1 Schädigung der Korngrenzen 5.3-15 Verzug durch 5.3-14 Temperatur-Einsatzgrenze von Al- und Mg-Legierungen 5.3.2-3 Temperaturabhängigkeit Kerbeinfluss 5.4.3.2-8 Werkstoffeigenschaften 5.1-3, 5.3-2, 5.3.1-3 Temperaturabschätzung mit Anlauffarben 5.3-13 Temperaturänderung schnelle 5.4.2.1-8 **Temperatureinfluss** auf faserverstärkte Kunststoffe 5.3.1-11 Kerbschlagzähigkeit 5.3-5 Versprödung Stähle 5.3-5 Temperatureinwirkung, Kerbwirkung durch 5.4.4-3 Temperaturgradient beim Gießen, Einfluss auf Kornorientierung 5.4.2.1-17 Temperaturverteilung

bei Leckströmung 5.4.2-4 vergleichmäßigen 5.4.2-1 **Temperaturzyklen**, schadenswirksame 5.4.2.1-4 Tertiärer Kriechbereich 5.3.2-6 TF (Thermal Fatigue, engl.). Siehe Thermoermüdung Belastungsvorgang 5.4.2.1-6 Prüfung an Keilproben 5.4.2.1-6 Themoschock 5.4.2.1-1 Thermal barrier coatings (TBC, engl.). Siehe Wärmedämmschicht Thermal fatigue (TF, engl.) 5.4.1-4. Siehe auch Thermoermüdung Thermal mechanical fatigue/Thermo-mechanicalfatigue (TMF, engl.), 5.4.1-4. Siehe Thermomechanische Ermüdung Thermal shock (engl.). Siehe Themoschock Thermisch geschädigt, äußerer Befund 5.3-11 Thermische Kurzzeitbelastung 5.4-23 Thermische Trägheit 5.4.2.1-4 Thermoerüdung (engl. TF, Thermal Fatigue) 5.4.1-18, 5.4.2.1-1, 5.4.2.1-3, 5.4.2.1-6 Abhilfe 5.4.2-1 durch Wärmedämmschicht 5.4.2-8 Aufknöpfen von Kühlluftbohrungen 5.4.2.1-19 Ausbildung des Rissgrunds 5.4.2.1-20 Auslegung 5.4.2-3 Auslegungsdaten 5.4.2-10 Behinderte Wärmedehnung 5.4.2-1 Beschichtungen 5.4.2-10 Betriebseinfluss 5.4.2.1-9 Bewertung der Betriebstauglichkeit 5.4.2-3 Einfluss auf einen Werkstoff 5.4.2.1-10 Einfluss der Fertigung 5.4.2.1-9 der Beschichtung 5.4.2.1-10 der Konstruktion 5.4.2.1-9 der Wärmedämmschicht 5.4.2.1-10 des Gefüges 5.4.2.1-14 des Werkstoffs 5.4.2.1-10 einer Diffusionsschicht 5.4.2.1-10 einer Spritzschicht 5.4.2.1-10 von Kriechen 5.3.2-14 Eigenschaften, Ermittlung 5.4.2.1-14 Einkristallwerkstoff 5.4.2.1-10 erschwerte Rissbildung 5.4.2.1-17 Fail safe-Verhalten 5.4.2.1-9 Haltezeiten 5.4.2-10 konstruktive Gestaltung 5.4.2-3 Lebensdauerabschätzung 5.4.2.1-14 Merkmale 5.4.2.1-20 Orangenhaut 5.4.2.1-20 Modell des Vorgangs 5.4.2.1-6 Phasenverschiebung 5.4.2-10 Proben 5.4.2-8 Keilproben 5.4.2.1-1 Reparatur 5.4.2-3, 5.4.2-6 Schadenmechanismus 5.4.2.1-3, 5.4.2.1-6 schädigende Einflüsse 5.4.2.1-9

Schutz durch elastische Konstruktion 5.4.2-1 Strebenrisse an Gehäusen 5.4.2-6 Turbinenrotorschaufel 5.4.2.1-18 Verhalten einer Aufdampfschicht 5.4.2.1-12 Werkstoff Beurteilung 5.4.2.1-14 Datenermittlung 5.4.2-8 Thermomechanische Ermüdung (engl. TMF, Thermo-mechanical-Fatigue) 5.4.2.1-1 Thermoschock 5.4.2.1-8 Abhilfe durch Prallplatte 5.4.2.1-9 Thermozyklen in Verbrennungsmotoren 5.4.2.1-4 Thixotropisches Verhalten 5.2.3-5 Tiefkühlkost (Tieftemperaturanlage) 5.3-7 Tieflage, Kerbschlagzähigkeit 5.4.4-6 Tieftemperaturversprödung 5.3-10 Titanlegierung/Titan Anschmelzung 5.2.2-6 Aufheizen bei Schwingung 5.4.3.3-21 Einfluss von Schweißspritzern/Schmelztropfen 5.3-13 geeignete Proben 5.4-27 LCF 5.4.1.2-7 durch Werkstofffehler 5.4.1.2-4 Niedertemperaturverhalten 5.3-7 Rohre, Nachteile 5.4.4-3 Schädigung durch Silber 5.3-25 Tixotropie 5.2.3-1 TMF. (engl.) Siehe thermo-mechanicalfatigue; Thermoermüdung; Thermomechanische Ermüdung Lebensdauerabschätzung 5.4.2.1-14 Prüfung an Hohlproben 5.4.2.1-6 Versuche 5.4.2.1-14 Tomatenketchup, Viskositätsverhalten 5.2.3-5 **Tonraum** (Gasschwingung) 5.4-18 Torsion Merkmal an Bruchfläche 5.4.4-9 Schwingung 5.4.3.1-9 Einfluss des G-Moduls 5.4.3.2-2 Tragfähigkeit, Gleitlager 5.2.3-2 Trägheit, thermische 5.4.2.1-4 Transportgeräte, LCF-Belastung 5.4.1-2 Trennbruch (Gewaltbruch) 5.2.1-7 Tribokorrosion. Siehe Fretting Tricresylphosphat (TCP) 5.3-7 Triebwerk Eintritt, Druckstoß bei Pumpen 5.2.5-4 Festigkeitsauslegung des Einlaufkanals 5.2.5-4 Trockeneis (CO<sub>2</sub>), Temperaturen 5.3-6 Tropfenschlag. Siehe Regenerosion Turbinenräder, Schwingungen 5.4.3.1-2 Turbinenschaufel aus Einkristall 5.4.3.2-2 Thermoermüdung 5.4.2.1-18 **Turbolader** 5.4.2.1-3

Rad, Anstreifen 5.3-20 Schaden, Ölschlag 5.2.4-2 **Turbomaschinen**, Heißteile 5.4.2.1-4 **Turbotriebwerk**, Unwucht 5.4-9

### U

Überdrehzahl Schleudern 5.4.1-16 Einfluss auf LCF 5.4.1-18 Werkstoffeinfluss auf das Bruchverhalten 5.4.4-11 Überhitzung Anschmelzungen 5.3-13 durch Schwingbewegung 5.4-12 Härteabfall 5.3-17 Lötung 5.3-13 Metallografische Untersuchung 5.3-14 Rissbildung 5.3-11 sprödes Verhalten 5.3-11 Überkritischer Betrieb (Welle/Rotor) 5.4-9 Überlastung Gesichtspunkt bei Werkstoffwechsel 5.4.4-12 Ursachen 5.2.1-3 Überschall Profile, Schwingbeanspruchung 5.4.3.3-1 Strömung 5.2.5-2 Übertragbarkeit, Werkstoffwöhlerlinien auf Bauteil 5.4.4-7 Umgebung/Umwelt 5.3.1-1 Atmosphäre, Einfluss auf Oberflächenanrisse 5.3.2-8 Einflüsse, Wirkung auf Kunststoffe 5.3-1 Umlaufbiegung 5.4-20 Merkmal an Bruchfläche 5.4.4-9 Unterkritischer Betrieb, Wellenschwingung 5.4-9 Unterspannung (dynamische Belastung) 5.4-25 Unwucht durch Eigenspannungen 5.3-21 Turbotriebwerk 5.4-9 Welle 5.4-9

### V

Vakuum Kaltverschweißen (Fressen) 5.3.1-4 Verhalten von Bauteiilen 5.3.1-4 Ventil Keramikscheiben 5.2.4-17 Wirbelablösung 5.2.4-18 Verbrauchte Lebensdauer. *Siehe* Schädigung Verbrennungsmotoren, Thermozyklen 5.4.2.1-4 Verbrennungsvorgang Brennkammer 5.4-19 Schwingungen 5.4-19 Verdampfer 5.3-10 Systeme 5.3-6
## Sachregister

Verdichter Leitapparat, Schwingbeanspruchung 5.4.3.3-1 Schaufeln DMS-Messungen 5.4.3.3-6 Rotor, Schwingungsmessung 5.4.3.3-5 Scheibe, Bruch durch Silber 5.3-25 Schwingungen 5.4.3.1-2 Biegeschwingungen 5.4.3.1-2 Vereisung, Wärmetauscher 5.3-10 Verfestigender Werkstoff 5.4.1-12 Verfestigung Temperatureinfluss 5.3-2 Verfahren, Sicherheit durch 5.4.1-10 Zonen 5.4.4-3 Verformung Elastische bei Schwingung 5.4-9 Geschwindigkeit, Einfluss auf Bruchverhalten 5.2.1-7 Werkstoffverhalten 5.2.2-13 Verkleben als Schaden, Schaufelfüße durch Schmelzen von Verunreinigungen 5.4.3.1-6 Versagen Mechanismus, Wälzlager 5.4-30 Neuer Technologien 5.4.1.2-7 Verhalten bei Stoß 5.2.2-1 Verschlimmbesserung 5.4.1.2-8 fehlende Dämpfung 5.4-12 Verschmutzung, Einfluss auf Anlauffarben 5.3-13 Verschraubung, Einfluss von Silber 5.3-25 LCF 5.4.1-2 Versetzungskriechen 5.3.2-11 Versilberten Bauteile, Schädigung 5.3-25 Versprödung durch Hochgeschwindigkeitsverformung 5.2.2-1, 5.2.2-16, 5.2.4-6 Kornwachstum 5.3-6 Sigma-Phase 5.3-5 Stähle, Temperatureinfluss 5.3-5 475° 5.3-5 Verstimmung schwingender Strukturen 5.4.3.3-13 Verunreinigungen Schädigung bei Temperatur 5.3-14 verkleben von Schaufelfüßen 5.4.3.1-6 Verzögerte Rissbildung, Keramik und Glas 5.3-1 Verzug 5.3-21 bei Temperatur 5.3-14 durch Kriechen 5.3.2-20 Vibrationsverflüssiger/verteiler (z.B. bei Beton) 5.2.3-2 Vico-Kupplung/Viskosekupplung 5.2.3-2, 5.2.3-5 Viskosität 5.2.3-1 Allradantrieb 5.2.3-2 beeinflussende Parameter 5.2.3-2 Bremsen 5.2.3-2

Einfluss der Schergeschwindigkeit 5.2.3-3 Kupplungen 5.2.3-2 Modell nach Newton 5.2.3-5 Lack 5.2.3-2 Rheopexie 5.2.3-5 Scherrate 5.2.3-5 Sprühdüsen 5.2.3-2 Stoßdämpfer 5.2.3-2 Thixotropisches Verhalten 5.2.3-5 Tomatenketchup 5.2.3-5 Verhalten 5.2.3-5 Wärmeentwicklung 5.2.3-5 Wirkung eines Magnetfelds 5.2.3-6 Zeiteffekt 5.2.3-5 Vogelschlag Abfließdruck 5.2.4-6 Druck Oszillation 5.2.2-18 Verlauf 5.2.2-18 Ersatzmassen 5.2.4-5 Schock/Stoß Beginn als 1. Phase 5.2.2-18 Druck 5.2.4-6 Wellen 5.2.2-18 Zentrum 5.2.2-18 Vogelschlagverhalten, faserverstärkte Kunststoffe 5.2.4-6 Volumen Abhängigkeit der Dämpfung 5.4.3.3-20 belastetes 5.2.1-13 Veränderung Gefügebedingt bei Metallen 5.3-21 Kunststoffe 5.3.1-8 von Proben 5.4.3.2-5 Volumenfehler bei spröden Werkstoffen 5.2.1-12

## W

Wälzlager, Versagensmechanismus 5.4-30 Wandstärke, Einfluss auf das Containmentverhalten 5.2.2-13 Wärmedämmschicht Einfluss auf Thermoermüdung 5.4.2.1-10 gegen Thermoermüdung 5.4.2.1-8 Wärmedehnung 5.3-7 behinderte 5.4.1-18 Temperatureinfluss 5.3-4 FVK 5.3.1-12 Wärmeentwicklung, Viskositätsabhängigkeit 5.2.3-5 Wärmeleitfähigkeit, Temperatureinfluss 5.3-5 Wärmespannungen 5.4-24 Wärmetauscher, Vereisung 5.3-10 Warmriss 5.3-15, 5.3-20 Warmversprödung 5.3-5 Warmzerreißfestigkeit 5.3.2-2

Wartung, Zusammenhang mit Zeitstandbeanspruchung 5.3.2-17 Wäscheschleuder (Schwingungsverhalten) 5.4-9 Wasserhammer 5.2.4-9 Wasserschlag 5.2.4-1, 5.2.4-10 Dampfturbine 5.2.4-4 durch Kavitation 5.2.4-2 durch Kondenswasser in Dampfmaschine 5.2.4-2 durch Kühlwasser 5.2.4-2 Überlastung von Drucklagern 5.2.4-4 Wasserstoff Atomar 5.3-9 Entstehung aus Erdgas 5.3.1-3 Flüssiger 5.3-7 Speicher 5.3-6 Tank 5.3.1-3 Wasserstoffversprödung 5.3-9, 5.4.1.2-8 WDS. Siehe Wärmedämmschicht Wechselbeanspruchung 5.4-26 Wechselverfestigung 5.4-4 Wechselzerrüttung 5.4-6 bei Schwingbeanspruchung 5.4-6 Weibullmodul (Ausfallstatistik) 5.2.1-12 Welle Biegeschwingbruch 5.4-20 Ermüdungsausbrüche 5.4-20 Laufspur bei Schiefstand 5.4-21 Schwingung 5.4.3.1-2 Unwucht 5.4-9 Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit in Flüssigkeit 5.2.4-9 Weltraum Bedingungen 5.3-9 Niedertemperatur 5.3-6 Technik 5.3-7 Werkstoff Beurteilung, Thermoermüdung 5.4.2.1-14 Daten Thermoermüdung 5.4.2-8 zur Auslegung eines Bauteils 5.4.1-10 Einfluss auf das Bruchverhalten bei Überdrehzahl 5.4.4-11 auf Thermoermüdung 5.4.2.1-10 der Belastungsgeschwindigkeit 5.2.1-10 der Dehngeschwindigkeit 5.2.2-16 der Verformungsgeschwindigkeiten 5.2.2-13 Entfestigend 5.4.1-12 HCF 5.4.3.2-1, 5.4.3.2-1 lokales elastoplastisches Verhalten 5.4.4-7 bei Stoß 5.2.2-1 Bestimmung 5.3.2-18 Probleme bei Zeitstandbeanspruchung 5.3.2-16 spröd 5.2.1-13 temperaturabhängiges Verhalten 5.1-3, 5.3-

2, 5.3.1-3 Temperaturgrenzbereich 5.3.2-2 verfestigend 5.4.1-12 Wöhlerlinien, Übertragbarkeit auf Bauteilwöhlerlinien 5.4.4-7 Werkstofffehler 5.4.1.2-2 LCF-Riss in Scheibe 5.4.1.2-4 LCF-Schäden 5.4.1.2-1 Werkstoffwechsel, Gesichtspunkt der Überlastung 5.4.4-12 Werkzeugmaschinen, Schutzvorrichtungen 5.2.2-2 Wet start (engl.). Siehe Fehlstart Whip-Instabilität (whipping ) 5.4-14 Whirling (engl.) 5.4-14 Wiedererstarrte Zone 5.4.2.1-10 Windenergieanlagen (WEA) 5.4.3.1-14 Kreiselkräfte 5.4.3.1-14 Wirbel, Ablösung an Ventil 5.2.4-18 Wirbelschleppenerregung 5.4.3.1-3 Wirkungsgrad, Einfluss der Kriechverformung auf den 5.3.2-14 Wismut, auslösen von Lötrissigkeit 5.3-21 Witterung, Wirkung auf Kunststoffe 5.3-1 Wöhlerdiagramm/-kurve 5.4.1-4, 5.4.1-6, 5.4-3, 5.4.3.2-11 Schädigungsstadien 5.4-6 Wolkenscheibeneffekt 5.2.5-2

## Z

Zähbruch. Siehe Scherbruch Zäher Werkstoff, Versagensbild bei Gewalt 5.4.4-11 Zähigkeit Enfluss auf Kerbempfindlichkeit 5.4.4-1 Riss- und Kerbschlag-Temperatureinfluss 5.3-4 Zahnrad Schwinganregung, Zahnfrequenz 5.4-19 Zeitbruch 5.4-2 Zeitdehngrenze 5.3.2-1 Zeitfestigkeit 5.4-3 Zeitliche Spannungsverläufe dynamischer Belastungen (Beispiele) 5.4-25 Zeitstand Auslegung 5.3.2-16 Beanspruchung beeinflusst durch Wartung 5.3.2-17 Zonen in gekühlten Schaufeln 5.3.2-20 Schadensakkumulation 5.3.2-20 Betriebsbelastung 5.3.2-16 Brüche 5.3.2-10 Grenztemperatur 5.3.2-1 Kurve 5.3.2-5 Schäden/Schädigung Abhilfen 5.3.2-16 Abschätzung 5.3.2-20

Beschichtungen 5.3.2-22 Gefügeveränderungen 5.3.2-22 Werkstoffprobleme 5.3.2-16 Zeitstandfestigkeit 5.3.2-1, 5.3.2-2, 5.3.2-3 Einkristallegierungen 5.3.2-4 Gefügeeinfluss 5.4.2.1-16 Zentrifuge (Schwingung) 5.4-9 Zerkleinern Niedertemperatur 5.3-6, 5.3-7 von Mineralien durch Schockwellen 5.2.4-7 Zerrüttungsbereich, Schwingermüdung 5.4.3.2-12 Zersplittern, Energieaufnahme 5.2.2-9 Zerstörungsfreie Prüfung auf Anrisse 5.4.1-2 Forderungen an 5.2.1-16 Zufall, Betrachtung des Einflusses 5.4.3.3-4 Zugachsen, LCF 5.4.1-2 Zugeigenspannungen durch Bearbeitung 5.3-21 Zuklemmen von Rissen 5.4.1-16 Zulässige Fehlergröße, Abschätzung durch bruchmechanische Betrachtung 5.4.1-9 Zusammenwirken von Effekten/Einflüssen 5.3.1-2 Kavitationserosion 5.1-6 Zusatzverdichter. *Siehe* Coverplate (engl.) Zweimassen- Zweifeder-System 5.4.3.3-14 Zyklische Ermüdung im plastischen Bereich (LCF) 5.4.1-1 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve 5.4.1-10 Zyklischen Prüfung mit Haltezeiten 5.4.1.2-5

