

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 1: Problemanalysen, Werkstoff- Konstruktions- und Betriebseinflüsse und deren Auswirkungen mit besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus.



Axel Rossmann

---

**1. Auflage**  
(Serie 1.6)

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](http://www.turboconsult.de)
- per E-Mail: [turboconsult@gmx.de](mailto: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. Dabei geht es insbesondere um das Verständnis zur Bewertung und Einordnung der für die Auslegung von Maschinenelementen üblicherweise notwendigen Kennwerte, Korrekturen und Sicherheiten. Ein Anliegen der Anwendungsorientierung, d.h. der Praxisrelevanz. Dafür ist

### **das Bewusstsein der Probleme wichtiger als das reine Wissen.**

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

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

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

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

## 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** (entspricht 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)

Wie groß ist die Chance, einen Riss rechtzeitig zu erkennen und zu beherrschen?

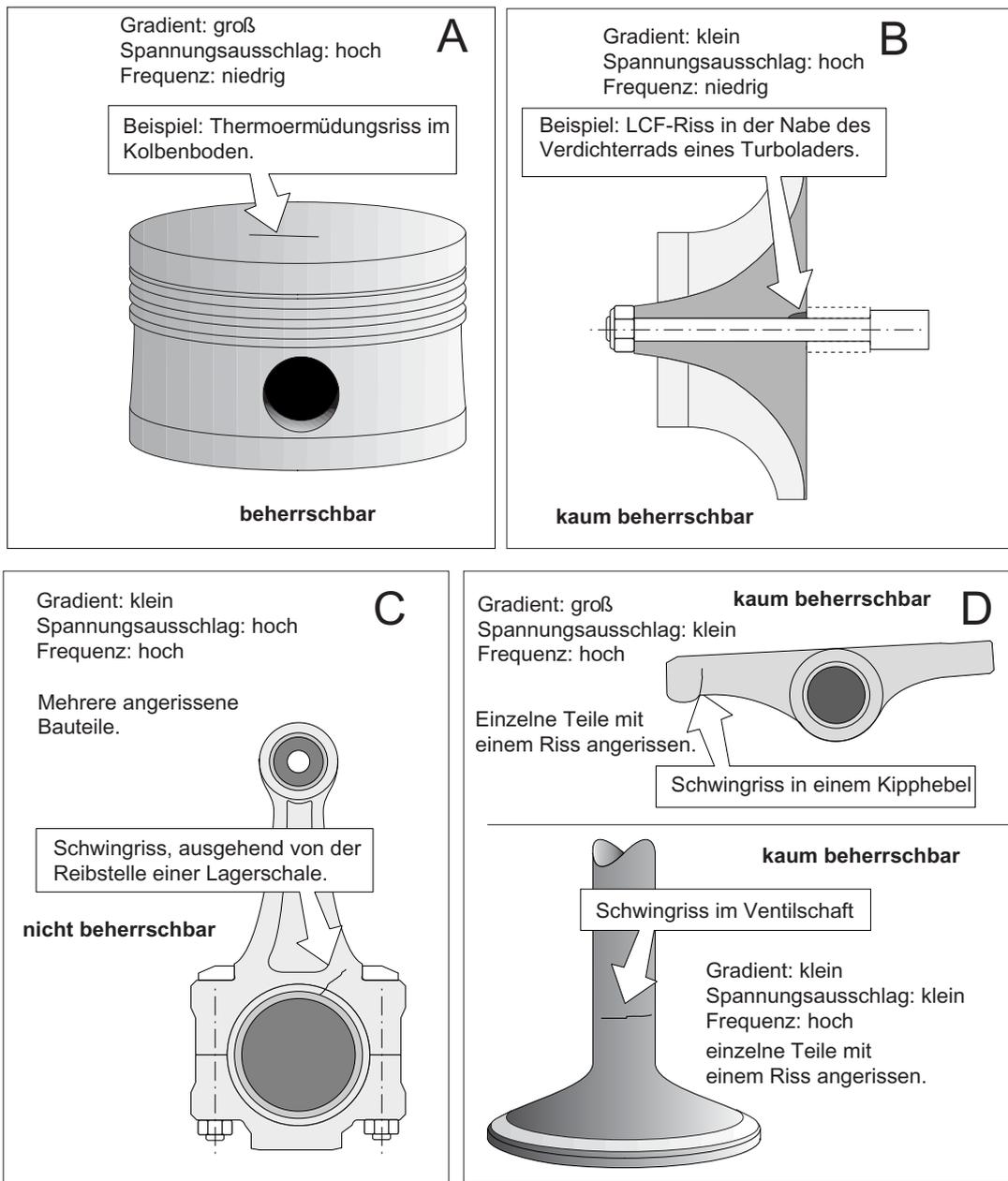


Bild 1-0

- **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 Verhalten 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

### Vorwort

# Problemanalysen

## 1. Einführung

1.1 Die Gefahr unberücksichtigter Betriebsbedingungen

1.2 Wissensmanagement

## 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

5.5.1.3.1 Dieseleffekt

5.5.1.4 Maßnahmen gegen Erosionsschäden

## 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

5.9.1.1 Einfluss der Topografie auf das Verhalten von Reibungsflächen

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**

---

# Problemanalysen

