

Axel Rossmann

# Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen

Unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus

- Studierende
- Konstrukteure
- Fertigung
- Qualitätssicherung
- Reparatur
- Untersucher
- Gutachter

Band 3 : Halbzeug, Rohteile, Werkstofffehler.  
Fertigung: Typische verfahrensspezifische  
Probleme, Mechanismen, Ursachen.  
Handling, Verpackung und Lagerung.  
Reparatur: Grenzen, Verfahren, Erprobung,  
Zulassung.



Axel Rossmann

---

**1. Auflage**  
(Serie 1.0)

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 irgend eine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

© 2012 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:**

**Fax Nr. (Deutschland) 08131 50 50 67**

ISBN xxxxxxxxxxxxxxxx

---

## Vorwort

Dieser Band 3 der Reihe „**Probleme der Maschinenelemente - erkennen, verhüten und lösen**“ befasst sich mit „**Problemen der Fertigung von Maschinenelementen**“. Der Inhalt lehnt sich weitgehend an den Band 4 der Reihe „Die Sicherheit von Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“. Damit wird die Erfahrung dieses High Tech-Maschinenbaus genutzt, der bereits traditionell die Forderungen des **Leichtbaus** erfüllt.

Fragen zur **Qualitätssicherung** sind wegen der **Stofffülle** ist ein eigener **Band 4** gewidmet. Auf diesen wird häufig im Text verwiesen.

Es beginnt schon vor der Hardware mit der **Konstruktion in Entwurf und Auslegung**.

Bereits die **Auswahl des Werkstoffs** und dessen Herstellungsweg beruhen auf Vorgaben des Konstrukteurs, der sich auch um die Einhaltung kümmern sollte.

Die **geeigneten Fertigungsverfahren** sind nicht zuletzt von der konstruktiven Gestaltung und der Bauteilbelastung bestimmt. Hier muss sich der Konstrukteur bereits im Vorfeld mit der ‘Fertigung’, der Rohteilbeschaffung und der Qualitätskontrolle absprechen.

Um die **Betriebsicherheit** der Neuteile für den Einsatz zu gewährleisten, ist muss für geeigneten **Transport, Lagerung und Behandlung** zu sorgen. Auch hier ist der **Konstrukteur als technisch Gesamtverantwortlicher des Produkts** / Maschinenelements gefordert.

Die in der Produktion angewendeten und vom Konstrukteur vorteilhaft zu nutzenden **Vorschriften** sind über lange Jahre, nicht zuletzt aus der Erfahrung, entstanden. Sie gewährleisten die im ‘anspruchsvollen Maschinenbau’ wie dem Leichtbau erforderliche Bauteilsicherheit.

**Deshalb soll dieses Buch dazu dienen, die Hintergründe für die Forderungen von Spezifikationen und Vorschriften zu verstehen. Dies ist eine wichtige Motivation für deren strikte Anwendung.**

Der vorliegende Band befasst sich im Schwerpunkt mit Themen aus der Fertigung, deren Verständnis notwendig ist, um **Probleme und Fehler möglichst vorbeugend zu vermeiden**. Natürlich geht es auch um die **Minimierung von Ausschuss**. Dieser entsteht insbesondere durch die gegenseitige Beeinflussung von Problemen verschiedener Fertigungsschritte. Intensiv werden Fehler an Bauteilen behandelt, für die erfahrungsgemäß eine größere Wahrscheinlichkeit besteht Betriebschäden zu verursachen. Hervorragende Fachliteratur wird in ausreichender Menge angeboten. Hier geht es jedoch in erster Linie um die Beschreibung der Verfahren, deren Anwendung und optimale Prozessparameter. Dagegen sucht man eine zusammenfassende **Darstellung von Produktionsfehlern an Halbzeug und Fertigteil** und deren Einfluss auf das Bauteilverhalten vergeblich.

Viele Bilder entsprechen häufigen Fragestellungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Ähnlich einem Nachschlagewerk wurden die Bildtexte mit möglichst umfassenden Informationen ausgestattet. Gegebenenfalls werden Hinweise auf weitere Bilder gegeben, die das Thema ebenfalls behandeln. Das soll dem Leser ein mühsames Zusammensuchen von Informationen ersparen. So wird jedes Bild zu einem „Informationsknoten“ in einer Vernetzung von Bildern und Literatur. Entsprechend dieser Zielsetzung wurde bewusst in Kauf genommen, dass manche Erklärungen an verschiedenen Stellen wieder auftreten.

---

## Was mit der besonderen Form dieses Buchs erreicht werden soll.

**Motivation:** Interessante 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. Das sollte bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums für die Industrie von Interesse sein.

**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. Dabei soll ein umfangreiches Sachregister helfen..

**Vertiefungsmöglichkeit** mit Hilfe von Literaturhinweisen. Viele haben Angaben zum kostenlosen Down-Load im Internet.

### 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. Das 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** ermöglicht die Nutzung als Nachschlagewerk in der Praxis. In pdf-Form kann das Buch hervorragend mit einer **Suchmaschine** im Reader auch in tragbaren elektronischen Geräten genutzt werden.

---

**Beispiel:**

Siehe Bild 6.1.1.2-2 (Lit. 6.1.1.2-3): Die weitaus meisten **Brüche und Risse in Schrauben** des Triebwerksbaus haben, bis auf Gewaltbrüche (Bild 6.1.1.2-1) bei denen es sich gewöhnlich um Folgeschäden handelt, ein zumindest **makroskopisch sprödes Aussehen**. Dies kann verschiedene Ursachen haben.

**Schadensursächliche Versprödungen:**

**Spannungsrissskorrosion** (Band 1 Kapitel 5.6.3.1) ist eine potenzielle **Bedrohung hochfester Schrauben und Muttern** aus Stählen („A1“, „A2“). Zu Rissen und Brüchen kommt es unter auslegungskonformen Betriebseinflüssen nur, wenn das **Gefüge/der Werkstoff von den Vorschriften abweicht**. Meist lässt sich dies mit dem **Überschreiten spezifizierter Härtegrenzen** (meist 32 HRc) nachweisen. Die Bruchbilder (Bild 6.1.1.2-3 und Band 1 Bild 5.6.3.1.1-6) erscheinen oft ausgeprägt kristallin (Bild 6.1.1.2-3) und weisen Korrosionsmerkmale (Rost), insbesondere im Ausgangsbereich auf. Mikroskopisch lässt sich an auswertbaren Bruchflächen diese Schadensart vom Fachmann problemlos und sicher identifizieren. Merkmale zeigen die **Verwandtschaft des Schädigungsprozesses zur Wasserstoffversprödung** (Band 1 Bild 5.7.1-2).

**Wasserstoffversprödung** („B1“, „B2“, „B3“) wird von Wasserstoff verursacht, der bei einem **nicht vorschriftsgemäßen** (zu langer Zeitraum bis zur Entsprödung) **Fertigungs- oder Überholungsprozess** in das Material eingedrungen (diffundiert) ist (Band 1 Bild 5.7.1-3 und Bild 5.7.1-4). Diese Versprödung entwickelt sich über **längere Zeit** (Lagerung, Betrieb), ist **irreversibel** und **nicht mit einem Schlagversuch nachweisbar** (Band 1 Bild 5.7.1-6). Typische Verfahren, die eine Wasserstoffversprödung verursachen können sind galvanische Beschichtungen, Ätzen und das Abziehen von Schichten (Band 1 Bild 5.7.1-3)

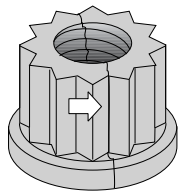
**Versprödung durch Eindiffusion von Fremdmetallen** (SMIE, Band 1 Bild 5.8.2-1). Diese Gefahr besteht bei unvorgesehen **hohen Betriebstemperaturen**. Risse gehen **bevorzugt vom Gewinde** („C1“) aus (Bild 6.1.1.2-9).

**Versprödung durch ‘Einschießen’ von Fremdmetallschmelze** (Lötrissigkeit, engl. LME, Band 1 Bild 5.8.1-2 und Bild 5.8.1-3). Dabei dringt in einem schnellen Vorgang benetzende **Metallschmelze** in den unter ausreichender **Zugspannung** stehenden Werkstoff („D1“). Die Bruchfläche kann im Anrissbereich eine **ungewöhnliche Verfärbung** aufweisen (z.B. silbrig) die mit Oxidation nicht zu erklären ist.

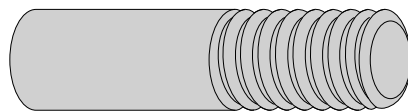
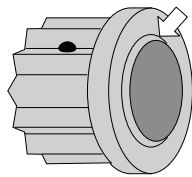
**Versprödung durch ‘Werkstoffalterung’** (Band 1 Bild 5.3-1.2). Beispielsweise können warmfeste Stähle mit Chrom, Molybdän und Vanadium bei zu hohem Vergüten nur noch ein Zehntel der geforderten Kerbschlagzähigkeit aufweisen. In diesem Fall der Flanschschraube eines Dampfturbinengehäuses lag die Zugfestigkeit mit über 1000 MPa deutlich über der maximal zulässigen von 850 MPa. Damit besteht im Betrieb die Gefahr von **Warmsprödbrüchen** („E1“, Lit- 6.1.1.3-6). Auch hier zeigt sich wieder, dass bei der Werkstofffestigkeit ‘weniger mehr’ sein kann.

Bild zum Beispiel siehe folgende Seite.

## Wichtige Schadensbilder und Ursachen für Sprödbrüche an Schrauben und Muttern.

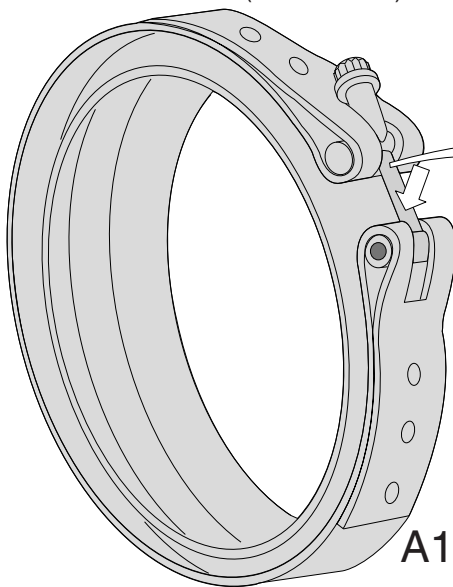


**D1** Spröd durchgerissene Schraubenmutter. Material Typ 12%-Cr-Stahl, Härte 44 HRC, mit Kadmium-Korrosionsschutzschicht. Das bei Betrieb geschmolzene Kadmium führte zur Löttrissigkeit (LME)



**B1** Spröd durchgerissene Schraube. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit (bis 1480 MPa) über der max. zulässigen Grenze von 1380 MPa. Bei der Beschichtung mit Kadmium drang Wasserstoff ein und führte zur Wasserstoffversprödung.

Spannschraube  
(12% Cr-Stahl)

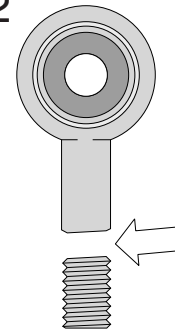


**A1** Spröd gebrochene Schrauben. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit über der max. zulässigen Grenze. Im Betrieb unter Meeresatmosphäre und/oder Schwitzwasser (Cl-Einwirkung) erfolgte Spannungsrisskorrosion.

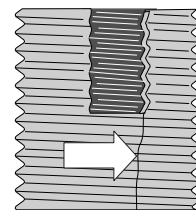


Schubstange (Vergütungsstahl) mit Bruch infolge Spannungsrisskorrosion wegen ungünstigem Gefüge (zu hart).

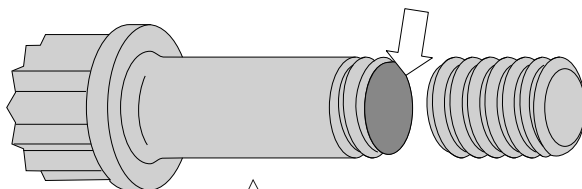
**A2**



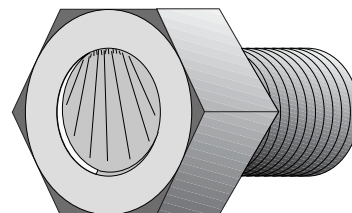
Schubstange (Vergütungsstahl verkadmet) mit Rissen durch Wasserstoffversprödung **B3**



**B2** Gewindeeinsatz (Einsatzstahl verkadmet) mit Riss durch Wasserstoffversprödung



**C1** Sprödbruch durch Diffusion im festen Zustand (SMIE) von Metallen wie Silber oder Kadmium bei erhöhter Betriebstemperatur



48 mm

**E1** Versprödung durch 'Werkstoffalterung'

**Bild zum Beispiel**

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.

Berater

- Gräter, Reinhold (Wärmebehandlungen und Werkstoffbesonderheiten)
  - Linska, Josef (galv. Prozesse)
  - Buchmann, Werner (Schmiedeteile)
  - Wege, Robert (Gussteile)
  - Friedberger, Katrin (Zerspanung)
  - Bronn. Horst (Zerspanung),
  - Sikorski, Siegfried (FVK, Konzepte und Technologie der Flugtriebwerksanwendungen)
  - Schober, Michael (FVK - Produktionstechnik)
  - Schönacher, Reinhold (FVK Produktionsrealisierung)
-

## Inhalt

### Vorwort

# Konstruktionseinflüsse auf die Fertigung

## 10. Die fertigungsrelevanten Aufgaben des Konstrukteurs:

Gestaltung, Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Arbeitsfolgen, Reparatur

# Halbzeug

## 11. Werkstofffehler - Probleme bei Rohteilen und Halbzeug

11.1 Ursachen für Probleme bei Rohteilen und Halbzeug

11.2 Schäden durch Probleme bei Rohteilen und Halbzeug

*11.2.1 Gussteile*

*11.2.2 Schmiedeteil*

*11.2.2.1 Schadensbeispiele*

*11.2.3 Heißisostatpressen (HIP)*

*11.2.3.1 Regeneration von Heißteilen*

11.3 Abhilfen gegen Schäden aus Problemen an Rohteilen und Halbzeug

# Herstellung

## 12. Fertigungsverfahren

12.1 Faktoren die Fertigungsprobleme und Schäden begünstigen

12.2 Fertigung und Betriebsverhalten der Bauteile

*12.2.1 Verfahrensspezifische Probleme und Schäden*

*12.2.1.1 Spanende Bearbeitung*

---



- 12.1.1.1 Schleifen*
  - 12.2.1.1.2 Drehen, Bohren und Fräsen*
  - 12.2.1.2 Spanlose Bearbeitung (ECM und EDM)*
  - 12.2.1.3 Schweißen*
    - 12.2.1.3.1 Konventionelle elektrische Schmelzschweißverfahren*
      - 12.2.1.3.1.1 Abhilfen bei Problemen an WIG und MIG Schweißungen*
    - 12.2.1.3.2 Widerstandsschweißen: Punkt- und Rollnahtschweißen*
    - 12.2.1.3.3 Elektronenstrahlschweißen*
    - 12.2.1.3.4 Reibschweißen*
    - 12.2.1.3.5 Diffusionsschweißen*
  - 12.2.1.4 Löten*
  - 12.2.1.5 Klebverbindungen*
  - 12.2.1.6 Verfestigungs- und Abrasionsstrahlen*
  - 12.2.1.7 Reinigung und Ätzen*
  - 12.2.1.8 Beschichtungen*
    - 12.2.1.8.1 Diffusionsschichten*
    - 12.2.1.8.2 Thermische Spritzschichten*
    - 12.2.1.8.3 Galvanische Schichten*
    - 12.2.1.8.4 Lacke und Elastomere*
  - 12.2.1.9 Wärmebehandlungen*
  - 12.2.1.10 Fasertechnik*
    - 12.2.1.10.1 Oberflächenbehandlung von Formwerkzeugen - Trennmittel*
    - 12.2.1.10.2 Spanende Bearbeitung von FVK*
    - 12.2.1.10.3 Konstruktive Gestaltung*
-

# Handling

## 13. Verpackung, Transport und Lagerung

# Reparatur

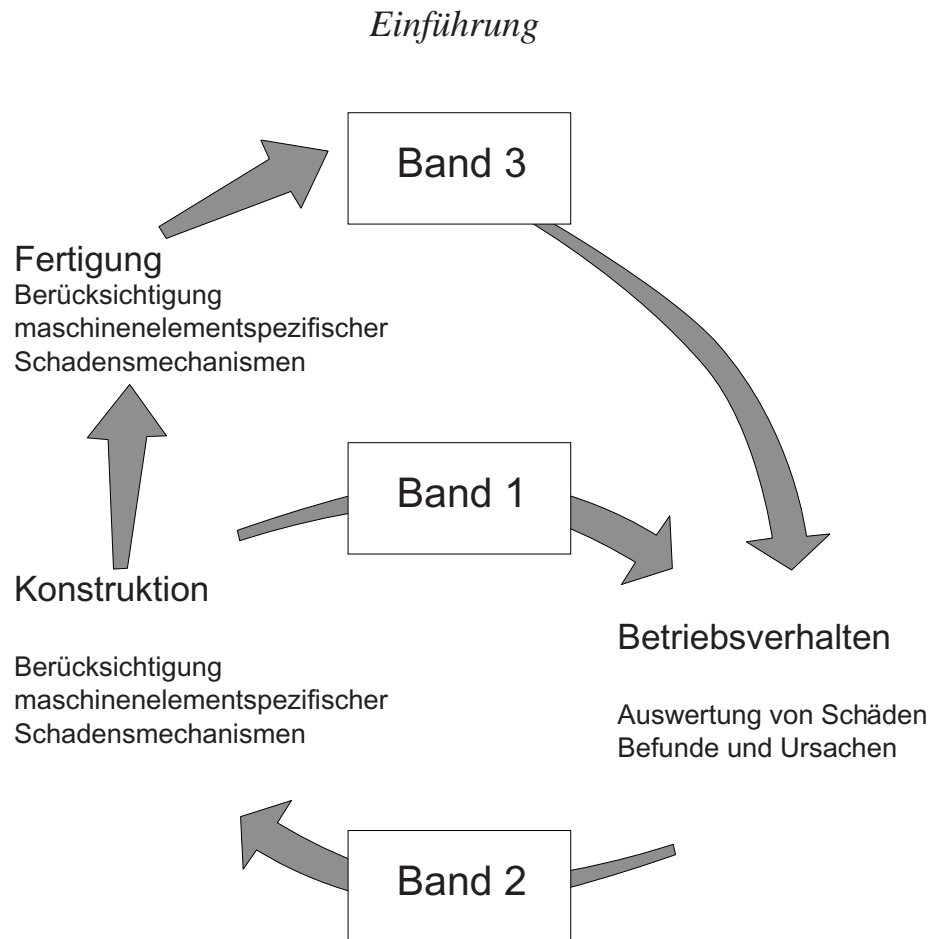
## 14. Reparatur gelaufener Bauteile

- 14.1 Grenzen der Reparierbarkeit
- 14.2 Entwicklung von Reparaturverfahren
- 14.3 Zulassung von Reparaturen
- 14.4 Reparaturprüfung

## Sachregister

---

# **Herstellungsprobleme von Maschinenelementen**



Mit der **Tendenz zum Leichtbau** und damit zu **Strukturen hoher Festigkeitsauslastung** eines möglichst großen Volumenanteils und so meist zwangsläufig einer großen Oberfläche nehmen die Anforderungen an die Fertigung von Bauteilen hoher Sicherheit gegenüber dem konventionellen Maschinenbau deutlich zu. Die **Fertigung beeinflusst** (Eigenspannungen, Verfestigung/Entfestigung, Verformung/Härte, Rauigkeit/Topografie, Korrosionsverhalten usw.) gerade die oft besonders hoch belastete **Oberfläche** (Biegung, Torsion). Das gilt gerade für die **Schwingerermüdung**. Die bauteilspezifisch optimale Fertigung beruht in hohem Maß auf Empirie. Dazu gehören viele Qualitätsmerkmale und/oder charakteristische Anzeichen von Problemen, insbesondere der Bauteiloberfläche. Ihr wird im vorliegenden Band 3 besondere Aufmerksamkeit zuteil. Konstrukteur und Fertigung sind zur engen Zusammenarbeit verpflichtet. Gewöhnlich wird eine Auffälligkeit in der Fertigung entdeckt und vom Konstrukteur beurteilt. Er kann Untersuchungen wie im Werkstofflabor (Metallografie) und zerstörungsfreie Prüfungen anfordern. Die **Zusammenarbeit mit der Fertigung** beginnt bereits vor der eigentlichen 'Hardwarephase'. Das gilt insbesondere für die Erstellung von Arbeitsplänen (Arbeitsvorbereitung). Sie müssen nach der Optimierungsphase festgeschrieben werden und sind damit als **stabile Fertigungsprozesse** die Basis einer Qualitätssicherung. Besonders im angelsächsischen Raum ist es inzwischen üblich, dass Zeichnungen genaue Angaben zu den Fertigungsprozessen enthalten. Sie schließen Spezifikationen und Qualitätsmerkmale ein. Diese werden in Prüfverfahren gewährleistet. Bei Abweichungen vom geforderten Bauteilzustand ist es in vielen Fällen der Konstrukteur als Auslegungsverantwortlicher, der über Weiterverwendung oder gegebenenfalls Nacharbeit entscheidet. Voraussetzung ist ausreichendes Hintergrundwissen über Einflüsse im späteren Betrieb (Band 1) und Versagensmechanismen (Band 2).