

Axel Rossmann

Probleme der Maschinenelemente erkennen, verhüten und lösen

Unter besonderer Berücksichtigung des Leichtbaus

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

Band 2: Versagensformen von Maschinenelementen: Typische Schadensbilder, Mechanismen, Ursachen.

Elemente flüssigkeits- und gasführender Systeme: Dichtungen, Rohrleitungen, Überwachung.



Axel Rossmann

1. Auflage
(Serie 0.2)

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.

© 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:

Fax Nr. (Deutschland) 08131 50 50 67

ISBN 978-3-00-041025-3

Vorwort

Dieser Band 2 der Reihe „**Probleme der Maschinenelemente - erkennen, verhüten und lösen**“ befasst sich mit „**bauteilspezifischen Versagensformen von Maschinenelementen**“.

Um Schäden vorbeugend zu vermeiden oder gezielte Abhilfen zu erarbeiten, müssen zunächst die Ursachen gefunden werden. Dafür sind **Schäden als Betriebserfahrung** von großer Bedeutung. Dem Trend des modernen Maschinenbaus zum **Leichtbau entsprechen Beispiele aus Flugtriebwerken**.

Warum diese im vorliegenden Werk einen Schwerpunkt bilden, hat einen einleuchtenden Grund. Ihre Komponenten gehören zu den wenigen Maschinenelementen von High-Tech-Maschinen deren Schäden und Probleme wegen der Sicherheitsrelevanz bis ins Detail untersucht und die Ergebnisse dokumentiert veröffentlicht werden. Im Gegensatz dazu sind vergleichbare Untersuchungen und Ergebnisse üblicherweise in der Industrie firmenbezogen. Selbst wenn der Vorfall bekannt werden sollte, werden sie nicht vergleichbar veröffentlicht.

Gewöhnlich wirkt eine Kombination mehrerer Einflüsse auf Maschinenelemente:

- Fertigung, Montage, Betrieb, Wartung und Reparatur.
- Belastungsbedingte Mechanismen wie Werkstoffermüdung oder Schädigungen.
- Konstruktions- bzw. Auslegungsbesonderheiten.

Ein **Betriebsschaden** sollte, anders als ein Schaden in der Erprobung/Entwicklung, nicht nur als äußerst unerwünschtes Vorkommnis betrachtet werden. Er hat auch das Potenzial wichtiger Erkenntnisse zum Produkt. Das macht einen **Schaden geradezu wertvoll**. Wer diesen Lerninhalt nicht nutzt, d.h. den Schaden nicht analysiert und daraus lernt, setzt langfristig seine Konkurrenzfähigkeit aufs Spiel.

Speziell zur **Schadensanalyse** werden Fachliteratur und Weiterbildung angeboten (Lit. zu Band 1, Kapitel 1). Erfahrungsgemäß fühlen sich besonders Fachleute aus dem ‘Werkstoffbereich’, die sich mit Metallografie und mikroskopischen Bruchflächenanalysen (REM) beschäftigen, angesprochen. Doch auch dem Maschinenbauer in der Praxis wird zu diesen Angeboten geraten. Leider stehen allgemeingültige Lehren für den Konstrukteur nicht im Vordergrund. Hilfreich wäre eine intensivere Behandlung betriebsspezifischer Probleme im Rahmen der Gestaltung, Auswahl und Auslegung von Maschinenelementen.

Der vorliegende Band versucht diese Lücke zu schließen. Er ist auch als Nachschlagewerk für den Maschinenbauingenieur in der beruflichen Praxis gedacht. Dieser soll zumindest in die Lage versetzt werden, **Risiken von Problemen/Schäden einzuschätzen** und geeignete Fachleute (z.B. für eine Bruchflächenanalyse) **zu verstehen, zu konsultieren und zu beauftragen**. Die Skizzen und Bilder von Schäden wurden abstrahiert und auf das Wesentliche (charakteristische Merkmale) fokussiert sowie Literaturangaben nachempfunden. Dabei ging es in erster Linie um das Problembewusstsein.

Man erkennt, dass der Inhalt dieses Buchs fachgebietsübergreifend ist. Zusammen mit Band 1 ist Maschinendynamik, Physik und Chemie neben der Werkstofftechnik anwendungsorientiert in die Betrachtungen einbezogen. Der Autor würde es begrüßen, wenn so für den ‘**Maschinenbauer**’ die Motivation zu einer **ganzheitlichen Sichtweise** gefördert wird.

Axel Rossmann

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. Bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums sollte der Lernende für die Industrie interessant werden.

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 Download 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)

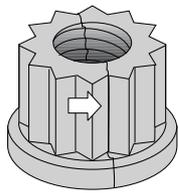
Versprödung durch Eindiffusion von Fremdmetallen (SMIE, Band 1 Bild 5.8.2-1). Diese Gefahr besteht bei unvorgesehen **hohen Betriebstemperaturen**. Risse gehen **bevorzugt vom Gewinde** („C1“) aus (Bild 6.1.1.2-9).

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.

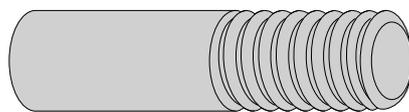
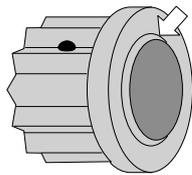
Versprödung durch ‘Werkstoffalterung’ (Band 1 Bild 5.3-1.2). Beispielsweise können warmfeste Stähle mit Chrom, Molybdän und Vanadium bei zu hohem Vergüten nur noch ein Zehntel der geforderten Kerbschlagzähigkeit aufweisen. In diesem Fall der Flanschschraube eines Dampfturbinengehäuses lag die Zugfestigkeit 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.



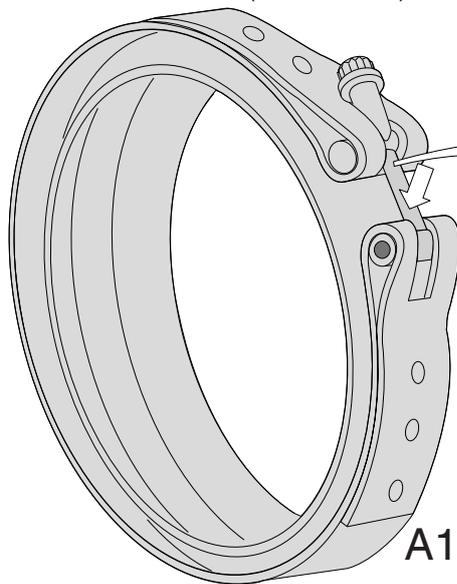
D1 Spröd durchgerissene Schraubenmutter. Material Typ 12%-Cr-Stahl, Härte 44 HRC, mit Kadmium-Korrosionsschutzschicht. Das bei Betrieb geschmolzene Kadmium führte zur Löttrissigkeit (LME)



B1

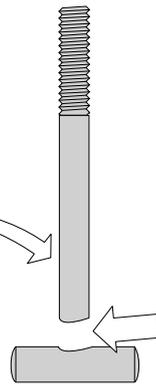
Spröd durchgerissene Schraube. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit (bis 1480 MPa) über der max. zulässigen Grenze von 1380 MPa. Bei der Beschichtung mit Kadmium drang Wasserstoff ein und führte zur Wasserstoffversprödung.

Spannschraube
(12% Cr-Stahl)



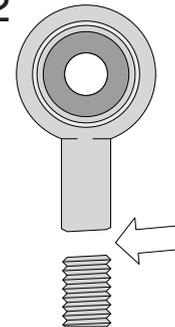
A1

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.



A2

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

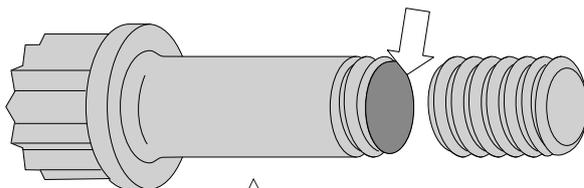


B3

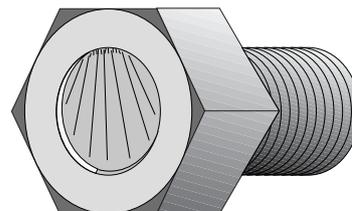
Schubstange (Vergütungsstahl verkadmet) mit Rissen durch Wasserstoffversprödung

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. Dabei bin ich ihm besonders für die Durchsicht und wertvollen Kommentare zum Teil „Elemente durchströmter Systeme“ dankbar.

Widmungen:

In Dankbarkeit für die ermunternde Begleitung bei der Entstehung dieser Bücher, meinem verstorbenen Zwillingsbruder dem **Architekten Gert Rossmann**, der mit seinem Schaffen den Münchner Stadtteil Allach deutlich geprägt hat.

Meinem verstorbenen Kollegen, fachlichen Berater und Freund **Reinhold Gräter** in Erinnerung an viele kreative gemeinsame 'Fach'- und Sporturlaube mit unseren Familien.

Inhalt

Versagensformen von Maschinenelementen und ihre Ursachen

6.1 Verbindungselemente

6.1.1 Schraubenverbindungen und Sicherungselemente

6.1.1.1 Probleme und Schäden an Schraubenverbindungen

6.1.1.2 Abhilfen bei Schäden an Schraubenverbindungen

6.1.2 Nietverbindungen

6.2 Elastische Federn

6.2.1 Metall-/Stahlfedern

6.2.2 Elastomer-/Gummifedern

6.3 Lager

6.3.1 Wälzlager

6.3.1.1 Probleme und Schäden an Wälzlagern

6.3.2.1 Abhilfen bei Schäden an Wälzlagern

6.3.2 Gleitlager ölgeschmiert

6.3.2.1 Probleme und Schäden an Gleitlagern

6.3.2.2 Abhilfen bei Schäden an Gleitlagern

6.3.2 Gleitlager gasgeschmiert ('Luftlager')

6.3.4 Gelenklager

6.3.4.1 Kunststoffe für Gelenklager, Besonderheiten und Probleme

6.4 Zahnräder und Getriebe

6.4.1 Probleme und Schäden an Zahnrädern

6.4.2 Probleme und Schäden an Getrieben

6.4.3 Abhilfen bei Zahnradschäden durch Vorbeugung und Überwachung

6.5 Achsen und Wellen

6.5.1 Probleme und Schäden an Achsen und Wellen

6.5.1.1 Hohlwellen.

6.5.2 Abhilfen bei Schäden an Achsen und Wellen

6.6 Kupplungen/Wellenverbindungen

6.6.1 Vielkeil- und Zahnkupplungen

6.6.2 Reibkupplungen und Reibbremsen

6.6.2.1 Reibbremsen

6.6.2.2 Reibkupplungen

6.6.3 Elastische Kupplungen mit Elastomeren

6.6.4 Flanschkupplungen

6.7 Ketten

6.7.1 Rollenketten

6.7.2 Gliederketten / Rundstahlketten

6.8 Riementriebe

6.8.1 Keilriemen

6.8.2 Zahnriemen

6.8.3 Flachriemen

6.9 Seile und Seilzüge

6.9.1 Seile

6.9.1.1 Anschlagseile, Befestigungen, Schlingen, Ösen

6.9.2 Seilzüge System Bowden.

Elemente durchströmter Systeme

6.10 Dichtungen

6.10.1 Statische Dichtungen

6.10.1.1 Flansch-/Flachdichtungen (Zylinderkopfdichtungen)

6.10.1.2 O-Ring Dichtungen

6.10.2 Berührende Dichtungen

6.10.2.1 Radial-Wellendichtringe

6.10.2.2 Gleitringdichtungen

6.10.2.3 Stopfbuchsen

6.10.2.4 Elastomerdichtungen für Kolben- und Stangen

6.10.2.5 Kolbenringe (Verbrennungsmotoren)

6.10.3 Berührungsfreie Dichtungen

6.10.3.1 Labyrinthdichtungen

6.10.3.1.1 Grundlagen

6.10.3.1.2 Schäden

6.10.3.1.3 Schadensabhilfen

6.10.3.2 Bürstendichtungen

6.10.3.2.1 Grundlagen

6.10.3.2.2 Schäden

6.10.3.2.3 Schadenabhilfen

6.11 Rohrleitungen

6.11.1 Grundlagen und Schadensmechanismen

6.11.1.1 Druckrohre, insbesondere der Hydraulik.

6.11.1.2 Schmieröl- und Kraftstoffleitungen

6.11.1.2.1 Schäden an Schmieröl- und Kraftstoffleitungen

6.11.1.3 Rohrleitungen für Gase

6.11.1.4 Rohrleitungen wasserführender Anlagen

insbesondere der Kraftwerks- und Haustechnik

6.12 Schlauchleitungen

6.12.1 Niederdruck-Schlauchleitungen

6.12.2 Hochdruck-Schlauchleitungen

Versorgungssysteme und deren Medien

7. Ölsysteme

7.1 Ölbezogene Probleme des Ölsystems

7.1.1 Problematische Schmieröleigenschaften

7.1.2 Ölverkokung

7.1.3 Verunreinigungen in Schmierölen

7.1.3.1 Partikel im Öl

7.1.3.2 Flüssige Verunreinigungen im Öl

7.1.3.2.1 Wasser im Öl.

7.1.3.2.2 Kraftstoff im Öl

7.1.4 Ölfeuer

7.2 Überwachung des Öls und damit des Ölsystems.

8. Das Kraftstoffsystem

8.1 Kraftstoffbezogene Probleme des Kraftstoffsystems

8.2 Kraftstoffeigenschaften

8.3 Verschmutzung des Kraftstoffs

9. Hilfsstoffe

9.1 Schmierstoffe

9.1.1. Schmierfette für Wälzlager

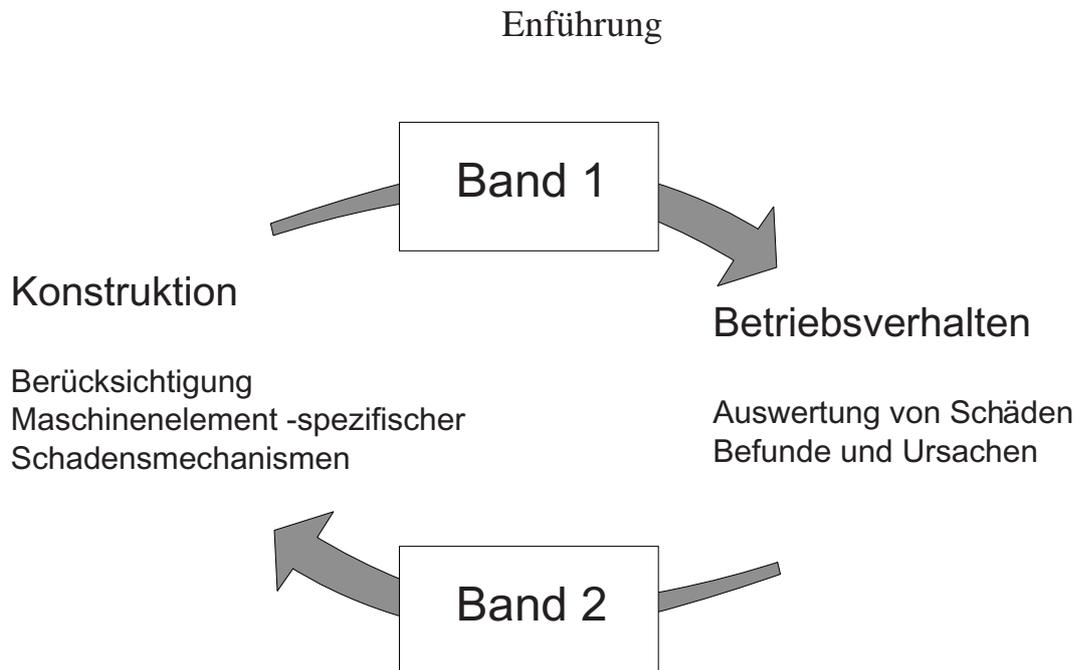
9.1.2 Gleitmittel und Gleitpasten

9.2 Dichtmittel

9.3 Reinigungsmittel

Sachregister

Versagensformen von Maschinenelementen und ihre Ursachen



Schäden an Maschinenelementen bieten eine große Chance Erfahrungen zu sammeln. Damit lässt sich eine **Konstruktion vorbeugend oder nachträglich ausfallsicherer gestalten**. Voraussetzung ist, dass für die **Auswertung** und **Ursachenermittlung** ausreichend Fachkenntnis über bauteilspezifische **Schadensbilder** mit den zugehörigen **Schadensmechanismen** vorliegt. Nicht nur die Art des Schadens wie der Schwingbruch einer Welle ist zu klären. Besonders wichtig sind **Rückschlüsse auf die Primärursachen**. Dazu gehören z.B. Unwuchten oder Werkstofffehler bzw. Mängel der Qualitätssicherung. Bei seltenen, deswegen aber nicht weniger gravierenden Schäden, ist es wegen fehlender eigener Erfahrung oft nicht möglich, die notwendigen Schlüsse zu ziehen. Dazu benötigt man eine **Dokumentation in Art eines Nachschlagewerks** mit der anhand charakteristischer Merkmale eine möglichst sichere **‘Bestimmung’ des Problems** gelingt.