

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 4: **Firmenkultur**: Arbeitsumfeld, „Human Factors“, Aus- und Weiterbildung.

Entwicklung: Minimierung von Entwicklungsrisiken.

Qualitätssicherung: Strategien, „Surface Integrity“.

Ausgewählte **schadensrelevante Fertigungseffekte**:

Rissbildung, Verunreinigungen, Eigenspannungen, Beschädigungen, Funken, Haftfestigkeit, Maße und Bauteilgeometrie, Grate, Topografie...



Axel Rossmann

1. Auflage
(Serie 0.1)

Bei der Erstellung dieses Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch 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 4 der Reihe „**Probleme der Maschinenelemente - erkennen, verhüten und lösen**“ befasst sich mit „**den Einflüssen auf die Qualität von Maschinenelementen**“. Der Inhalt lehnt sich weitgehend an die Bände 3, 4 und 5 der Reihe „Die Sicherheit von Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“. Damit wird die Erfahrung dieses High Tech-Maschinenbaus insbesondere für die erhöhten Ansprüche an die typischerweise hochbelasteten Maschinenelemente des **Leichtbaus** genutzt.

Zunächst sollen **übergeordnete Einflüsse auf die Qualität** betrachtet werden die oft nicht in ihrer ganzen Tragweite bewusst sind. Insbesondere das Management hat zumindest die erforderlichen Voraussetzungen zu gewährleisten. Hier sind auch Bereiche wie die **Personalverwaltung** und die **Budgetverantwortlichen** angesprochen, denen oft ein ausreichendes Problembewusstsein dazu fehlt. Betroffen sind z.B. **Ausbildung, Weiterbildung der Qualitätsverantwortlichen** im weitesten Sinn und **Personalrichtlinien** für qualitätsrelevante Problemfälle wie der Umgang mit der Verantwortung und möglichen **Konsequenzen bei Qualitätsproblemen**, insbesondere bei Ausschuss.

Dabei spielt die **Firmenkultur** auch in Form des **Arbeitsklimas** eine besondere Rolle. So ist eine positive Motivation mit der Einsicht in das Notwendige erfahrungsgemäß der Bedrohung/Strafe vorzuziehen.

Ein weiteres wichtiges übergeordnetes Thema sind die sog. **Human Factors**. Sie stehen für ein qualitätsförderndes/gewährleistendes Umfeld. Dazu gehören neben den Arbeitsbedingungen auch das Handling im Produktionsablauf und die Montage.

Bewusst wird auf die Darstellung der Funktion der Prüfverfahren verzichtet. Hier befindet sich ausreichend gute Literatur am Markt. Diese hat jedoch weniger die Probleme der Verfahren wie fertigungsbedingte Einflüsse auf die Nachweisgrenzen im Blick. Es wird versucht das ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu ergänzen.

Ein besonderer Schwerpunkt dieses Buchs sind ausgewählte **Einflüsse auf Qualitätsmerkmale**, die insbesondere für Betriebsverhalten und Betriebssicherheit von Bedeutung sind. Diese sind in dem konventionellen Maschinenbau mit typisch hohen Sicherheiten weit weniger von Bedeutung als bei den typischerweise hochbelasteten Leichtbauteilen. Hier sind die Erfahrungen aus der Flugtriebwerkstechnik äußerst wertvoll um das **Qualitätsbewusstsein zu sensibilisieren**.

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. Der behandelte Stoff sollte bereits ohne den theoretischen Teil eines Studiums den Lernenden für die Industrie interessant machen.

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.

Bereits bei einem Studienabbruch nach wenigen Semestern, die auch den Inhalt dieser Bücher behandeln, sollte nach Einschätzung des Autors bereits ein Interesse der Industrie bestehen.

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)

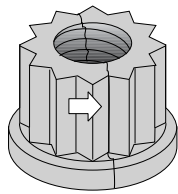
Versprödung durch Eindiffusion von Fremdmetallen (SMIE, Band 1 Bild 5.8.2-1). Diese Gefahr besteht bei unvorgesehen **hohen Betriebstemperaturen**. Risse gehen **bevorzugt im Gewinde** („C1“) aus (Bild 6.1.1.2-9).

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.

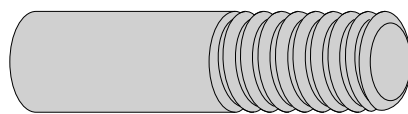
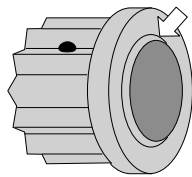
Versprödung durch ‘Werkstoffalterung’ (Band 1 Bild 5.3-1.2). Beispielsweise können warmfeste Stähle mit Chrom, Molybdän und Vanadium bei zu hohem Vergüten nur noch ein Zehntel der geforderten Kerbschlagzähigkeit aufweisen. In diesem Fall der Flanschschraube eines Dampfturbinengehäuses lag die Zugfestigkeit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

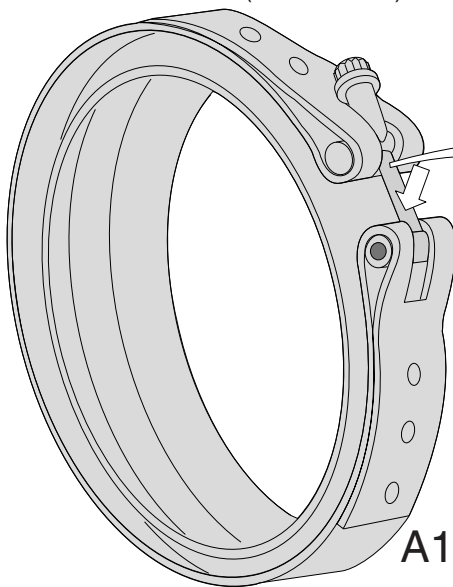


D1 Spröd durchgerissene Schraubenmutter. Material Typ 12%-Cr-Stahl, Härte 44 HRC, mit Kadmium-Korrosionsschutzschicht. Das bei Betrieb geschmolzene Kadmium führte zur Löttrissigkeit (LME)



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)



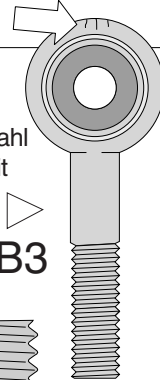
A1

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.



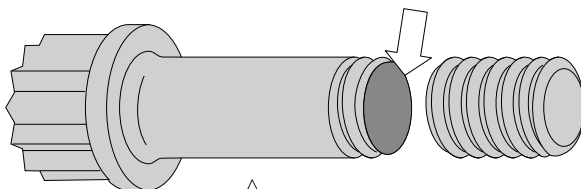
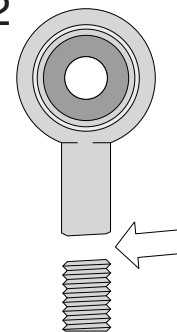
B2 Gewindeeinsatz (Einsatzstahl verkadmet) mit Riss durch Wasserstoffversprödung

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

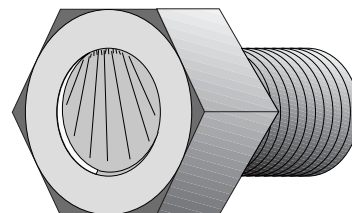


Schubstange (Vergütungsstahl) mit Bruch infolge Spannungsrisskorrosion wegen ungünstigem Gefüge (zu hart).

A2



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 Verhaltens der Maschinenelemente.

sowie dem Berater

- Herrn Ruda Eckhard (Erfahrungen mit zerstörungsfreien Prüfungen)

Qualitätsmerkmale der Fertigung

15. Firmenkultur und Arbeitsklima.

15.1 Schadensminimierende Konstruktion

15.1.1 Gestaltungsregeln

15.2 Technologische Entwicklung

15.2.1 Der Entwicklungsprozess

15.2.2 Risiken und Probleme technologischer Entwicklung

15.2.3 Minimierung des Entwicklungsrisikos

16. Das Arbeitsumfeld - „Human Factors“

16.1 Erfahrung, Fachkenntnis und Fähigkeiten

16.1.1 Arbeitsübergabe und Kommunikation

16.2 Handbücher, Arbeitsunterlagen, Vorschriften und Spezifikationen.

16.3 Wartungsfreundliche Konstruktion

16.4 Vermeidung von Arbeitsfehlern mit Hilfe systematischer Analysen

17. Qualitätssicherung

17.1 Strategien und Vorgehen bei Problemen

17.2 Die ungeschädigte Oberfläche - „Surface Integrity“

17.3 Prüfverfahren, Probleme und Grenzen

17.3.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

17.3.2 Zerstörende Prüfverfahren

17.4 Kennzeichnen von Bauteilen

17.5 Nacharbeit

18. Schadensrelevante fertigungsbedingte Effekte

18.1 Oberflächentopografie, Rauigkeit

18.2 Grate und scharfe Kanten

18.3 Verunreinigungen

18.4 Eigenspannungen

18.5 Mechanische Überlastung und Beschädigungen

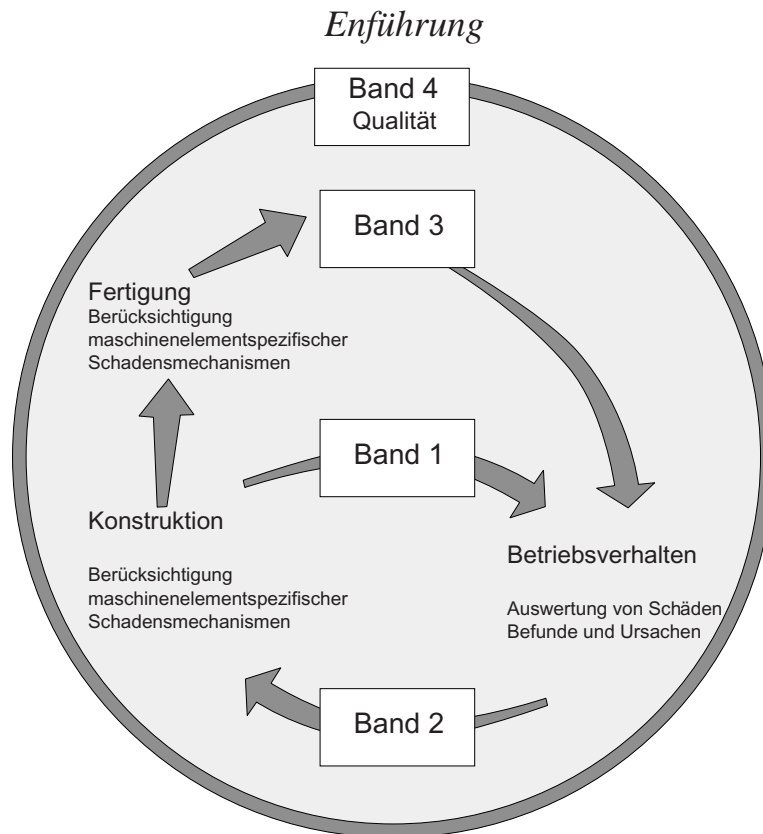
18.6 Überhitzungen, Anschmelzungen, Metallspritzer

18.7 Rissbildung

18.8 Haftfestigkeitsprobleme

18.9 Maßabweichungen, Bauteilgeometrie

Einfluss der Firmenkultur auf die Qualität



Das Bemühen um die Qualität der Bauteile/Maschinenelemente umfasst den gesamten Entstehungsprozess. Dies soll in dem obigen Schema zum Ausdruck kommen.

Mit der **Tendenz zum Leichtbau** und damit **Strukturen hoher Festigkeitsauslastung**, meist zwangsläufig mit einer entsprechend beanspruchten großen Oberfläche, nehmen die Anforderungen an die Fertigung von Bauteilen hoher Sicherheit gegenüber dem konventionellen Maschinenbau deutlich zu.

Es geht jedoch nicht nur um die **festigkeitsrelevante Sicherheit**. Einen wichtigen Platz nimmt das **Betriebsverhalten** ein, bei dem die Bauteilsicherheit gegen Versagen (Bruch) nicht unbedingt im Vordergrund steht. Hierzu gehören aerodynamische Effekte die von der Geometrie (z.B. Strömungsprofil) und der Oberflächentopografie (z.B. Rauigkeit) abhängen.

Gewöhnlich wird eine **Auffälligkeit** in der Fertigung während der Herstellung oder bei den Prüfungen entdeckt. Die Beurteilung erfolgt dann nach Standards/Spezifikationen. In Zweifelsfällen sollte sich der verantwortliche Konstrukteur um die Beurteilung, gegebenenfalls eine **Nacharbeit** kümmern. Voraussetzung ist ausreichendes Hintergrundwissen über Einflüsse im späteren Betrieb (Band 1) und Versagensmechanismen (Band 2).

Um **Abweichungen zu erkennen** ist eine ausreichende **Sensibilisierung** aller derer, die mit dem Bauteil zu tun haben Voraussetzung. Dies erfordert ein **bauteilspezifisches Bewusstsein** für bedenkliche Einflüsse und ausreichend **Erfahrung**. Zu solchen Abweichungen gehören beispielsweise örtliche Anschmelzungen im Mikrobereich wie durch elektrische Funken (Kapitel 18.6) oder die Einwirkung von angeschmolzenen Verunreinigungspartikeln. Natürlich ist hier Hintergrundwissen über Probleme der Fertigungsverfahren wichtig. Das ist oft firmenspezifisch und gilt als zu schützendes Know How. Es steht deshalb häufig der Lehre nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund werden solche, die im Rahmen des anspruchsvollen Leichtbaus (Turboflugtriebwerke) erkannt wurden, in Band 3 behandelt.

Von besonderer Bedeutung sind die **Prüfverfahren** (Kapitel 17.3), wobei deren **Anwendungsbereich**, **Grenzen** und **Unzulänglichkeiten** auch in **Konstruktion, Fertigung und Montage** bewusst sein sollten, selbst wenn deren Aufgaben nicht direkt zur Qualitätskontrolle gehören.