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 B: **Qualitätssicherung**: Strategien und Vorgehen, „Surface Integrity“.
Prüfverfahren: Probleme und Grenzen, Kennzeichnen von Bauteilen, Nacharbeit.
Fertigungsbedingte Effekte: Grate, Rauigkeit, Verunreinigung, Eigenspannung, Überhitzung, Beschädigung, Verzug...

© Axel Rossmann - Turbo consult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

turbo consult
Axel Rossmann

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

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 insbesonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Bestellung dieses Buches:

Fax Nr. (Deutschland) 08131 50 50 67

ISBN xxxxxxxxxxxxxx

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 übergeornetes 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 besondererer 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**.

Axel Rossmann

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

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:

Spannungsrisskorrosion *(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).*

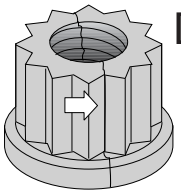
Versprödung durch ‘Einschießen’ von Fremdmetallschmelze *(Lötrissigkeit, engl. LME, Band 1 Bild 5.8.1-2 und Bild 5.8.1-3). Dabei dringt in einem schnellen Vorgang benetzende* ***Metallschmelze*** *in den unter ausreichender* ***Zugspannung*** *stehenden Werkstoff („****D1****“). Die Bruchfläche kann 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.*

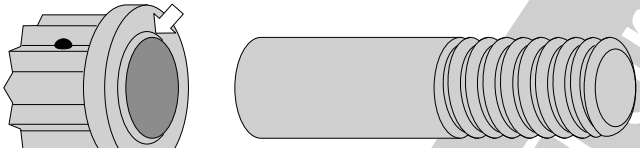
Bild zum Beispiel siehe folgende Seite.

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Wichtige Schadensbilder und Ursachen für Sprödbrüche an Schrauben und Muttern.

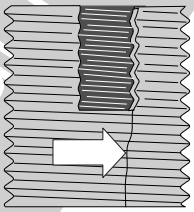


D1 Spröd durchgerissene Schraubenmutter. Material Typ 12%-Cr-Stahl, Härte 44 HRC, mit Kadmium-Korrosionsschutzschicht. Das bei Betrieb geschmolzene Kadmium führte zur Lötrissigkeit (LME)

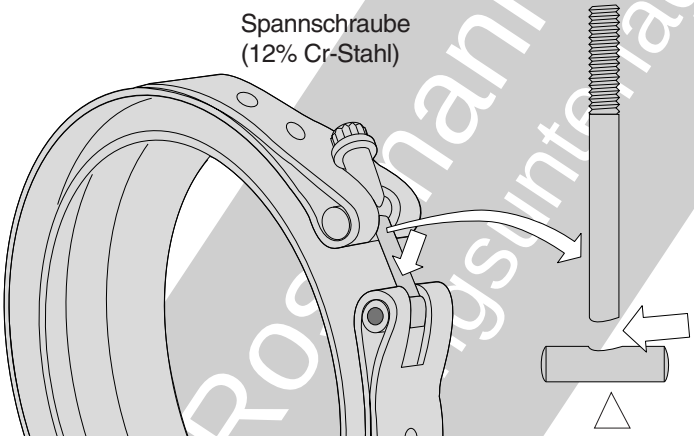


B1 Spröd durchgerissene Schraube. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit (bis 1480 MPa) über der max. zulässigen Grenze von 1380 MPa. Bei der Beschichtung mit Kadmium drang Wasserstoff ein und führte zur Wasserstoffversprödung.

Schubstange (Vergütungsstahl verkadmet) mit Rissen durch Wasserstoff-versprödung B3



B2



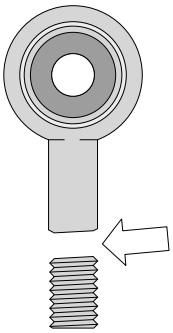
Spannschraube (12% Cr-Stahl)

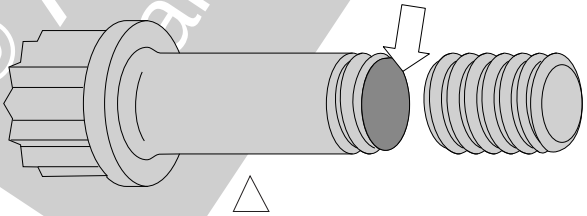
A1 Spröd gebrochene Schrauben. Material Typ 12%-Cr-Stahl. Härte/Festigkeit über der max. zulässigen Grenze. Im Betrieb unter Meeresatmosphäre und/oder Schwitzwasser (Cl-Einwirkung) erfolgte Spannungsrisskorrosion.

Gewindeeinsatz (Einsatzstahl verkadmet) mit Riss durch Wasserstoffversprödung

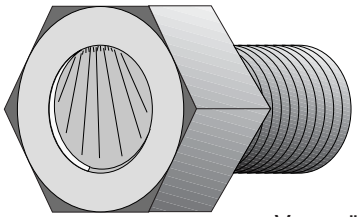
Schubstange (Vergütungsstahl) mit Bruch infolge Spannungsrisskorrosion wegen ungünstigem Gefüge (zu hart).

A2





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



E1 Versprödung durch 'Werkstoffalterung'

Bild zum Beispiel

© A. Rossmann - Turbocon
Inhalt
Abschlussprüfungsunterlage nur mit Lizenz

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)

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

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 uns Spezifikationen.
- 16.3 Wartunggsfreundliche 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

Sachregister

© Axel Bossmann - Turboconsult
Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

17. Qualitätssicherung,

© AC Rossmann Consult
Schulungsunterlagen Lizenz

Was ist Qualität? Qualität ist die Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produkts oder einer Tätigkeit, die sich auf die Eignung zur Erfüllung gegebener Erfordernisse beziehen (Lit. 13.1-4). Anders gesagt: **Qualität ist gekennzeichnet von der Übereinstimmung des Ist mit dem Soll**. Wenn man davon ausgeht, dass Qualität in erster Linie mit Facharbeit erzeugt wird, ist ein optimales Umfeld eine Voraussetzung.

In der Triebwerkstechnik steht die Betriebssicherheit des Bauteils im Vordergrund. So muss die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Rotorscheibe gegen Bruch bei 10^{-9} pro Flugstunde liegen, dass die **Wahrscheinlichkeit eines Flugunfalls unter 10^{-7}** gewährleistet ist (Lit. 17.1-9). Gegenüber der Sicherheit treten weitere wichtige Aspekte wie geringe Ausschussraten und damit niedrige Fertigungskosten sowie Prestige und Liefertreue in den Hintergrund, obwohl sie für die Existenz einer Firma durchaus bedeutend sind. Die Fehlerwahrscheinlichkeit im Herstellungsprozess liegt deutlich über der des fertigen, eingebauten Bauteils. Diese Differenz wird von geeigneten Maßnahmen der Qualitätskontrolle gewährleistet. Handelt es sich doch bei Triebwerksbauteilen überwiegend um äußerst kostenintensive Bauteile. So kann ein Verdichtergehäuse oder eine Turbinenscheibe den Wert mehrerer Mittelklasse PKW darstellen.

Dieses Kapitel soll sich entsprechend den vorhergehenden Überlegungen, in erster Linie mit dem Vermeiden sicherheitsrelevanter Fertigungsprobleme beschäftigen. Dabei stehen Probleme im Vordergrund, die bereits, wenn auch sehr selten, zum Ausfall von Bauteilen geführt haben.

Damit werden die Forderungen an die Qualität der Triebwerksbauteile und somit besonders an den Fertigungsprozess und absichernde Maßnahmen wie die zerstörungsfreie Prüfung, äußerst anspruchsvoll. Als Voraussetzung einer für Triebwerke erforderlichen Qualität, müssen die Abläufe und das gesamte Umfeld des Herstellungsprozesses optimal gestaltet werden. Hierzu wurden verschiedene Strategien mit einer systematischen Vorgehensweise entwickelt (Lit 17.1-1und Lit. 17.1-2).

Was die Fehlerfreiheit und Sicherheit der Neuteile betrifft, darf nicht aus den Augen verloren werden, dass Qualität letztendlich von den am Fertigungsprozess beteiligten Menschen, dem „**Human Factor**“ abhängt (Bild 16.1-2).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Qualitätssicherung: Vorgehensweisen / Strategien

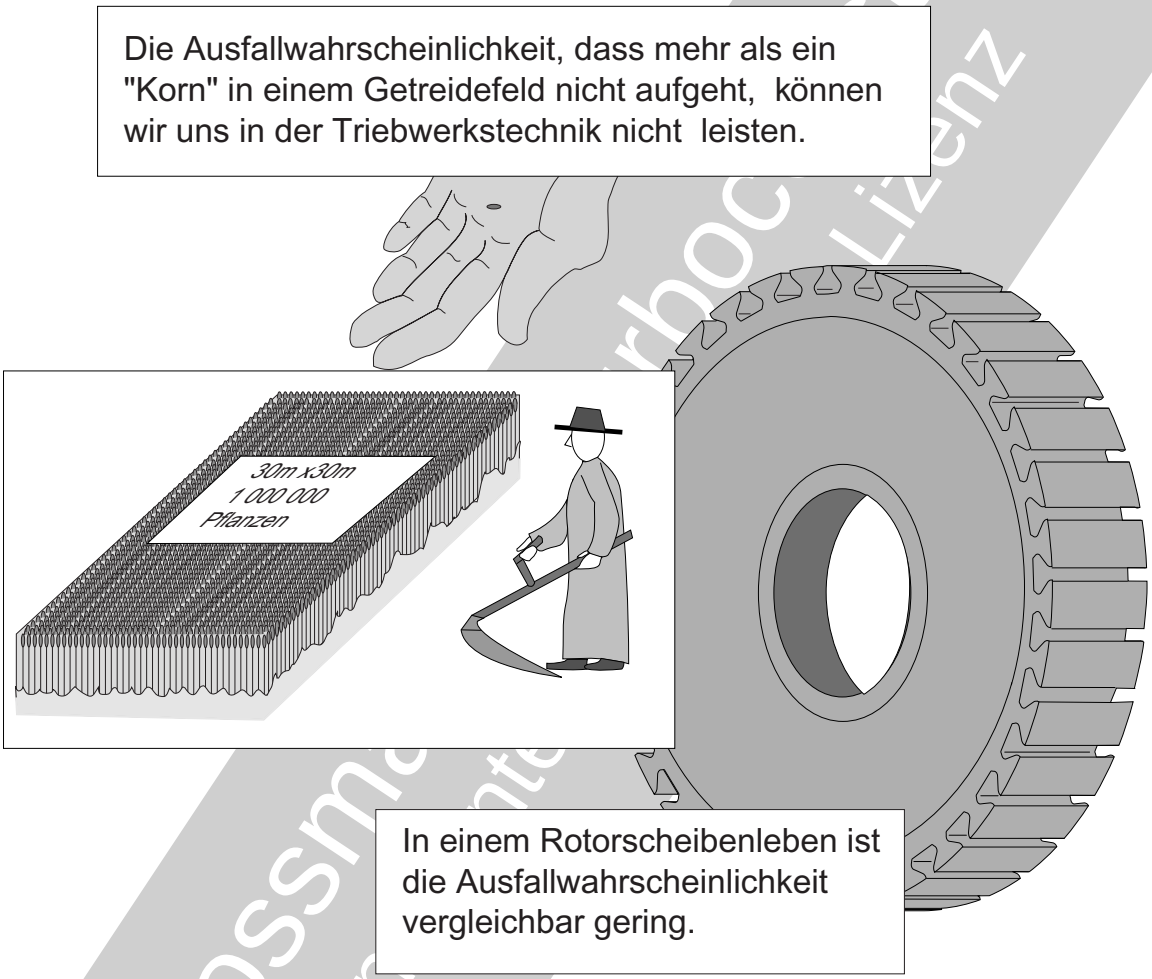


Bild 17.1-1

Bild 17.1-1: *Die Sicherheit des Triebwerks ergibt sich aus dem Produkt der* ***Ausfallwahrscheinlichkeit*** *einzelner Teile. Deshalb muss die* ***Sicherheit der einzelnen Bauteile sehr hoch*** *sein, um die Sicherheit der gesamten Maschine zu gewährleisten (Lit. 17.1-9). Wenn z.B. eine Verdichterscheibe an einer kritischen Stelle einen wenige Zehntelmillimeter großen Fehler aufweist, kann hier frühzeitig ein Riss entstehen, der die Lebensdauer deutlich herabsetzt. Da es sich um verschiedene Fehlertypen handeln kann, die auf unterschiedliche Fertigungsschritte zurückzuführen sind (z.B. Rohteilherstellung, Zerspanung, Wärmebehandlung und Handhabung), muss jeder dieser Fehler mit noch größerer Sicherheit ausgeschlossen werden, als dies für die Sicherheit des Gesamtteils gilt (Band 3, Bild 11.3-16). 3 ppm bedeutet 3 Fehler pro einer Million Teile. Das hieße z.B., dass auf einem 30x30 Meter großen Getreidefeld nur ein Saatkorn nicht aufgehen darf.*

Diese Sicherheiten sind nur von der ***Kombination erprobter und stabiler Fertigungsverfahren mit geeigneten Qualitätssicherungsmaßnahmen und Prüfungen*** *zu erwarten. Dabei kommt besonders dem Facharbeiter eine wichtige Funktion zu (Bild 13.1-12).*

© Axel Rossmann Verbocken Lizenz

Was oft unterschätzt wird: Letztendlich schafft der an der Entstehung des Produkts beteiligte Mensch die Qualität. Hier sind zuerst die Voraussetzungen zu schaffen.

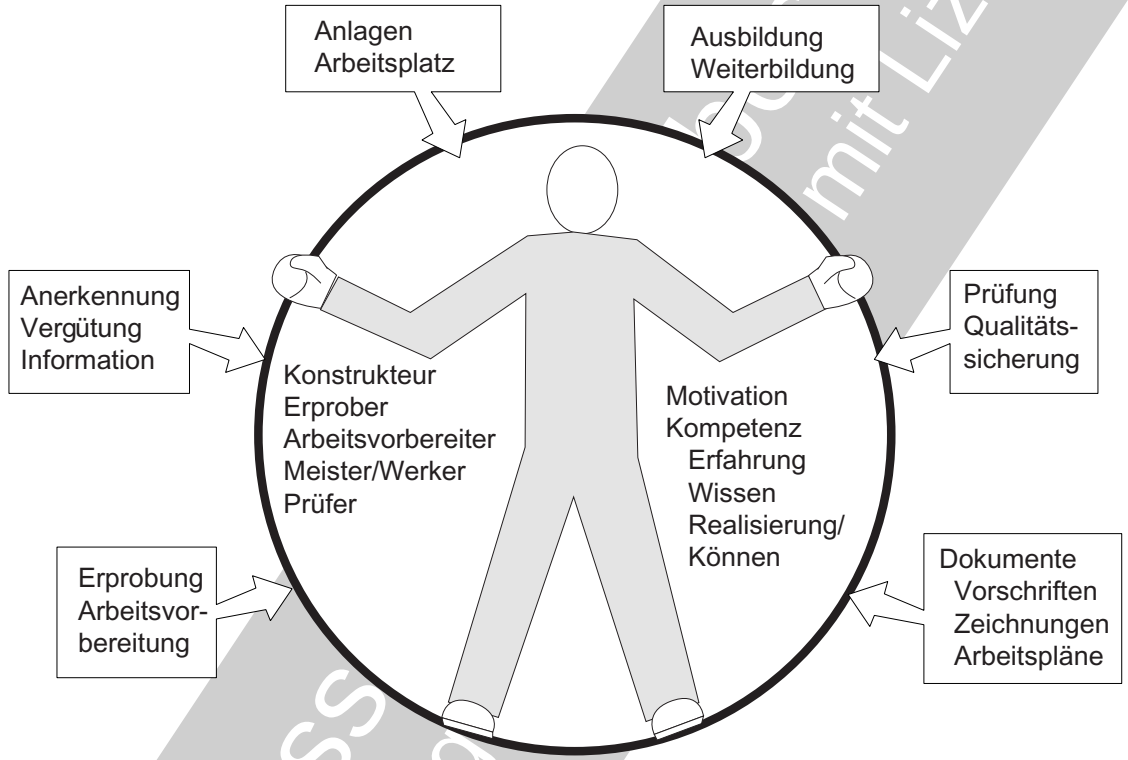


Bild 17.1-2

Bild 17.1-2: *Die Qualität des Produkts und damit seine Betriebssicherheit wird letztendlich mit Facharbeit geschaffen und gewährleistet. Zu den direkt* ***„qualitätsschaffenden“ Fachleuten*** *gehören vornehmlich*
- Konstrukteure,
- Verfahrenserprober und -entwickler,
- Arbeitsvorbereiter,
- Meister und Werker,
- Prüfer.
Ihre qualitätsfördernden Eigenschaften wie
- Motivation,
- Kompetenz,
- Erfahrung,
- Wissen,
- Realisierungsfähigkeit (Können) sind nach Möglichkeit zu unterstützen, indem ein ***optimales Umfeld*** *zur Erfüllung der Aufgabe bereitgestellt wird. Diese Forderung erscheint trivial und selbstverständlich. Die* ***Realisierung ist jedoch eine Herausforderung für die zuständigen Entscheidungsträger****. Oft verhindern vermeintlich dringendere Prioritäten ein wünschenswertes Umfeld. Dies wird von Einflüssen geprägt die sich gegenseitig auswirken. Hierzu zählen in erster Linie:*

Anerkennung *kann sich sehr unterschiedlich ausdrücken. Zwar spielt die Vergütung eine wichtige Rolle und muss in erster Linie in einsehbarer Relation zu vergleichbaren Arbeiten und Verantwortung stehen. Demgegenüber wird die* ***persönliche und dokumentierte Wertschätzung****, z.B. in einer Fachhierarchie und/ oder einer besonderen Kompetenz, gerne unterschätzt. Zur Anerkennung gehören auch*

© Axel Ross Consult
als Schulung mit Lizenz

Qualitätssicherung: Vorgehensweisen / Strategien

Fach- und ***Hintergrundinformationen*** *(Bild 15.1-5) die für das Verständnis und die Einschätzung des eigenen Stellenwerts für die Bauteilsicherheit erforderlich ist (Bild 17.1-3). Auch die rechtzeitige* ***Einbeziehung in fachliche Entscheidungsfindungen*** *signalisieren Anerkennung. Dazu gehört bereits die Konzipierung von Vorrichtungen oder die Adaption von Anlagen. Nicht immer wirkt eine „Arbeitsentlastung" motivierend. Motivierend kann dagegen die explizite* ***Nutzung von Erfahrung*** *wirken.*

Zum ***Arbeitsplatz*** *gehört sowohl ein motivierendes Umfeld, als auch eine zur Erfüllung der Aufgabe möglichst gut geeignete Ausrüstung. In diesem Zusammenhang spielt der Begriff* ***„Human Factor"*** *im Luftfahrtbereich eine besondere Rolle. Er beschreibt die Auswirkungen des Umfelds auf das Fehlerrisiko und Voraussetzungen für fehlerfreies Arbeiten (Lit. 17.1-8). In diesem Zusammenhang ist die amerikanische Luftfahrtbehörde FAA besonders engagiert.*

Qualitätssicherung *schließt die Aktivitäten im Rahmen einer Selbstprüfung (z.B. Maßüberprüfungen) ein. Dazu gehört die fachliche Beurteilung des Bauteilzustands vor und nach dem jeweils zu verantwortenden Arbeitsschritt (Bild 17.1- 5). Das ist eine unerlässliche Voraussetzung für sichere Bauteile bei günstigen Produktionskosten.Um diese Hinweise auf potenzielle Probleme zu erkennen, ist Erfahrung notwendig. Es handelt sich um die Feststellung* ***ungewöhnlicher Veränderungen*** *wie Spanbildung (Bild 17.1-13), Anlauffarben oder Glanz der Bauteiloberfläche (Bild 18.9-12).*

Dokumente und Vorschriften: *Je klarer und verständlicher diese sind, umso eher lassen sich Fehlinterpretationen oder falsche Einschätzungen vermeiden. Auch hier sind Informationen zu den Hintergründen und Notwendigkeiten Voraussetzung für eine optimale und engagierte Anwendung. Umgekehrt beeinträchtigen* ***missverständliche oder fehlinterpretierbare Arbeitspapiere*** *die Bauteilsicherheit. Übersetzte Dokumente, etwa im Rahmen einer Lizenzfertigung, können deren Anwendung erschweren. Erfahrungsgemäß handelt es sich um* ***Beurteilungsmerkmale und Fachbegriffe,*** *die nicht eindeutig übertragen wurden.*
Arbeitspläne sind für die Produktqualität von höchster Bedeutung. So beeinflusst z.B. die Folge von Arbeitsschritten die Wahrscheinlichkeit von Problemen und die Auffindbarkeit von Fehlstellen an Bauteilen.

Die industrie- und firmenspezifische technisch-fachliche ***Aus- und Weiterbildung*** *unter dem Aspekt einer Minimierung von Problemen und Schäden, ist offenbar in vielen Fällen zumindest verbesserungsbedürftig. Dies wird im Verhältnis zu den üblichen Kursangeboten für die Anwendung von Computerprogrammen aus dem Bürobereich und der Verwaltung deutlich. Besonders für den Bereich der Produktion und Fertigungstechnik scheint eine erfahrungsbasierte Weiterbildung auf den ersten Blick ein plausibles Anliegen, wird aber, wenn überhaupt, nur unbefriedigend angeboten und genutzt. Wenn hier ein Mangel für* ***Techniker und Ingenieure*** *besteht, sucht man eine geeignete* ***Weiterbildung für Werker bzw. Facharbeiter****, als diejenigen welche Qualität produzieren sollen, meist vergeblich (Lit. 17.1-5).*

© AG Bassmann - TU München - Nutzung nur mit Lizenz

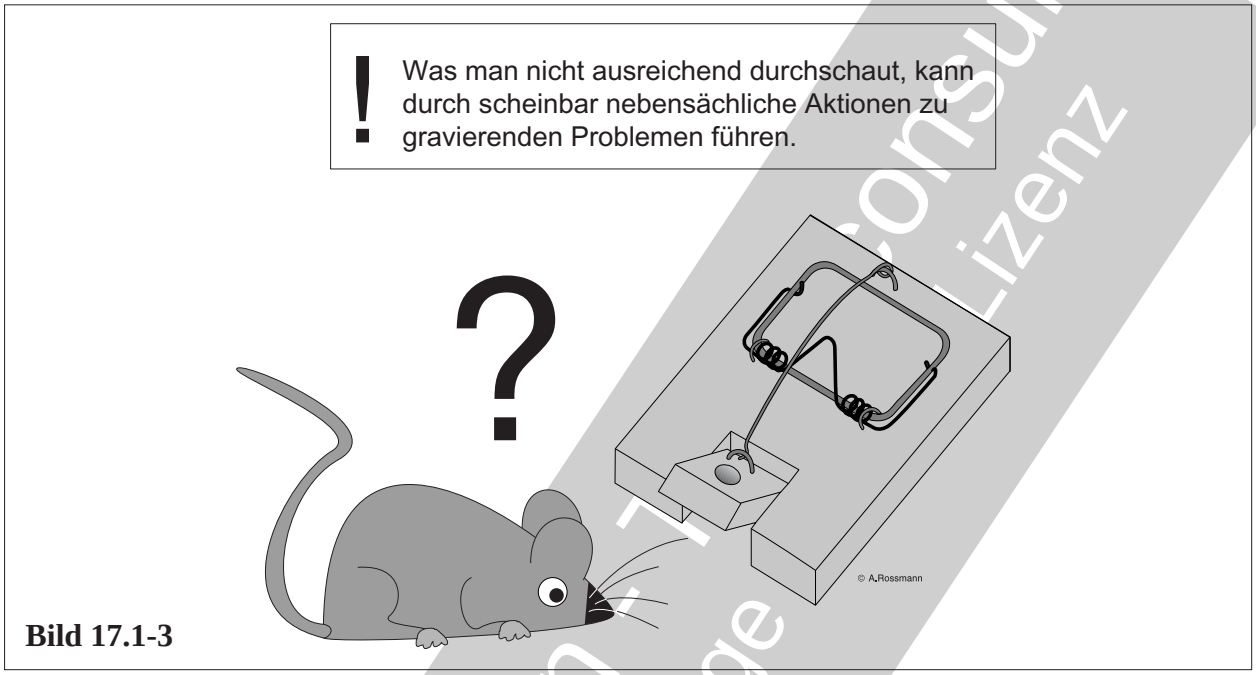


Bild 17.1-3

Bild 17.1-3 *(Lit. 17.1-5): Durchschaut man die* ***Konsequenzen eigenen Handelns*** *nicht, besteht ein erhöhtes Fehlerrisiko. Fehlen die notwendigen* ***Hintergrundinformationen*** *und/ oder sind die Zusammenhänge mit dem späteren Betriebsverhalten der Bauteile nicht ausreichend bekannt, ist das Potenzial höchstmöglicher Sicherheit und Effektivität nicht ausgeschöpft.*

Die ***Mausefalle*** *soll diese Situation verdeutlichen. Sie erinnert daran, dass trotz umfangreichen Wissens, jedoch nicht ausreichender Erfahrung, ein erhöhtes Risiko besteht. Der Grund sind Fehleinschätzungen der Konsequenzen des Handelns. Das gilt beispielsweise für einsame Entscheidungen über die Zulässigkeit und eventuelle Abhilfen bei Abweichungen .*

Richtig ist es, ***fachkundige zuständige Vorgesetzte bzw. Fachabteilungen rechtzeitig hinzuzuziehen****. Dies erfordert jedoch ein Vertrauensverhältnis, bei dem nicht der Überbringer schlechter Nachrichten auf mittelalterliche Weise bestraft wird (Bild 17.5-2).*

Ähnliches gilt für die Betriebstauglichkeit der Bauteile. Sie wird entscheidend von einer Vielzahl ***scheinbarer Nebensächlichkeiten*** *beeinflusst. Solche* ***„Nebensächlichkeiten“*** *richtig einzuschätzen und mit Hilfe einer geeigneten Einstellung zu realisieren, ist ein entscheidender Schritt zur Qualitätssicherung. Eine Voraussetzung für ein qualitätsbewusstes Verhalten ist also die* ***Kenntnis wichtiger Zusammenhänge und Einflüsse****, die auf Bauteile einwirken können. Dazu gehören auch Abläufe und entscheidungsbefugte Fachleute, um richtige Abhilfen und Bewertungen (Bild 17.1-11) vorzunehmen (Bild 17.5-1).*

Bild 17.1-4: *Das* ***Fehlerrisiko*** *lässt sich unter geeigneten Voraussetzungen und einer „strategischen“ Vorgehensweise minimieren.*

Gleichbleibende Rohteilqualität *(Kapitel 11): Von* ***Ausfallmusterprüfung und Wareneingangsprüfungen verifizierte, zuverlässige Lieferanten*** *gewährleisten die Qualität der Rohteile bzw. des Halbzeugs. Sie sind eine Voraussetzung für hohe Bauteilsicherheit. Dies gilt besonders im Hinblick auf Abweichungen und Fehler, die nur mit der Stabilität und Überwachung der Herstellungsprozesse ausgeschlossen werden. Das ist der Fall, wenn zerstörungsfreie Prüfungen an ihre Grenzen stoßen. Dieser Aspekt gewinnt mit einer Festigkeitssteigerung der Werkstoffe, die in erhöhten*

© Axel Rossmann - TU-Consult
als Schulungsunterlage - Lizenz

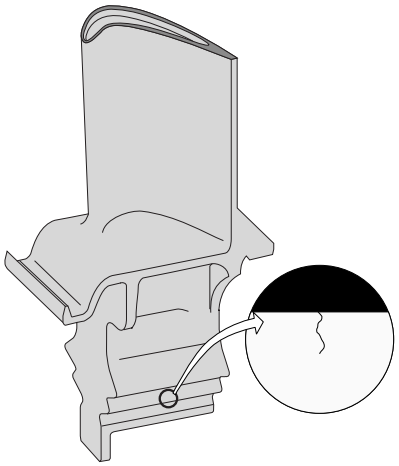
Qualitätssicherung: Vorgehensweisen / Strategien

Fehler lassen sich mit bewährten, strategisch angeordneten Schritten und geeigneten Voraussetzungen auf ein akzeptables Maß minimieren.

- Gleichbleibende Rohteilqualität:
  - Zuverlässige Lieferanten
  - Ausfallmusterprüfung
  - Wareneingangsprüfung

- Stabiler Fertigungsprozess:
  - Verfahrenserprobung
  - Ermittlung optimaler Parameter
  - Entwicklung geeigneter Vorrichtungen
  - Umsetzung in die Serie
  - Verfahrensüberwachung
  - "Sensibilisierung" des Personals

Beispiel: Schleifrisse in Füßen von Turbinenschaufeln.



- Rechtzeitiges Auffinden von Fehlern:
  - Geeignete Qualitätssicherung
  - Kenntnis der Fehlerarten
  - günstig angeordnete Prüfschritte

- Abhilfemaßnahmen:
  - Klärung des Schadensmechanismus
  - Klärung der Ursachen
  - Risikoabschätzung

Bild 17.1-4

Betriebsbelastungen genutzt wird, an Bedeutung (Band 1, Bild 4.1-1). Wachstumsfähige Fehlstellen werden immer kleiner und sind immer schwerer mit ausreichender Sicherheit zerstörungsfrei nachzuweisen (Bild 17.3.1-3.1).

*Ein **stabiler Fertigungsprozess** (Bild 17.1-5) ist nicht nur eine Voraussetzung kostengünstig, d.h. mit geringstmöglichem Ausschuss zu produzieren. Er minimiert auch das Risiko von Fehlstellen in Werkstücken und erhöht damit deren Sicherheit. Das gilt insbesondere für verfahrensspezifische Fehlstellen wie „Klebungen" (Kaltschweißen) bei Schweißungen (Band 3, Bild 12.2.1.3.4-5 und Bild 12.2.1.3.5-1/-2/-3), die sich der Detektierbarkeit mit seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren entziehen.*

***Rechtzeitiges Auffinden von Fehlern:** Ein Beispiel sind Schleifrisse in Tannenbaumfüßen von Turbinenschaufeln (Skizze, Band3, Bild 12.2.1.1.1-4). Diese Risse sind zwar mit einer Eindringprüfung nach geeigneter Vorbehandlung ausreichend sicher detektierbar. Es ist jedoch die möglichst frühzeitige Entdeckung von der die Menge der betroffenen Werkstücke und damit die Höhe der Schadenskosten abhängt. Wird die ursächliche Abweichung des Schleifprozesses mit einer kontinuierlichen Parameterüberwachung sofort erkannt, sind solche Kosten vermeidbar.*

***Abhilfemaßnahmen:** Wurden unzulässige Abweichungen im Fertigungsprozess bzw. Fehlstellen festgestellt, ist zuerst die Klärung des Schadensmechanismus und damit die Voraussetzung für eine Ursachenklärung zu schaffen (Bild 17.1-11). Erst diese ermöglicht die Erarbeitung und Einführung gezielter erfolgversprechender Abhilfemaßnahmen.*
Eine Risikoabschätzung muss die Möglichkeit betrachten, ob fehlerhafte Bauteile zum Einbau gelangen können. Gegebenenfalls sind daraus weitere Maßnahmen abzuleiten.

© Arbeitsgemeinschaft Turbinenconsult

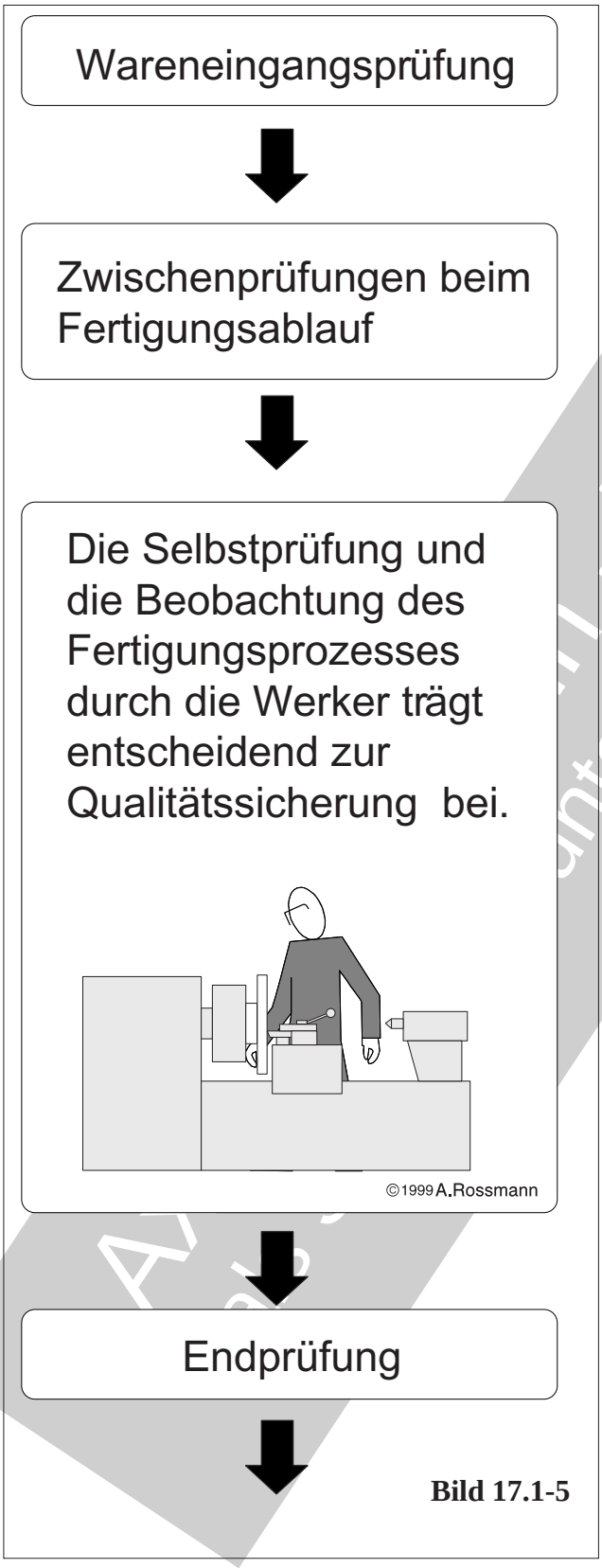


Bild 17.1-5

Bild 17.1-5 *(Lit. 17.1-5):* ***Facharbeiter*** *leisten einen nicht zu unterschätzenden* ***Beitrag zur Sicherung der Qualität*** *der Produkte. Sie ermöglichen bei genügender Erfahrung, Ausbildung und Motivation, eine äußerst wichtige und zuverlässige, kontinuierliche* ***Prozessüberwachung*** *(Bild 17.1-10).*

Während des Fertigungsprozesses sieht ein Facharbeiter beispielsweise das Verhalten des Bauteils, des Prozessablaufs und der Werkzeuge. Dabei können Abweichungen, die auf Probleme hinweisen, auffallen. So können besonderes Spanaussehen (Lit. 13-6) oder ungewöhnlich intensive Anlauffarben Indizien für Stabilitätsprobleme des Fertigungsprozesses sein. Sie können auf ernste Fehler hinweisen, die mit den folgenden Prüfverfahren nicht mehr sicher auffindbar sind. Motivation und Weiterbildung sind (Bild 12.2.1.1.1-8.2) deshalb gerade in der Fertigung eine gut angelegte Investition.

Zur ***Motivation*** *(Bild 15-2) gehört eine geeignete* ***Arbeitsplatzgestaltung*** *und eine auf die anspruchsvolle Aufgabe abgestimmte* ***Weiterbildung****. Diese Weiterbildung sollte besonders das Verständnis für die* ***technischen Zusammenhänge*** *entwickeln. Jeder Fertigungsschritt ist in den Ablauf eingebunden, hat eine Vor- und eine Nachgeschichte. Es ist also wichtig, dass Kenntnisse darüber vorhanden sind, wie die* ***eigene Arbeit von der vorhergehenden beeinflusst*** *sein kann, und wie sie sich auf nachfolgende Schritte, insbesondere die Betriebseigenschaften des Bauteils, auswirkt.*

Arbeitsblatt - Tutorium
unterlagen/material/...

Qualitätssicherung: Vorgehensweisen / Strategien

Bild 17.1-6

Bild 17.1-6 *(Lit. 17.1-5): Die* ***Arbeit am Bildschirm*** *und an weitgehend automatisierten Fertigungsprozessen erhöht die Gefahr eines gewissen* ***Realitätsverlustes und der „Vereinsamung“*** *auf Grund eines fehlenden persönlichen Kontakts. Diese Gefahr besteht nicht nur in der „Schreibtischarbeit“ der Konstruktion, sondern auch im Fertigungsbereich. Gerade die Arbeitsvorbereitung und die Beurteilung des Arbeitsergebnisses im Fertigungsablauf scheinen in steigendem Maß betroffen.*

Ein solcher Trend stellt ein nicht zu unterschätzendes Risiko dar. Zum einen werden Erfahrungen, die am besten im ***persönlichen Gespräch*** *vermittelt werden, nicht mehr wünschenswert weitergegeben.*

Zum anderen wird die Chance einer gewissen Kontroll- und Korrekturfunktion ungezwungener und damit besonders kreativer Beratung mit den Kollegen, vertan.

Der ***persönliche Kontakt*** *kann also ein wichtiger Faktor für die Betriebssicherheit der Bauteile sein.*

Deshalb ist die fachliche ***Kommunikation*** *zu suchen, um der alten Volksweisheit Genüge zu tun: „Vier Augen sehen mehr als zwei.“*

© Axel Rossmann
Schulungsunterlage

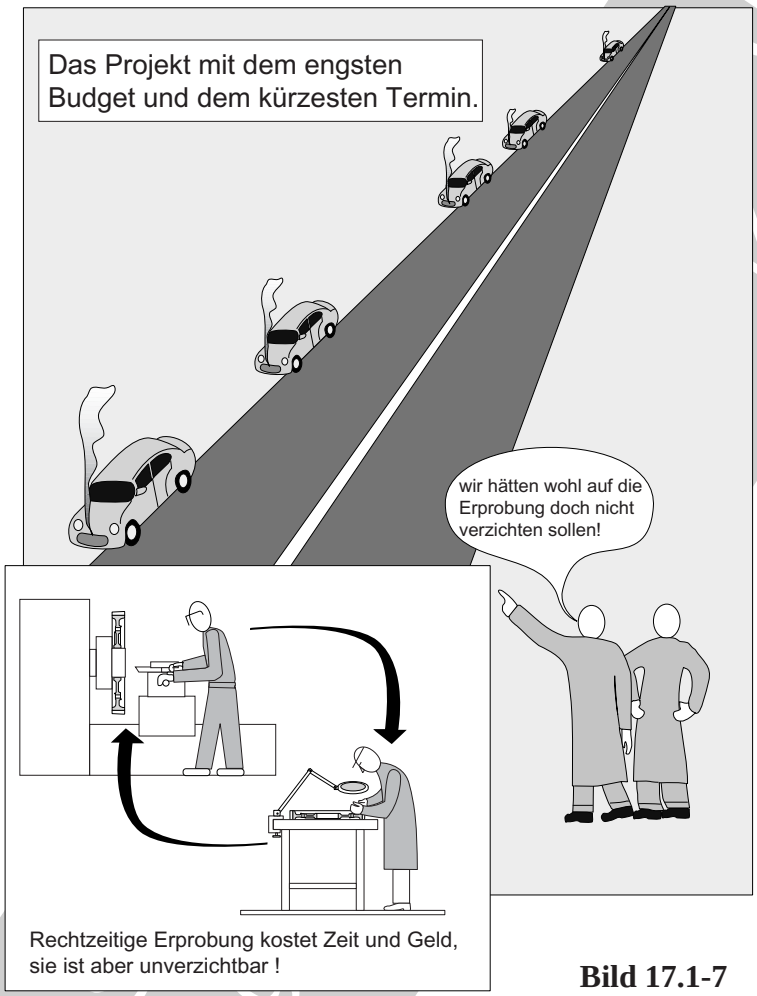


Bild 17.1-7

Bild 17.1-7 *(Lit. 17.1-7): Sieht man immer wieder den gleichen neuen Autotyp mit einer Panne am Straßenrand, dürfte das Kaufverhalten potenzieller Kunden gegenüber dieser Marke negativ beeinflusst werden. Da wäre es für den Hersteller wohl besser gewesen, gleich ausreichend Mittel und Zeit in die Entwicklung und Erprobung zu investieren, als teure Nachrüstungen mit Imageverlust zu riskieren.*

Diese Zusammenhänge gelten in übertragenem Sinne gerade auch für Triebwerke. Hier kommt noch der besondere Sicherheitsaspekt hinzu. Gerade was den Einfluss der Fertigungsverfahren betrifft, ist eine ***bauteilspezifische Erprobung unerlässlich****. Diese benötigt Zeit und ist gewöhnlich mit erheblichen Kosten verbunden. Dagegen ist eine Computersimulation deutlich schneller und kostengünstiger. Leider kann sie erfahrungsgemäß in vielen Fällen den Hardwareversuch nicht ersetzen.*

Die erarbeiteten Fertigungsparameter sind dann in der Serienanwendung einzuhalten und garantieren die nachgewiesene Betriebssicherheit.

Es ist deshalb unbedingt notwendig, den für die Einführung oder Veränderung von Fertigungsverfahren notwendigen Kosten- und Zeitrahmen realistisch vorzusehen. Aus diesem Grund ist eine ausreichende ***mittelfristige Verfahrensentwicklung,*** *zu der auch das Betriebsverhalten der Bauteile gehört, bis zur Serienreife unerlässlich.* ***Nicht ausreichend erprobte Verfahren tragen ein hohes Risiko*** *in sich.*

© Axel Ros... als Schulung... ...ult ...zenz

Einige Grundlagen zur Qualitätsbeschreibung.

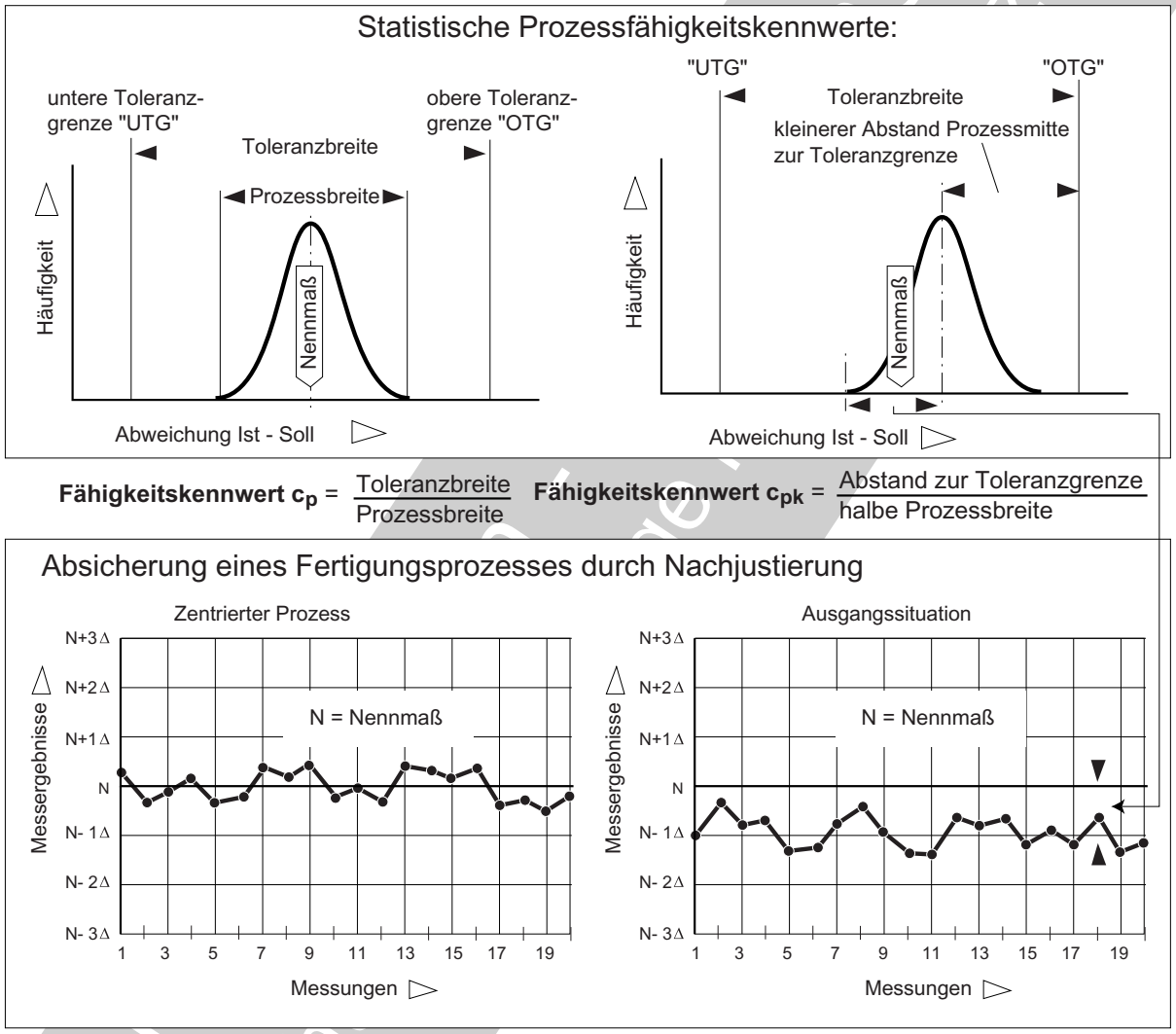


Bild 17.1-8

Bild 17.1-8 *(Lit. 17.1-1 und Lit. 17.1-.2): Die* ***Stabilität eines Fertigungsprozesses*** *ist von großer Bedeutung für die Bauteilsicherheit und für die kostenoptimale Fertigung (Bild 17.1-4). Ein wichtiges Merkmal für die Stabilität ist die* ***statistische Verteilung der Abweichung wichtiger Kenngrößen bzw. Qualitätsmerkmale*** *(Diagramme oben) über der* ***Zeit*** *(Diagramme unten). Die Streuung der* ***Abweichung*** *(Ist - Soll) muss sich sicher innerhalb der zulässigen Toleranzbreite befinden. Sie liegt zwischen unterer (UTG) und oberer Toleranzgrenze (OTG). Die* ***Prozessbreite*** *ist mit 6 x Standardabweichung (σ) definiert. Das bedeutet, dass 99,73 % aller Werte innerhalb der Prozessbreite zu erwarten sind. Die Prozessbreite wird symmetrisch vom* ***Nennmaß*** *geteilt. Hier kennzeichnet der sog.* ***Fähigkeitskennwert*** c_p *das Verhältnis von Toleranzbreite zu Prozessbreite. Aus dem Verlauf der Häufigkeitskurven lassen sich wichtige Schlüsse auf den Fertigungsprozess ziehen (Bild 13.1-9).*
Das Diagramm oben links zeigt eine symmetrische Verteilung, die auch symmetrisch zur Toleranzbreite liegt. Das muss nicht immer der Fall sein (Diagramm oben rechts). Das Diagramm unten rechts repräsentiert einen solchen Fall. Der Abstand der ***Prozessmitte zur***

Toleranzgrenze *ist ebenfalls ein wichtiges Merkmal. Der* ***Fähigkeitskennwert*** c_{pk} *ergibt sich aus dem Verhältnis des kleineren Abstands vom Nennmaß gegenüber der jeweiligen Toleranzgrenze zur halben Prozessbreite.*
Natürlich strebt man die Symmetrie der Verteilung zur ***Toleranzbreite*** *an (Diagramm unten links). Damit ist die sicherste Gewähr gegeben, dass der Prozess nicht aus der Toleranzbreite läuft. Mit der Beobachtung der Messwerte über der Zeit lassen sich rechtzeitig stabilisierende Maßnahmen ergreifen. Ein Beispiel ist die Nachführung einer Profilschleifscheibe, um den Scheibenverschleiß zu kompensieren.*
Die Feststellung der hier im Zentrum des Interesses stehenden Fertigungsfehlstellen ist, im Gegensatz zu Maßabweichungen, häufig nur indirekt über die Verfolgung der relevanten ***Prozessparameter*** *möglich. Dazu muss jedoch der Zusammenhang zwischen den Ursachen des betrachteten Fehlstellentyps und den Prozessparametern ausreichend verstanden sein. Werden z.B. Schleifrisse oder Überhitzungsmerkmale erst mit einem geeigneten nachgeschalteten Prüfprozess ermittelt, lassen sich statistische Betrachtungen trotzdem nutzbringend anwenden. So besteht die Möglichkeit, die Fehlerhäufigkeit einzelnen Prozessparametern zuzuordnen und aus der Verteilung Schlüsse zu ziehen.*

Bild 17.1-9 *(Lit.17.1-1):Der Verlauf der* ***Häufigkeitskurven*** *lässt Schlüsse auf den Fertigungsprozess und/oder die Aus- bzw. Bewertung zu. Sie können für eine gezielte Nachprüfung potenziell betroffener Bauteile und* ***Ursachenermittlung*** *äußerst hilfreich sein.*

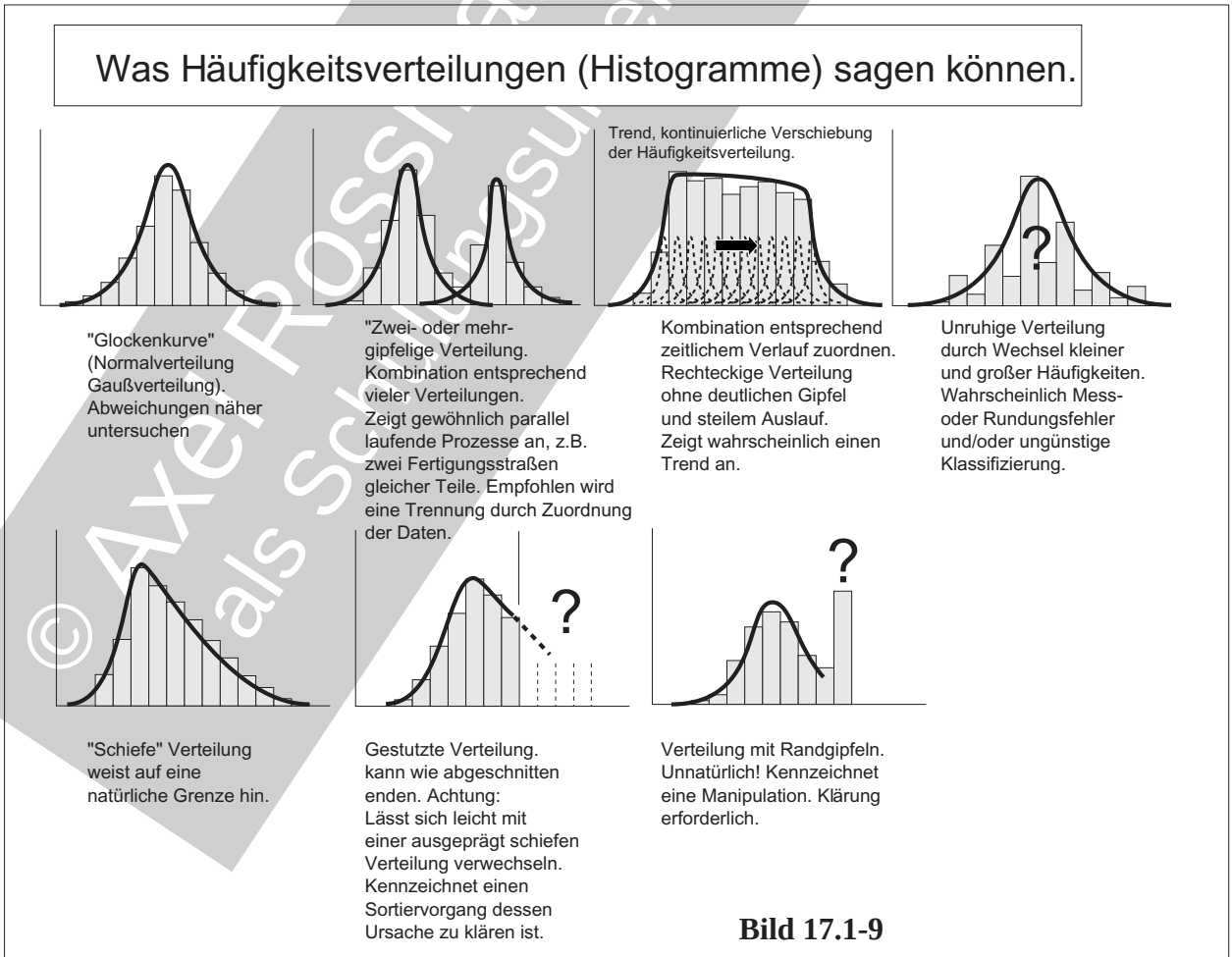


Bild 17.1-9

© Axel Rossmann - Turbocomputt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Qualitätssicherung: Vorgehensweisen / Strategien

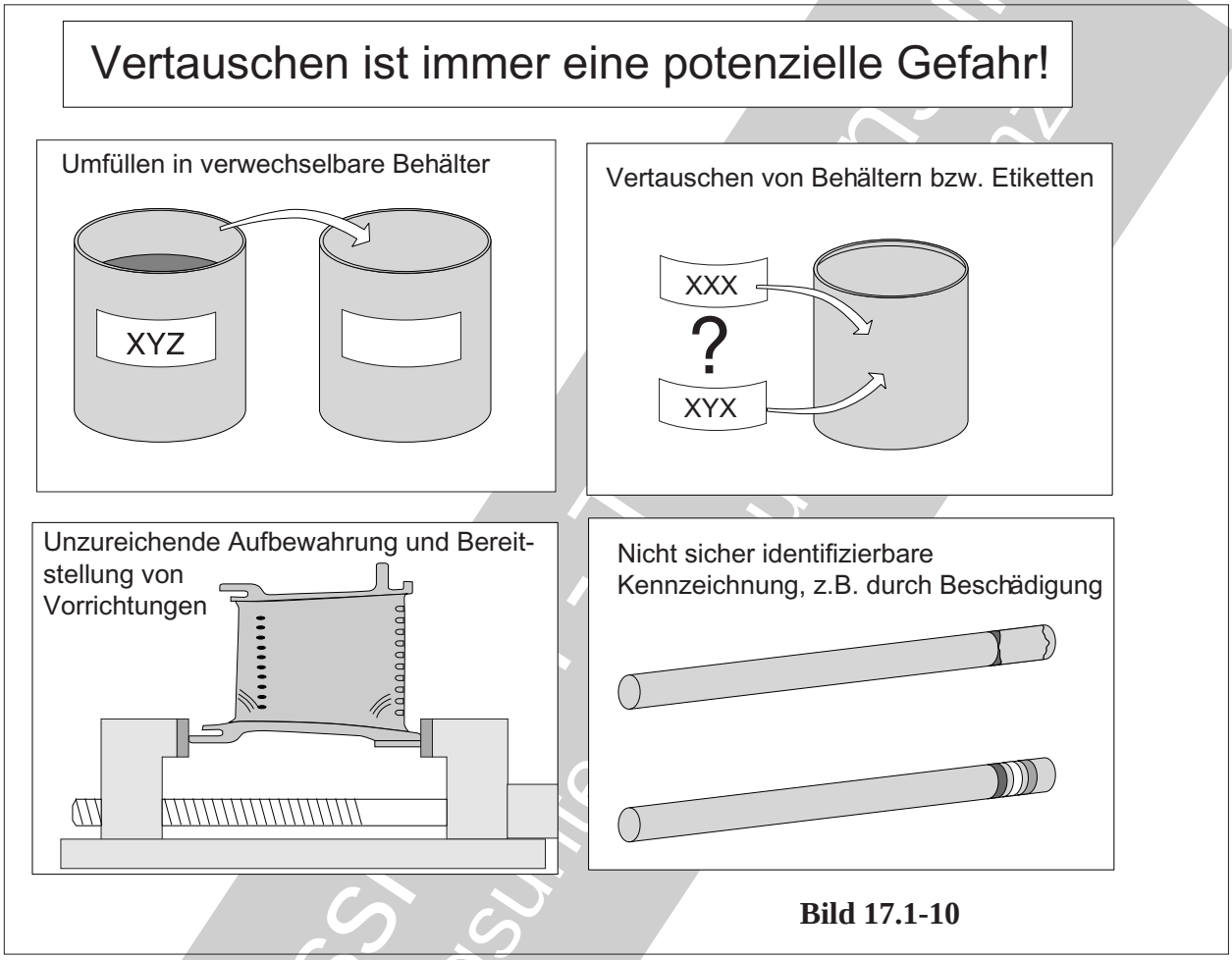


Bild 17.1-10

Bild 17.1-10: Vertauschen von Medien /Hilfsstoffe, Bauteilen bzw. Vorrichtungen und Werkstoffen *ist auch in der Fertigung ein Problem. Der potenzielle Schadensumfang ist gerade bei dieser Fehlerursache besonders hoch. Dies liegt in erster Linie daran, dass Verwechslungen oft spät erkannt werden, nicht selten durch Zufall. Der Grund ist, dass unerwartet und schwer detektierbare Schäden und Abweichungen wie Versprödung und Festigkeitsabfall, die zerstörungsfrei nicht nachgewiesen werden, erst von einem unzulässigen Betriebsverhalten angezeigt werden. Dies hat gravierende Folgen:*

- Viele Bauteile sind betroffen.

- Identifikation der potenziell betroffenen Bauteile für eine Risikoabschätzung und Maßnahmen gestaltet sich schwierig (Band 3, Bild 11.3-1).

- Betriebsschäden mit sicherheitsrelevanten und/oder hohen Kosten.

Medien*: **Umfüllen** von Hilfsstoffen und **Umetikettieren** von Behältern (Skizzen oben) birgt die potenzielle Gefahr von Verwechslungen. Wird beim Umfüllen eine eindeutige Etikettierung versäumt, sind nachträgliche Verwechslungen vorprogrammiert. Während des Umetikettierens kann bereits eine Verwechslung entstehen. Das Werkstück kann z.B. in falschen Prozessbädern (Galvanik), behandelt werden.*

Vorrichtungen: *Hier spielen z.B. Spannkonturen eine Rolle. Passen diese nicht ausreichend, kann es zu örtlicher Überlastung der Bauteile kommen (Bild 18.5-1). Dies wiederum kann an Teilen mit spröden Diffusionsschichten zu Schichtrissen führen (Skizze unten links, Bild 18.7-1.2) die einen deutlichen Schwingfestigkeitsabfall zur Folge haben. Ungeeignete Werkstoffe der Spannflächen können anhaftenden*

Abrieb an den Werkstücken begünstigen (Bild 18.3-1).Eine nachfolgende Wärmebehandlung oder ein galvanischer Prozess kann dann eine Schädigung auslösen (Bild 18.3-11).

***Werkstoffe:** Ursache solcher, wenn auch seltener Vorfälle ist meist eine **mangelhafte Kennzeichnung des Halbzeugs**. Werden z.B. die üblichen Farbringe der Kennzeichnung von Stangenmaterial beschädigt (Skizze unten rechts), erhöht dies die Gefahr einer Verwechslung. Selbst wenn die Legierung stimmt, kann ein unerwartet abweichender Werkstoffzustand (z.B. ausgehärtet statt lösungsgeglüht) problematisch sein. Das kann sich auf eine nachfolgende Zerspanung (z.B. Schleifrisse), Warmumformung (z.B. Warmrisse), Schweißen (Heißrisse) oder Ätzbehandlung (z.B. Risskorrosion) u.s.w. auswirken.*
*Ein besonderes Problem kann auftreten, wenn zwar der Werkstoff spezifikationskonform ist, es sich jedoch um einen, für die spezielle Anwendung **nicht zugelassenen Rohteillieferanten** handelt. Im Extremfall ist so der Einbau nicht zugelassener Bauteile möglich, was umfangreiche Korrekturmaßnahmen nach sich zieht.*
*Selbst scheinbar geringe Abweichungen in der Analyse von **Zusatzmaterial** wie Loten, kann unzulässige, äußerst schwer am Neuteil zerstörungsfrei festellbare Eigenschaften der Verbindung entstehen lassen. Hierzu gehört eine ungenügende Zähigkeit (Versprödung), schlechte Bindung wegen eines abweichenden Lotschmelzpunkts oder zu niedrige Warmfestigkeit der Verbindung.*

***Bild 17.1-11:** Ein großes Problem ist die ausreichende **bauteilspezifische Verfahrenserprobung**. Diese Gefahr besteht, wenn die Erprobung an Proben oder Bauteilen durchgeführt wird, die nicht in allen relevanten Eigenschaften den späteren Serienteilen entsprechen. So können z.B. Gefügeunterschiede wie Korngrößen, Kornorientierung und Korngrenzenbelegung das Ergebnis von Ätzprozessen beeinflussen. Hier kann sich die Resistenz gegenüber einem interkristallinen Angriff beeinflussen oder die Warmrissbildung bei Schweißungen bemerkbar machen.*
*Einer besonderen Aufmerksamkeit bedarf die Erprobung von **Zerspanungsvorgängen**. Dies liegt daran, dass die Betriebssicherheit, insbesondere gegenüber dynamischen Beanspruchungen (Schwingfestigkeit) entscheidend vom Oberflächenzustand (Verfestigung, Eigenspannungen) abhängt (Bild 18.4-4 und Bild 18.4-10). Sie steht in engem Zusammenhang mit Zerspanungsbedingungen wie:*
*- **Kontur der Zerspanungsfläche** (Krümmungsradius, Skizze oben). Die Erprobung an einer Probe mit vergleichsweise kleinem Durchmesser und damit sehr kleinem Krümmungsradius lässt deutliche Abweichungen in betriebsrelevanten Oberflächeneigenschaften erwarten.*
Auch die Bauteilgeometrie muss in den Zerspanungsparametern der Probe ausreichend berücksichtigt sein. So können z.B. Schaltpunkte, in denen z.B. die Werkstückdrehzahl und/oder der Vorschub verändert werden, die Schwingfestigkeit des Bauteils beeinflussen. Sie sind in diesem Fall bauteilspezifisch anzuordnen und müssen natürlich für Erprobungsteile, die Lebensdauernachweisen dienen, den späteren Serienteilen gleichen.
*- **Steifigkeit des Systems Bauteil/Bearbeitungsmaschine**. Sie beeinflusst Vorgänge wie Rattern oder die elastische Auslenkung mit Maßproblemen.*
*- **Schnittparameter** in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie. Auf einem weiter innen liegenden Radius einer Planfläche herrscht bei*

© Kissmann - Turbo Consult
ausschnittsweise Unterlagen frei

Qualitätssicherung: Vorgehensweisen / Strategien

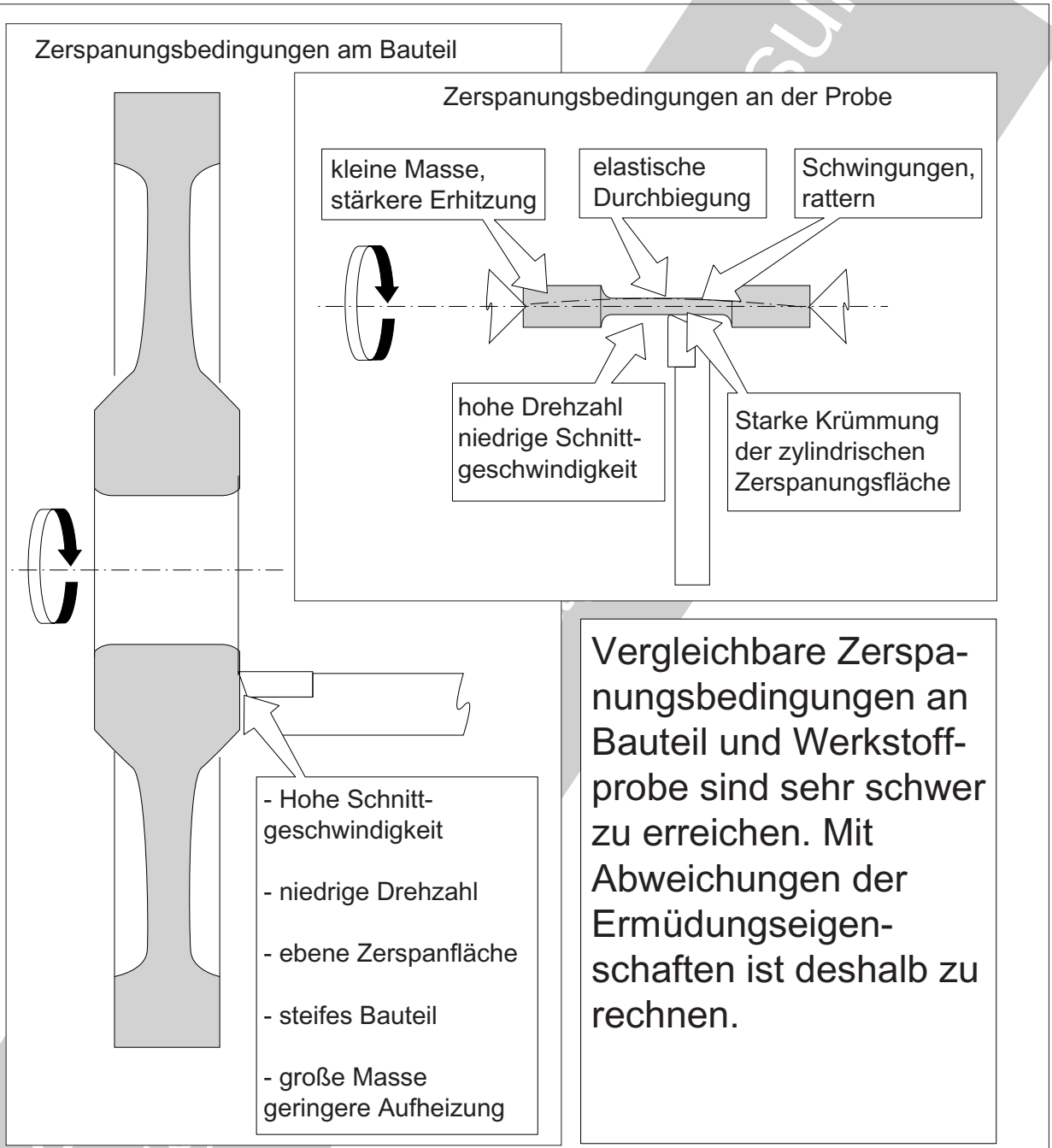
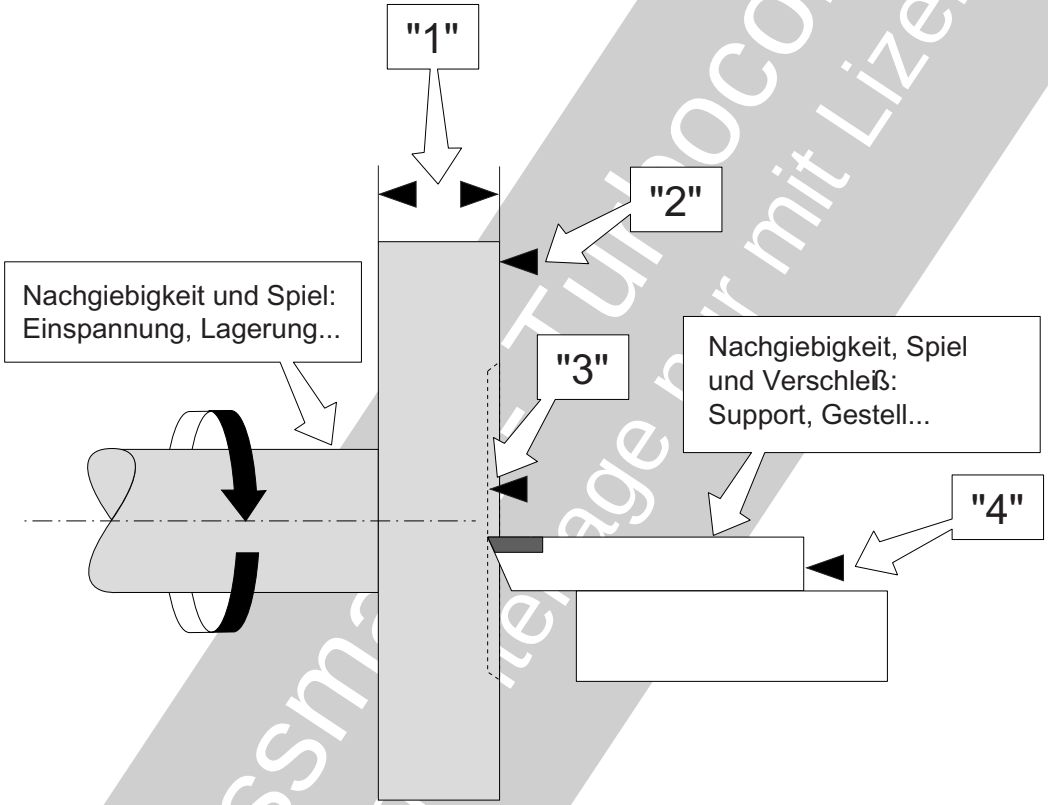


Bild 17.1-11

gleicher Drehzahl eine niedrigere Schnittgeschwindigkeit als weiter außen (Skizze links).
*- **Bauteilquerschnitte** beeinflussen neben der Steifigkeit die **Wärmekapazität** und damit die Temperaturen des Zerspanungsvorgangs (z.B. Schleifprozess). Diese lassen bei dünnen Bauteilquerschnitten höhere Bauteiltemperaturen erwarten.*

Die Überwachung von Fertigungsverfahren sollte möglichst direkt erfolgen.



Beispiel: Die Messung sollte direkt am Bauteil erfolgen.

besser "1" "2" "3" "4" schlechter

Typische Eigenschaften die sich einer indirekten Überwachung entziehen können:

Verschleiß: Maßänderung, Erhöhung von Spielen
Veränderung der Elastizität: Rissbildung, Beschädigungen, Fehlstellen
Abweichende Werkstoffeigenschaften: örtliche Veränderungen von Härte /Festigkeit, Zähigkeit

Bild 17.1-12

Bild 17.1-12: *Der Aufwand für die* ***kontinuierliche Überwachung und Dokumentation eines Fertigungsprozesses*** *wird dann akzeptiert, wenn er sicherheitrelevant ist. Das gilt besonders, wenn eine zerstörungsfreie Prüfung für das Betriebsverhalten wichtiger fertigungsbedingter Eigenschaften nachträglich nicht mehr befriedigend möglich ist. Eine solche Überwachung ist umso sicherer, je direkter sie auf den Fertigungsschritt erfolgt. In jedem Fall muss aber der Zusammenhang zwischen Messgröße der Überwachung und der zu gewährleistenden Bauteileigenschaft eindeutig, bekannt und verstanden sein. Je indirekter bzw. mit Zwischenschritten eine Überwachung erfolgt, umso eher können Abweichungen im*

© Axel Rossmann - Turbocomult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Überwachungssystem selbst die notwendige Zuverlässigkeit in Frage stellen. Beispiele sind ein Abdriften von Thermoelementen oder Vakuummessröhren.
*Im Bild ist die Problematik am vereinfachten Beispiel eines Drehvorgangs dargestellt. Zu gewährleisten ist die Dicke der Scheibe innerhalb der Toleranzvorgabe. Eine direkte Messung nach dem Zerspanungsvorgang („**1**“) kann dafür als sicherstes Prüfverfahren angesehen werden. Eine Messung der Position der Planfläche („**2**“) setzt bereits voraus, dass andere nicht überprüfte Maße, aber auch die Aufspannung richtig sind. Die festgelegte und überwachte Eintauchtiefe der Schneide („**3**“) ist in ihrer Aussage für die Scheibenbreite noch indirekter, hängt dieses Maß doch von Einflüssen wie dem Meißelverschleiß ab.*
Noch „unsicherer“, aber wohl recht einfach zu bewerkstelligen, ist die Messung der Stellung des Supports. Hier kommt als weitere Unsicherheit die elastische Verformung des gesamten Systems Werkstück/Maschine oder Verschleiß und Spiel in der Maschine dazu. Diese sind u.A. von den Schnittkräften, d.h. vom Zustand des Drehmeißels und der Spanabfuhr abhängig, die wiederum nicht gemessen werden. Ähnliche Überlegungen können auch für gänzlich andere Verfahren wie Wärmebehandlungen oder Reibschweißen (Lit. 13-3) angestellt werden.
*Die **Problematik wächst mit Eigenschaften die selbst nur indirekt gemessen werden können**. Hierzu gehören Strahlintensitäten beim Kugelstrahlen (Band 3, Bild 12.2.1.6-2) für die ein separates Almenplättchen verwendet wird. Auch die Haftfestigkeit und Struktur von Beschichtungen (Einlaufschichten, Wärmedämmschichten, Band 3, Bild 12.2.1.8.2-7) ist nur indirekt zerstörungsfrei zu ermitteln (Bild 18.8-5 und Bild 18.8-6).*

***Bild 13.1-13:** Ein Fertigungsprozess kann mit vom normalen Prozess abweichenden Besonderheiten Instabilitäten anzeigen. Damit besteht für den **erfahrenen Fachmann** die Möglichkeit einer gewissen kontinuierlichen Prozessüberwachung (Bild 17.1-5). **Es geht immer um „Ungewöhnlichkeiten“**. Dabei geht es nur darum, die Veränderung zu erkennen. Es bleibt dann den zu benachrichtigenden, zuständigen Fachabteilungen überlassen die Besonderheit zu bewerten und gegebenenfalls die Ursachen zu ermitteln und weitere Maßnahmen zu ergreifen.*
*Die Betonung liegt für eine optimale Nutzung dieser Chance auf der **Erfahrung des Personals** vor Ort. Voraussetzung ist deshalb, dass das normale Bauteil- und Maschinenverhalten wie das Aussehen der Werkstücke vor- und nachher bekannt und präsent ist. Auch Merkmale im Prozess wie die Geräuschentwicklung während der Bearbeitung können wichtige Hinweise geben. Damit ist ein rechtzeitiges Erkennen von Problemen möglich. Zur Verdeutlichung die folgenden Beispiele:*

*Typische, durch **Augenschein** zu erkennende Kriterien sind **ungewöhnliche Abweichungen**:*
*- **Späneaussehen, Brechen der Späne:** Das Aussehen der Späne **eines kontinuierlichen Zerspanungsprozesses mit definierter Schneide** (Bohren, Drehen, Skizze oben links) steht in engem Zusammenhang mit der Schneidgeometrie, den Zerspanungsdaten und Hilfsstoffen wie Kühlschmierstoff. Auch **auf Werkstoffeigenschaften wie Festigkeit und Zähigkeit sind aus dem Zerspanungsverhalten Rückschlüsse** möglich. Verändern sich diese, kann sich das auf das Spanaussehen (Länge,Brechen, Gleichmäßigkeit, Glühtemperatur/Anlauffarben) merklich auswirken. Ein besonders wichtiges Anzeichen für einen örtlichen Festigkeitsabfall (z.B. Riss, Seigerung) wird angezeigt, wenn es **immer am selben Umfangsort zum Spanbruch** kommt. Tritt dabei ein leichter Stoß auf, ist das ein*

© Kapl Possenhofen Tuppo Consult
Alle Rechte vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der Vervielfältigung und Verbreitung in besonderen Verfahren, wie fotomechanischer Nachdruck, Fotokopie, Mikrokopie, elektronische Datenaufzeichnung einschließlich Speicherung und Übertragung auf Papier, Schriften, Bild- und Tonträger.

Während des Fertigungsvorgangs lassen sich wichtige Beobachtungen machen, die Rückschlüsse auf die Qualität zulassen.

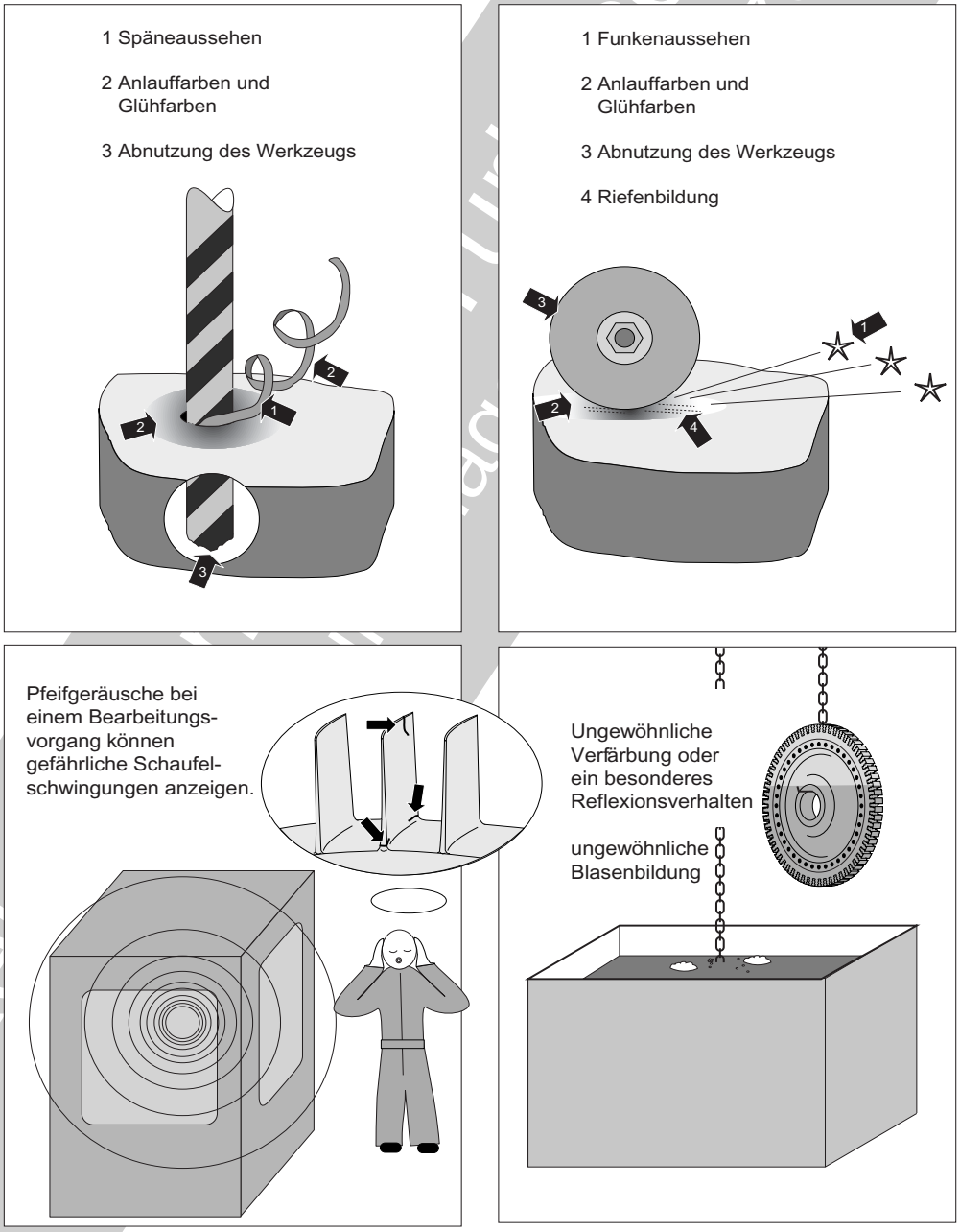


Bild 17.1-13

ernstzunehmendes Qualitätsmerkmal für den Werkstoff.

Anlauffarben an Werkzeugschneide, Werkstück und Spänen *weisen auf Veränderungen der Wärmeentwicklung und damit auf eine Veränderung der Zerspanungsbedingungen hin (Band 3, Bild 12.2.1.1.1-8.2).*

Abnutzung des Werkzeugs *lässt auf Veränderungen der Zerspanungsbedingungen rückschließen. Diese können auf unterschiedlichste Abweichungen von optimalen Prozess-*

bedingungen zurückzuführen sein. Dazu gehören Bearbeitungsmaschine, Kühlschmierstoff (Verschleiß), Werkzeug, Werkstückmaterial (Warmbehandlungszustand oder Verwechslung).

***Geräuschentwicklung** ist die Folge von Vibrationen des Werkstücks, der Vorrichtungen, der Werkzeuge oder der Maschine. Hat sich z.B. etwas an der **Einspannung des Werkstücks** oder am Werkstück ungewöhnlich verändert (z.B. Deformation, Rissbildung) kann das die Frequenz hörbar beeinflussen. Die Lautstärke hängt von der Heftigkeit der Schwingung ab. Diese lässt wiederum auf die Stärke der Anregung rückschließen. Hier wirken sich veränderte Zerspanungskräfte aus. Sie reagieren auf Einflüsse wie Festigkeit des Bauteilwerkstoffs, Werkzeugverschleiß und einer Veränderung des Kühlschmierstoffs sowie dessen Zufuhr. Auch eingeklemmte Späne an nicht einsichtigen Bearbeitungsflächen können die Geräuschentwicklung verändern.*
Beruht die Geräuschentwicklung auf Werkstückschwingungen, ist dies ein Alarmzeichen für eine mögliche Schwingermüdung. Diese kann unerkennbar als Vorschädigung vorliegen (Band 1, Bild 5.4-2) oder sich im fortgeschrittenen Stadium als Riss zeigen. Besonders dünnwandige Bauteile wie Verdichterschaufeln (Bild 18.5-7.1) und Gehäuse sind für diese Möglichkeit anfällig (Skizze unten links).

***Optische Effekte** wie Funkenflug, Rauchentwicklung, Glühen sind ähnlich wie Anlauffarben Hinweise auf eine Veränderung der Energieeinbringung bzw. Wärmeentwicklung. Damit sind Effekte wie Werkzeugverschleiß oder eine Veränderung der Zerspanungsdaten (z.B. Vorschub, Zerspanungsgeschwindigkeit) ursächlich verbunden. Eine ungewöhnliche Funkenausbildung (Lit. 17.1-7) kann auf eine Werkstoffverwechslung oder eine unerwartete Beschichtung hinweisen. Der erfahrene Fachmann kann sogar auf Legierungsabweichungen rückschließen, die andernfalls aufwändige Analyseverfahren erfordern. Die **Intensität des Funkenflugs** ist eher von der Intensität des Zerspanungsprozesses und/oder dem Kühlschmierstoff abhängig (z.B. Schleifen, Skizze oben rechts).*
*Auch ein ungewöhnlicher **Geruch** oder die Entstehung von **Rauch** und **Dämpfen** kann einen schädigenden Bearbeitungsvorgang anzeigen. Weitere optische Effekte betreffen die **farbliche Veränderung von Prozessbädern** oder eine ungewöhnliche Blasen- bzw. Schaumentstehung (Skizze unten rechts, Band 3, Bild 12.2.1.7-12).*

***Werkstückrauigkeit und Topografie**: Ein erstes Zeichen ist ein **außergewöhnlicher Glanz bzw. mattes Aussehen**. Dies kann auf bestimmte Bauteilzonen begrenzt sein. Bei zerspanten Flächen kann ein ungewöhnliches Spiegeln auf Werkzeugverschleiß oder eingeklemmte Späne (ungenügende Späneabfuhr, Bild 18.5-3) mit starker Oberflächenverformung hinweisen. Bildet sich auf der Zerspanungsfläche das Korn deutlich ab (besonders bei grobkörnigem Ni-Guss) ist das ein Hinweis auf eine starke plastische Verformung. Matte Oberflächen sind eher unter dem Einwirken von Ätzbädern zu erwarten. Zeigt das Bauteil z.B. Bereiche die weiterhin metallisch glänzend sind, kann davon ausgegangen werden, dass hier das **Ätzbad nicht gewirkt** hat. Umgekehrt, erwartet man eine glänzende Fläche (z.B. Elektropolieren) und erkennt matte Bereiche, besteht der Verdacht eines **gefährlich intensiven Ätzangriffs** (z.B. interkristalline Korrosion).*

© Aveco Consult Turbo
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

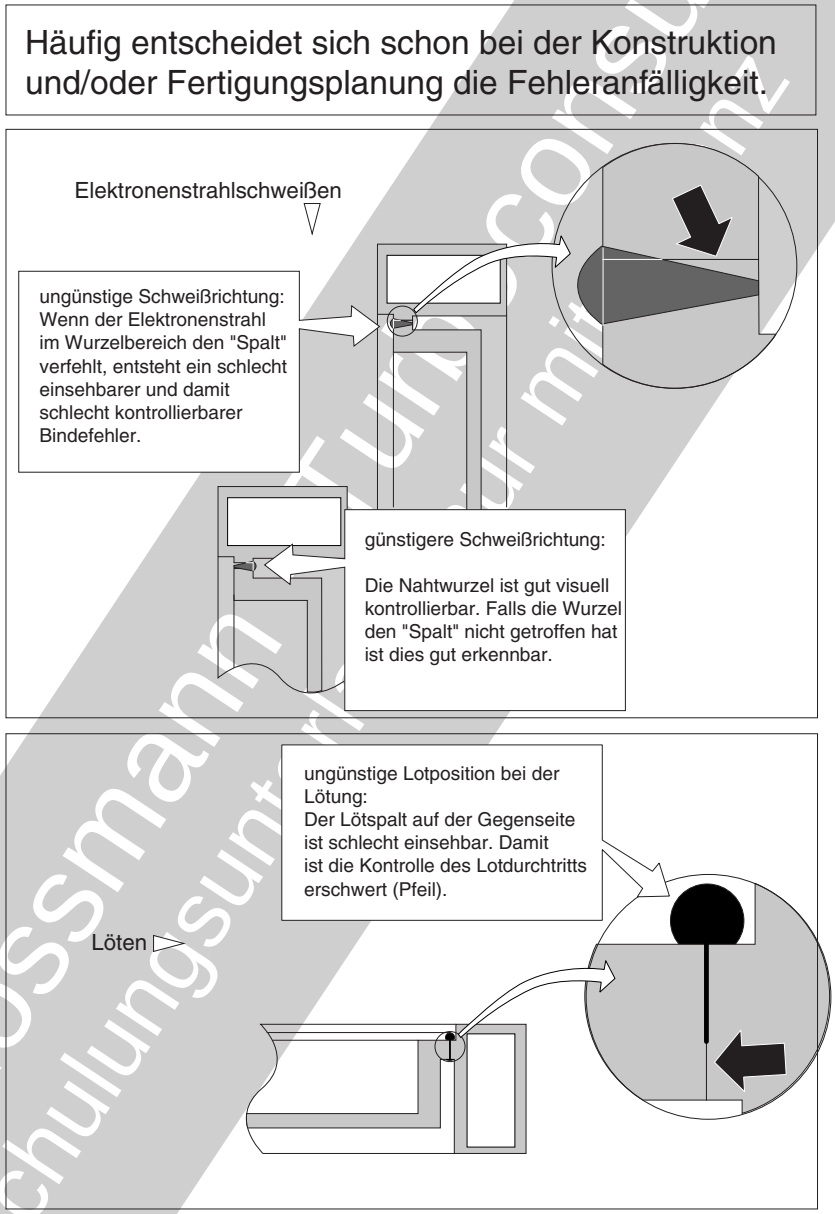


Bild 17.1-14

Bild 7.1-14: *Bereits der* ***Konstrukteur,*** *möglichst in Zusammenarbeit mit der* ***Fertigungsplanung,*** *sollte aktiv eine optimale Fertigung mit geringstmöglicher Fehleranfälligkeit (FMEA, Bild 17.1-10) anstreben.*
So sind z.B. Schweiß- und Lötverbindungen so am Bauteil zu positionieren, dass optimale Bedingungen für den Verfahrensprozess vorliegen und die ***visuelle Prüfung der Bindung über den gesamten Fügespalt*** *gewährleistet ist.*
Bei einer Elektronenstrahlschweißung kann dies mit einer Prüfung des Wurzelbereichs geschehen (Skizze oben). Ist diese schlecht zugänglich, kann das die Bauteilsicherheit tangieren (Bild 18.6-6).
Entsprechendes gilt auch für Lötungen. Nicht immer wird diesen Forderungen nachgekommen. Ein Beispiel ist die ungünstige Gestaltung einer Lötung in der unteren Skizze (siehe auch Band 3, Bild 12.2.1.4-20).

© Axel Rossmann Tunsconsult als Schulungsunterlage für mitgetrennt

Literatur zu Kapitel 17.1

17.1-1 H.Hansen, G.F.Kamiske, „Praxishandbuch Techniken des Qualitätsmanagements-Werkzeuge-Systeme-Prozessorientierung“, ISBN 3-933814-53-7, 1. Auflage August 2001, Symposion Publishing GmbH, Düsseldorf, Seiten 190-193, 263-290, 314.

17.1-2 M.Süß, „Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie“, Skriptum der Vorlesung an der TU München, Fakultät Maschinenwesen, Lehrstuhl für Flugantriebe, SS 2003.(3256)

17.1-3 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite186, 187, 192-222.

17.1-4 DIN 55350 „Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik“, September 1980. (2762)

17-5 A.Rossmann „Unser Beitrag zur Qualitätssicherung“, Axel Rossmann Turboconsult, ISBN 3-00-007241-1. 2000. Englische Ausgabe: „Helping the Quality Effort“, 1999.

17.1-6 A.Packeisen, W.Theisen „Turning and Grinding of Hard Alloys“, Zeitschrift: „Advanced Engineering Materials, 1999, 1, No. 1, Seite 35-48. (646)

17.1-7 W. Friedrich. „Tabellenbuch für Metallgewerbe“, Ferdinand Dümmler Verlag Bonn, 1975, ISBN 3-427-51015-8, Seite 77.

17.1-8 D.Wagner, J.A. Birt, M.Snyder, J.P.Duncanson „The Human Factors Design Guide“, National Technical Information Service, Springfield, Virginia USA, 1996.

17.1-9 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 1“, 2000, ISBN -3-00-005842-7, Kapitel 2.3, Bild 2-4.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

17.2 Die ungeschädigte Oberfläche - „Surface Integrity“

In der Literatur 17.2-2 wird der Begriff **„Surface Integrity“ als eine Gesamtbetrachtung der Oberflächenbeschaffenheit** beschrieben. Es handelt sich „um den ursprünglich vorhandenen oder erzeugten Zustand einer Oberfläche, der durch spanende Bearbeitung oder andere Methoden entstanden ist“. Der Oberflächenzustand wird also nicht als Kennzeichen einer ungeschädigten bzw. verbesserten Oberfläche genannt.Weitere Beschreibungen und Definitionen sind:

Surface Integrity steht in Lit. 17.2-1 für die **ungeschädigte Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke**. „Surface Integrity is the unimpaired or enhanced surface condition and/or properties of a material resulting from the impact of a controlled manufacturing process“.

Wörtlich übersetzt bedeutet dies: Surface Integrity ist der **ungeschädigte oder verbesserte Oberflächenzustand und/oder dessen Eigenschaften eines Werkstoffs, der sich aus der Einwirkung eines kontrollierten Fertigungsprozesses** ergibt. Sie sind damit in Auslegung/Konstruktion berücksichtigt.

In diesem Buch wird folgende Definition verwendet: **„Surface Integrity“ ist die verfahrenstypisch bearbeitete Oberfläche eines Bauteils mit den unvermeidlichen minimierten Schwachstellen** (Bild 13.2-1 und Band 3 Seite 11.1-2). Der Einfluss von Schwachstellen ist im Gegensatz von Fehlern oder Fehlstellen mit den anzuwendenden Spezifikationen, Zeichnungsangaben und Vorschriften abgedeckt.

Die Wichtigkeit der Surface Integrity nimmt historisch zu (Bild 17.2-2 und Lit 17.2-3). Dies hängt mit dem Trend zu höherer Leistungskonzentration und verbesserten Wirkungsgraden zusammen. Das gilt insbesondere für den **Leichtbau**. Der Übergang vom **„Safe Life Design“ zum „Damage Tolerant Design“** (Lit. 13-12) erfordert die Einengung schädigender Einflüsse und Schwachstellen, die Aufgabe der Surface Integrity. Auch der Einsatz immer festerer Werkstoffe, deren Potenzial ausgeschöpft wird, fördert die Bedeutung der Surface Integrity (Bild 17.3.1-1), denn die Schwachstellen müssen immer kleiner werden.

© Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Bild 17.2-1 *(Lit 17.2-11): Die* ***Oberfläche*** *eines Bauteils ist* ***die*** *potenzielle* ***Schwachstelle****. Dies gilt in erster Linie für Schwinganrisse aber auch Zeitstand- bzw. Kriechbrüche und korrosionsbedingte Anrisse (SpRK, IK) gehen bevorzugt von der Oberfläche aus. Ursache für dieses Verhalten ist, dass nahezu alle schädigenden Einflüsse wie* ***Medien und Aufheizung*** *zuerst und verstärkt auf die Oberfläche wirken. Auf die Bauteilfestigkeit an der Oberfläche wirkt sich negativ aus, dass höhere Spannungen als im Volumen auftreten. Eine schädigungsbedingte geringere Festigkeit und größere Sprödigkeit kommt so verstärkt zum tragen. Eine solche Kombination macht sich besonders bei Kerben negativ bemerkbar. Zusätzlich zeigt die Oberfläche auf Grund der fehlenden Dreidimensionalität der Spannungen ein anderes Verformungsverhalten als im Inneren (Band 1, Bild 5.2.1-5)*

Spannungen*: In vielen Fällen stehen Bauteile unter* ***Biegespannungen,*** *die entsprechend ihres dreiecksförmigen Spannungsverlaufs die Oberfläche am höchsten belasten. Eine Kraftübertragung mit Hilfe von Form- oder Kraftschluss (Reibung) kann die Oberfläche erheblich beanspruchen. Bei Reibkontakt kommt es zu hohen Schubspannungen (Band 1, Bild 5.9.3-6).*

Kerben und Kratzer: *Kerben erhöhen örtlich die Spannungen, gleich ob sie konstruktiv bedingt (z.B. Querschnittssprünge), die Folge mechanischer Beschädigungen sind, oder an überhöhten Schweißnähten liegen.*

Oberflächenbeschädigungen: *Diese können sich auf zweifache Weise negativ auswirken. Als Kerben in Form von Verschleißabtrag oder Anfressungen. Eine zusätzliche Möglichkeit ist die Schädigung der Oberfläche mit einer Festigkeitsabnahme. Hierzu zählt die Frettingschädigung von Titanwerkstoffen mit einem Schwingfestigkeitsabfall bis zu 70 % (Band 3, Bild 12.2.1.6-8).*

Zugeigenspannungen*: Vermindern die nutzbare Schwingfestigkeit mit einer Erhöhung der Mittelspannung. Zugeigenspannungen können auf vielfältige Weise entstehen, z.B. bei Zerspanung (Bild 12.2.1.1-2) ohne oder mit Wärmeeinwirkung und hohen Temperaturgradienten wie beim Schweißen (Bild 12.2.1.3.1-16).*

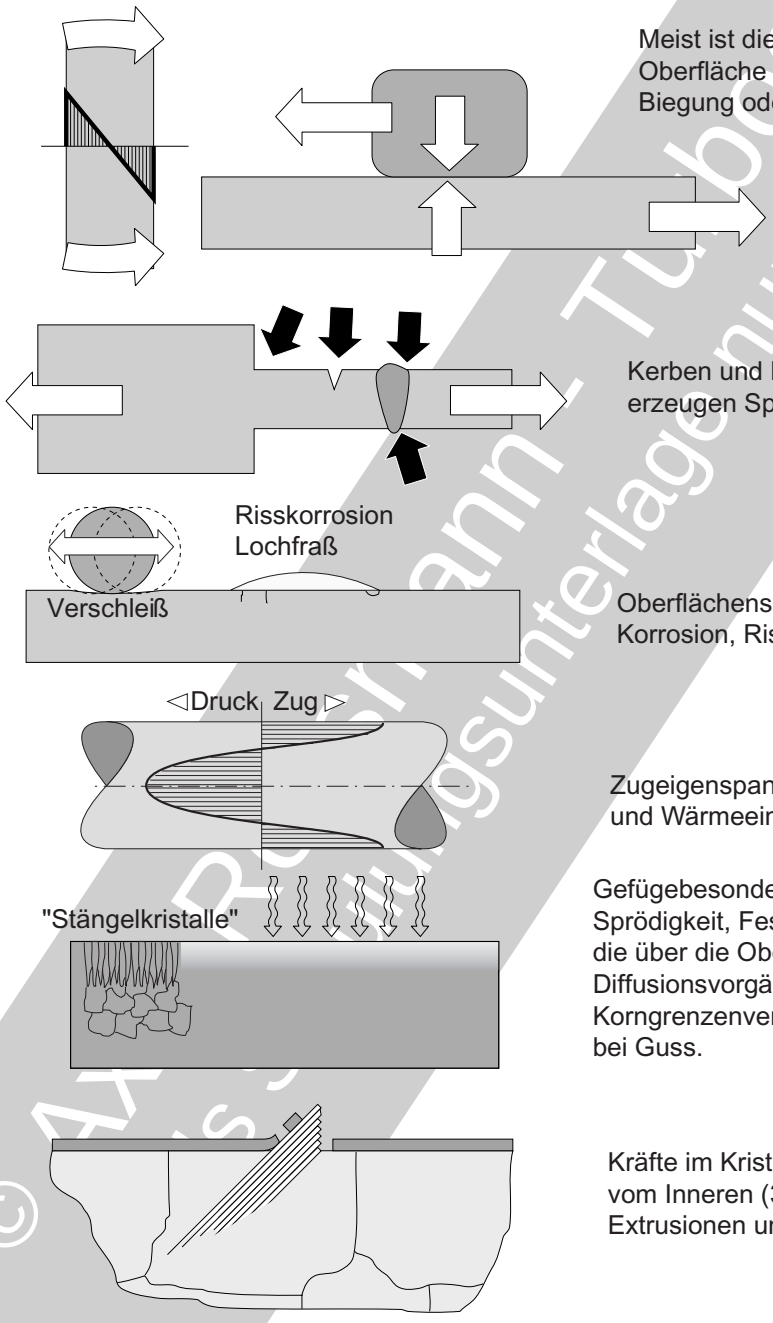
Gefügebesonderheiten *können eine Folge von Einwirkungen auf die Oberfläche sein. Beispiele sind Veränderungen des Werkstoffs mit Festigkeitsabfall und oder Versprödung auf Grund von Diffusionsvorgängen, auch Oxidation zählt dazu. Mit Festigkeitsabfall ist z.B. bei vergüteten Stählen oberhalb der Anlasstemperatur und Nickellegierungen oberhalb der Lösungsglühtemperatur zu rechnen.*
Der Temperaturgradient in den Querschnitt führt beim Erstarren von Gussteilen zu einem entsprechend orientierten Kornwachstum von der Oberfläche. Laufen die Korngrenzen dieser sog. „Stängelkristalle“ quer zu den Spannungen, werden rissbildende Schadensmechanismen wie Kriechen, Thermoermüdung von korrosivem und oxidativem Korngrenzenangriff begünstigt (Band 1, Bild 5.4.2.2-5).

Kräfte im Kristallgitter: *Weil der Oberfläche die „dritte Dimension“ fehlt, können z.B. Verformungen im Mikrobereich die Oberfläche schädigen. Ein Beispiel ist die örtliche Zerstörung schützender Oxidschichten durch* ***Gleitvorgänge*** *bei plastischer Verformung. So kann z.B. ein schädigender Korrosionsangriff möglich werden (Band 1, Bild 5.6.3.1.1-3).*

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“

Risse gehen gewöhnlich von der Oberfläche aus. Warum?



Meist ist die Beanspruchung an der Oberfläche am größten, z.B. bei Biegung oder Einleitung von Kontaktkräften.

Kerben und Kratzer, Rattermarken usw. erzeugen Spannungsspitzen an der Oberfläche.

Oberflächenschädigungen: Verschleiß, Korrosion, Rissbildung.

Zugeigenspannungen durch Bearbeitung und Wärmeeinwirkung.

Gefügebesonderheit an der Oberfläche, Sprödigkeit, Festigkeitsabfall durch Einflüsse die über die Oberfläche einwirken: Diffusionsvorgänge, Wärmeeinwirkung usw. Korngrenzenverlauf senkrecht zur Oberfläche bei Guss.

Kräfte im Kristallgitter (2-D) unterscheiden sich vom Inneren (3-D). Dadurch entstehen z.B. Extrusionen und Intrusionen.

Bild 17.2-1

© Axel Rosmann - Turboconsult
Nur Vorlesungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 17.2-2: *Für* ***Kampfflugzeuge*** *stehen Forderungen nach Leistungskonzentration und Gewichtsminimierung im Vordergrund. Anders bei* ***Verkehrsmaschinen****, für sie hat* ***Kostenminimierung*** *bei Beschaffung und Wartung sowie ein niedriger Kraftstoffverbrauch Priorität. In beiden Fällen führen die Entwicklungsbemühungen zu höheren Betriebsbelastungen der Bauteile. Davon sind besonders die Eigenschaften der Rotorkomponenten betroffen.*

Höheres Spannungsniveau: *Höhere Leistungskonzentration bzw. Gewichtsminimierung führt zwangsläufig zu höheren Drehzahlen und höheren Betriebstemperaturen der Rotoren. Für die Scheiben steigen dabei statische (Kriechen bei Heißteilen) und dynamische Lasten (LCF) bzw. Spannungen.*
Die Kostenminimierung *über den* ***Kraftstoffverbrauch*** *erfordert einen besseren Gesamtwirkungsgrad. Das führt zu einem Anstieg der Gastemperaturen und einer Anhebung des Drucks mit entsprechend höheren Bauteilbelastungen.* ***Beschaffungskosten*** *leiten einen Trend zu weniger Bauteilen ein. Das bedeutet weniger Verdichterstufen in integraler Bauweise (Blisk, integrale Leitapparate). Weniger Stufen haben breitere Schaufelblätter zur Folge. Diese schwereren Schaufeln erhöhen die Scheibenbelastung. Bei eingeschobenen Schaufeln steigt die Fußbelastung, insbesondere an den Auflageflächen (Band 1, Bild 5.9.3-6).*
Ein Anstieg des Gesamtdruckverhältnisses bei reduzierter Stufenzahl des Verdichters und kleinere Axialabstände der Schaufelreihen bedeuten eine höhere aerodynamische Belastung der Schaufeln. Zu erwarten sind erhöhte hochfrequente Schwingbelastungen. Um die notwendige HCF-Festigkeit sicher zu gewährleisten, werden an die Bauteiloberfläche höchste Anforderungen gestellt.
Ein höheres Spannungsniveau erfordert die Einbeziehung kleiner, wachstumsfähiger Fehler und des Risswachstums (Bild 17.3.1-1). Man geht vom „Safe Live“-Konzept zum „Damage Tolerance“-Konzept über (Lit. 17.2-12). Fertigungsbedingte Fehlstellen an der Oberfläche treten damit immer mehr in den Vordergrund.

Empfindliche und „schwierige“ Werkstoffe *mit höchsten Festigkeiten benötigen Herstellungsprozesse des Halbzeugs bzw. der Rohteile mit engsten Toleranzen. Erschmelzungs- und Schmiedeprozess (Band 3, Bild 11.1-14) lassen kaum Spielräume, um das notwendige optimale Gefüge im gesamten hochbelasteten Bauteilquerschnitt zu gewährleisten. Die maximal tolerierbare Fehlergröße wird immer kleiner. Damit werden auch die Prozessparameter der nachfolgenden Fertigungsschritte immer mehr eingeschränkt. Dies gilt z.B. für die Wärmebehandlung und damit auch für eventuelle Lötprozesse und thermische Beschichtungsverfahren.*
Die Einbeziehung von wachstumsfähigen Fehlstellen und des Rissfortschritts stellt weitere Anforderungen an die fehlerfreie Bearbeitbarkeit. Leider steht dem die hohe Werkstofffestigkeit entgegen. Sie führt zu großen Schnittkräften und erhöhter Belastung der Oberfläche im Fertigungsprozess (z.B. Kommarisse, Band 3, Bild 12.2.1.1-2). Für die Festigkeit notwendige Gefügekomponenten wie Karbide und Verfestigungsphasen können z.B. ausbrechen oder anreißen und so wachstumsfähige Kerben bilden.
Höhere Zerspanungskräfte können tiefer in die Oberfläche einwirken. Das wirkt sich auf die potenzielle Fehlstellengröße bzw. Schädigungstiefe aus.

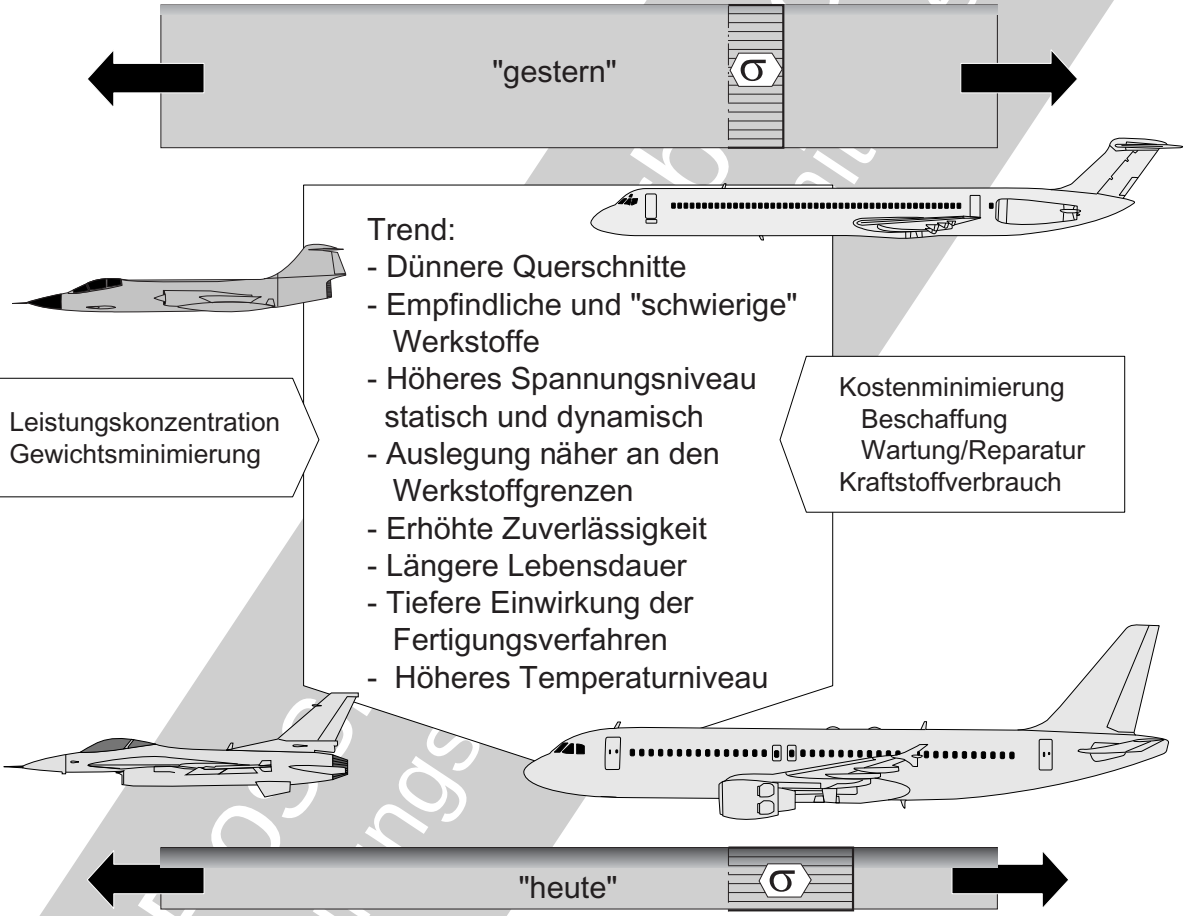
Auslegung näher an den Werkstoffgrenzen: *Die computergestützten Berechnungen ermöglichen eine genauere und sicherere Ermittlung der Betriebsbelastungen. Ein kleinerer Abstand zu den garantierten Mindestwerkstoffdaten (Design Lines) nutzt diesen Vorteil. Das erfordert jedoch, dass die Eigenschaften des Serienbauteils ausreichend sicher mit den Auslegungsdaten übereinstimmen. Diese For-*

Fortsetzung auf Seite 17.2-6

© Kopierstrahn - Turbosonsult
Lizenz nur zur Unterlagennutzung

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“

Warum bekommt "Surface Integrity" einen immer höheren Stellenwert?



Die Vorteile der "Surface Integrity" helfen den Trend zu immer höheren Anforderungen zu beherrschen:

- Besseres Verständnis der Prozesse und Prüfgrenzen
- Kostenvermeidung wenn gefordert
- Weniger Ausschuss und Nacharbeit
- Bessere Qualitätskontrolle
- Erweiterte Prozessdaten
- Zuverlässigere Wertanalyse
- Bessere Definition von Fertigungsabweichungen
- Wegweiser für die Definition fortschrittlicher Prozesse oder zu deren Anwendung.

Bild 17.2-2

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“

Fortsetzung von Seite 17.2-4

derung geht mit einer erhöhten Zuverlässigkeit der Fertigungsverfahren bzw. der davon beeinflussten Werkstoffdaten einher. Das gilt natürlich besonders für Oberflächeneigenschaften, welche die dynamische Festigkeit (LCF, HCF) bestimmen.

Sieht man „Surface Integrity“ als ein Prinzip, lassen sich damit die Probleme des zu Beginn beschriebenen historischen Entwicklungstrends entschärfen. Die intensive Beschäftigung mit den Einflüssen und Schadensmechanismen der Fertigungsprozesse lässt ein besseres Verständnis erwarten. Das ermöglicht eine erfolgreiche gezielte Spezifizierung und Beeinflussung der Fertigungs- und Prüfverfahren. Kennt man die für die Betriebseigenschaften relevanten Prozessparameter, ist eine wichtige Voraussetzung für eine Fertigungsoptimierung geschaffen. So lassen sich solche mit unerheblichem Einfluss beispielsweise im Rahmen einer ***Wertanalyse*** *erweitern. Umgekehrt ist nachvollziehbar, wo keine Zugeständnisse bei Aktionen zur* ***Fertigungskostenminimierung*** *möglich sind. Eine Minimierung des Ausschusses oder von Nacharbeit (Bild 17.5-1 und Bild 17.5-5) bedeutet gleichzeitig eine Reduzierung der Fertigungskosten.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“

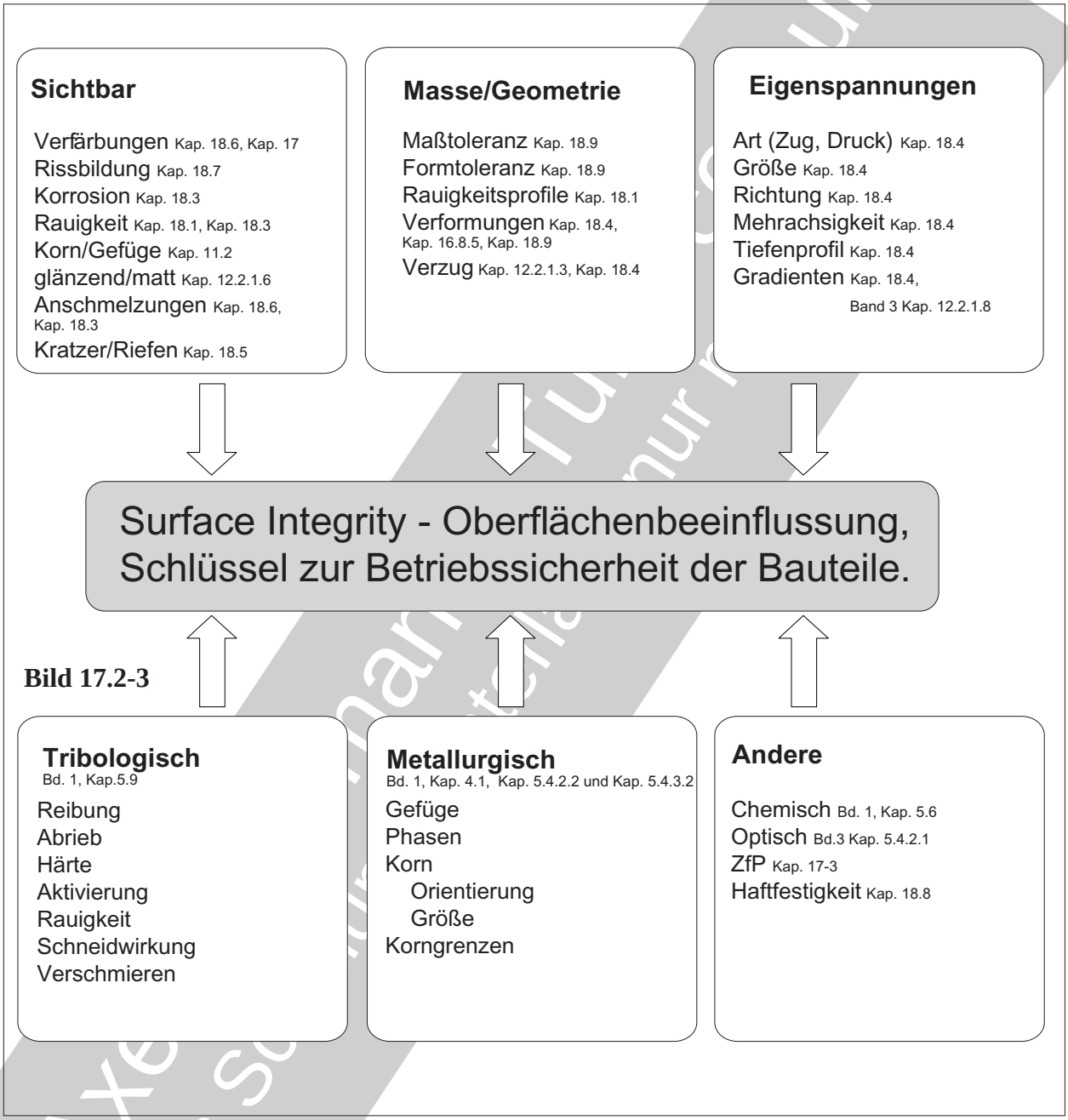
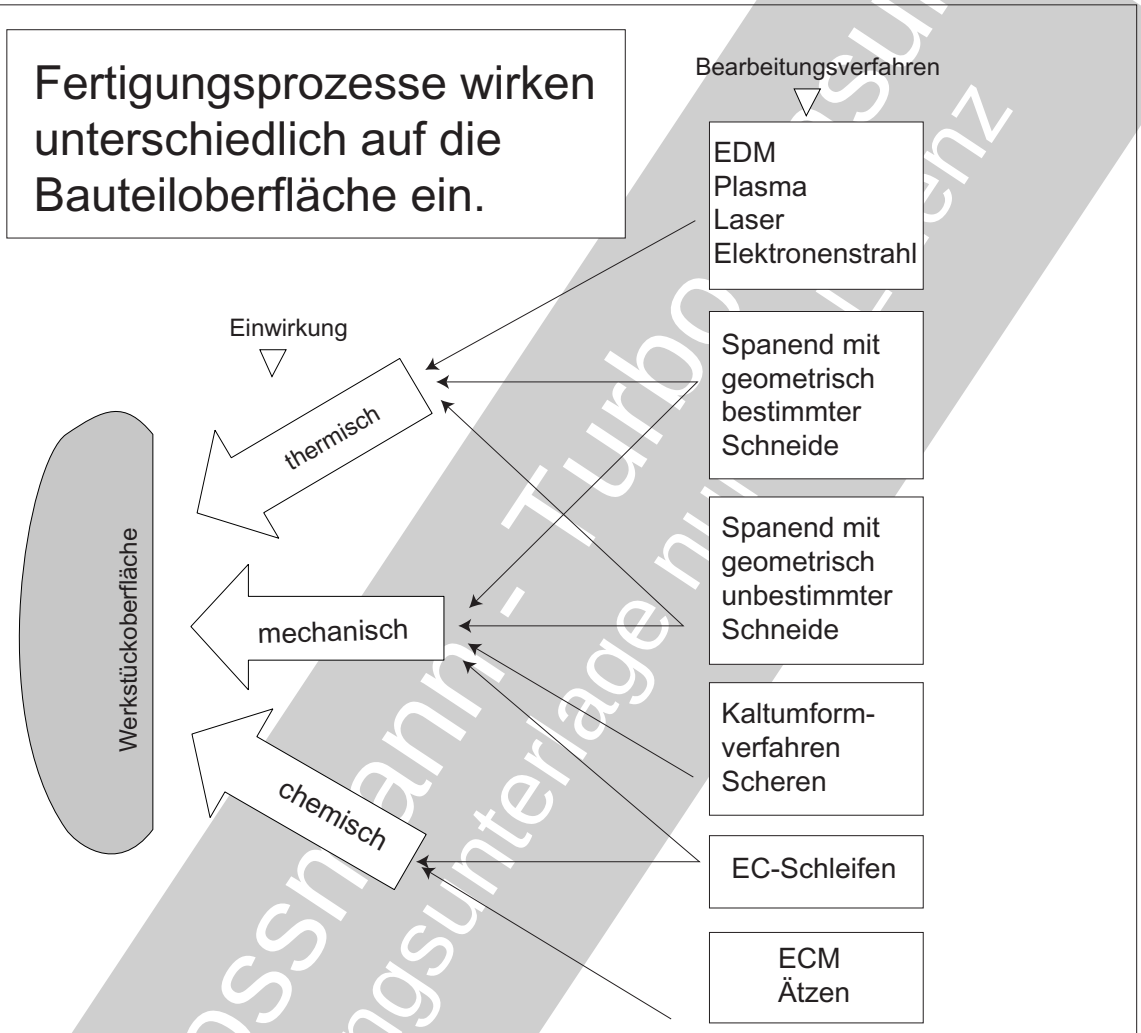


Bild 17.2-3

Bild 17.2-3 *(Lit 17.2-1, Lit 17.2-3 und Lit 17.2-4): Die hohe Betriebsbelastung bei relativ kleinen Sicherheitsabständen der Bauteile moderner Triebwerke (siehe Band 3, Bild 12.2.1.2-2) setzt eine minimale, beherrschbare und bekannte Beeinflussung der Oberfläche im Fertigungsprozess voraus, der „Surface Integrity“. Die beim Fertigungsprozess in der Bauteiloberfläche wirksamen Effekte und Merkmale lassen sich verschiedenen Begriffen zuordnen. Eine Möglichkeit enthält dieses Bild. Bei den oberen Zusammenstellungen handelt es sich eher um* ***Auswirkungen des Fertigungsprozesses****, während die unteren erzeugte* ***Eigenschaften des Werkstücks*** *repräsentieren. Den Merkmalen sind, soweit möglich, Hinweise zugeordnet die ausführlichere Erklärungen bzw. Beschreibungen enthalten.*

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“



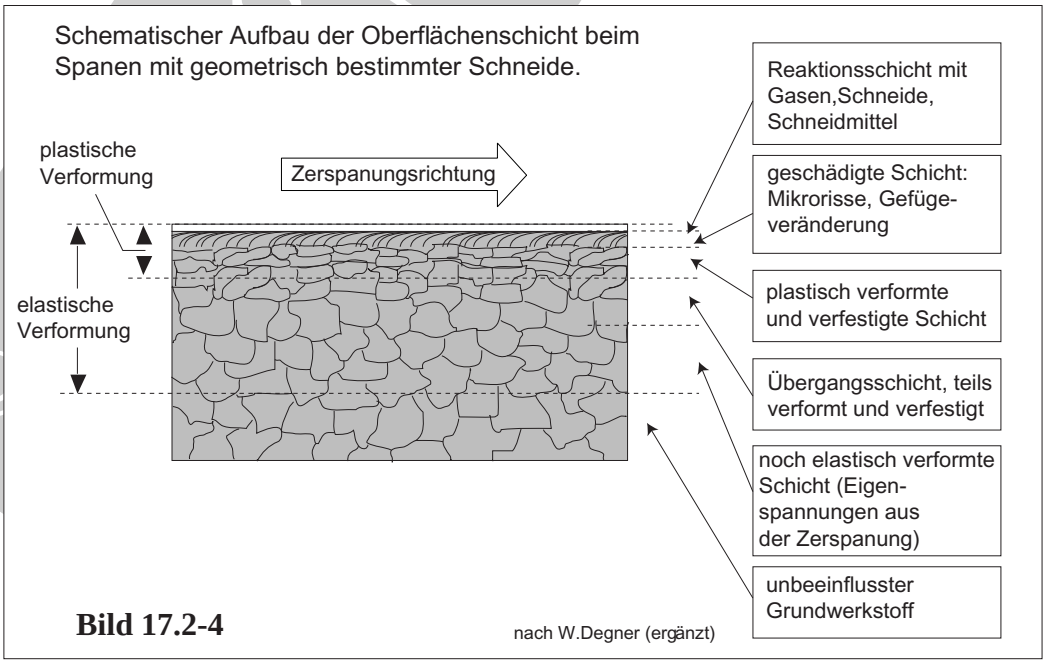


Bild 17.2-4

© Bossmann - Turbo Consult
Vorlesungsunterlage mit Lizenz

Bild 17.2-4 *(Lit 17.2-10): Drei* ***Einflüsse eines Fertigungsprozesses können auf die Bauteiloberfläche*** *wirken (Skizze oben):*

- ***Thermisch:*** *Aufheizen infolge Reibung, Lichtbogen/Funkenbildung (EDM), Strahlung (EB, Laser), Heißgas (Plasma, Schweißflamme, Wärmebehandlungsatmosphäre). Das kann eine Gefügeveränderung entstehen lassen, die zu einem Festigkeitsabfall führt. Eine solche Beeinflussung des Werkstoffverhaltens ist direkt (Anlassen, Lösungsglühen) oder indirekt möglich. Typisches Beispiel ist eine* ***Sensibilisierung*** *des Werkstoffs. Sie begünstig korrosiven Korngrenzenangriff (IK) und damit eine Schwächung. Hohe Temperaturgradienten, wie sie für Schweißverfahren und EDM typisch sind, induzieren schädliche Zugeigenspannungen während der Abkühlung (Band 3, Bild 12.2.1.2-16 und Bild 12.2.1.3.1-18). Führt die Aufheizung zur Aufnahme von Gasen oder Reaktionen mit diesen (Oxidation, Band 3, Bild 12.2.1.3.1-20) kann dies die Festigkeit ebenfalls mindern.*

- ***Mechanisch:*** *Kommt es zur Kaltverformung unter plastifizierenden Kräften, z.B. bei zerspanenden Verfahren, Verfestigungen (Kugelstrahlen), Umformung und Schneidvorgängen, werden neben einer Verfestigung Eigenspannungen induziert.* ***Angestrebt werden Druckspannungen****. Sie verhindern Risskorrosion (Bild 18.4-11) und senken die Mittelspannung (Bild 18.4-4) ab, so steigt die ertragbare Schwingbelastung. Zugspannungen wirken sich dagegen negativ aus. Im Betrieb ist besonders ein Abfall der Schwingfestigkeit problematisch.*

- ***Chemisch:*** *Hierzu gehören Verfahren die elektrolytisch Werkstoffe auflösen (ECM) oder mechanischen Abtrag unterstützen (EC-Schleifen). ECM und Ätzen bringt keine plastischen Verformungen und damit keine Eigenspannungen ein. Es kann jedoch* ***vorhandene Verfestigungen entfernen*** *und Eigenspannungen mit dem Abtrag verändern, meist abbauen oder umlagern.Weitere Einflüsse sind Reaktionszonen. So kann z.B. Chlor von Titanwerkstoffen in einer dünnen Oberflächenschicht gebunden werden. Eine spätere Aufheizung kann dann Spannungsrisskorrosion auslösen (Band 3, Bild 12.2.1.7-8). Chemische Reaktionen können mit einem selektiven Abtrag Korngrenzen oder Gefügebestandteile (z.B.Karbide durch Glykolsäure) angreifen oder Anfressungskerben (Lochfraß) erzeugen.*

In der Skizze unten ist die typische ***Beeinflussung einer Bauteiloberfläche von einem spanenden Verfahren mit definierter Schneide*** *(Drehen, Fräsen, Räumen) dargestellt. Man erkennt, dass sich mehrere Zonen mit unterschiedlichen, charakteristischen Veränderungen definieren lassen. Die Ausbildung der einzelnen Zonen ist deutlich von den Zerspanungsparametern abhängig. Sie beeinflussen das Festigkeitsverhalten des Bauteils, insbesondere unter dynamischer Last.*

Bild 17.2-5: *Dargestellt sind typische* ***Beispiele*** *aus der Vielfalt möglicher* ***Oberflächenbeeinflussungen****. Nicht immer handelt es sich um Schädigungen. Es ist sogar möglich, dass örtlich eine Verbesserung von Betriebseigenschaften eintritt.* ***Verfestigungen*** *und induzierte* ***Druckeigenspannungen*** *an einem plastischen Eindruck können örtlich die dynamische Festigkeit anheben. Dies kann sich zum Nachteil benachbarter Bereiche auswirken. Im Umfeld induzierte Zugspannungen, die mit den Druck-*

© A. Pässmann - Turbo Consult
Ausschnitt aus Unterlagen zur mündlichen Prüfung

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“

Oberflächen weisen eine Vielfalt von Schädigungen und Veränderungen auf die das Betriebsverhalten der Bauteile entscheidend beeinflussen können.

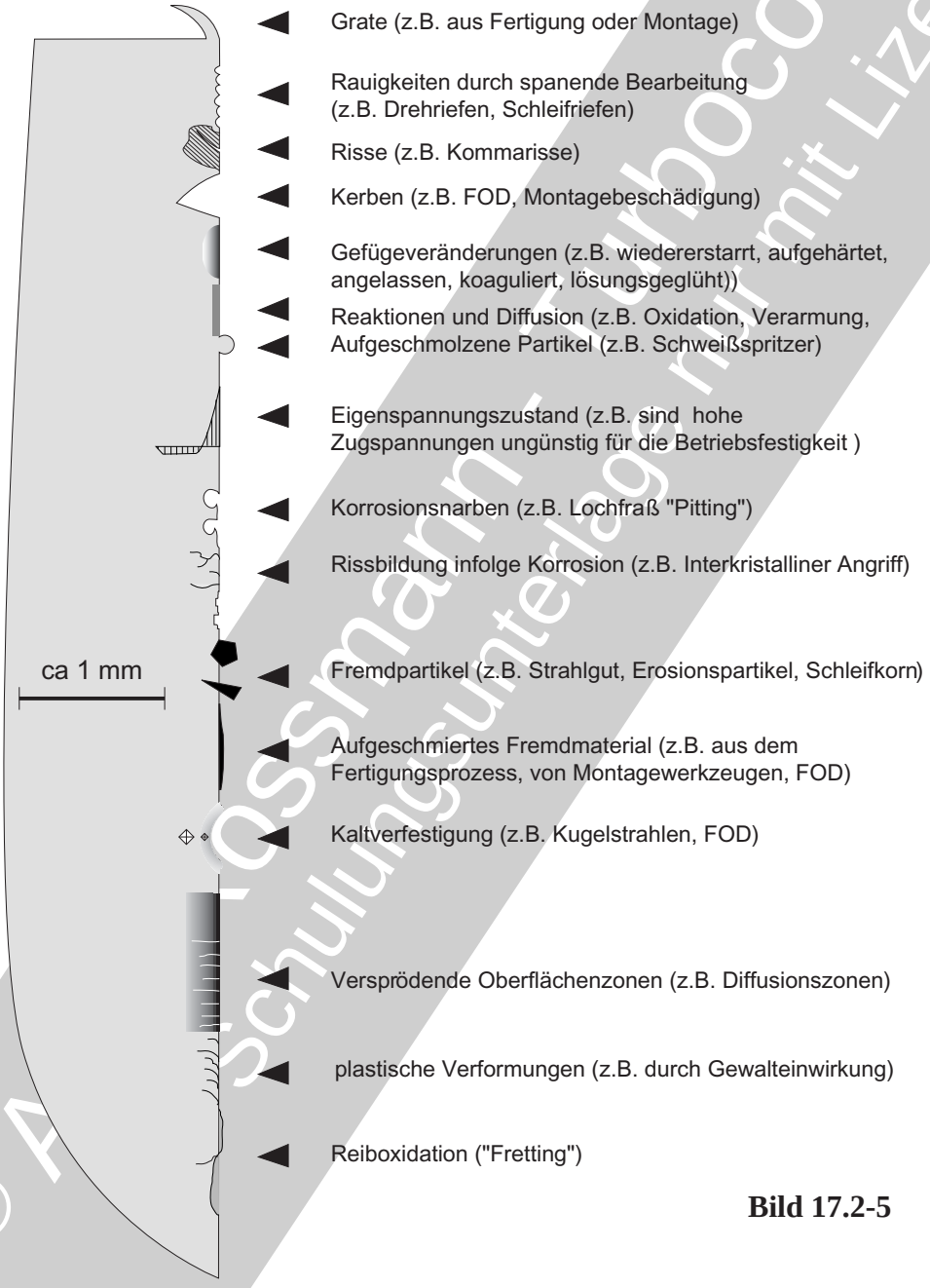


Bild 17.2-5

eigenspannungen am Eindruck im Gleichgewicht stehen, können als Schwachstelle wirken. Die beeinflusste Oberflächenzone ist in diesem Bild wenige Zehntelmillimeter dick.
Verschiedene Fertigungsverfahren können vergleichbare Effekte induzieren (Bild 18.4-3). Mit Kugelstrahlen und Zerspanen lassen sich Druckspannungen und Verfestigung erzeugen. Ätzen und elektrochemische Verfahren können Korrosionsschäden wie Korngrenzenangriff auslösen. Die Oberflächenrauigkeit wird von nahezu allen abtragenden Verfahren beeinflusst (Bild 18.1-6).

© A. Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

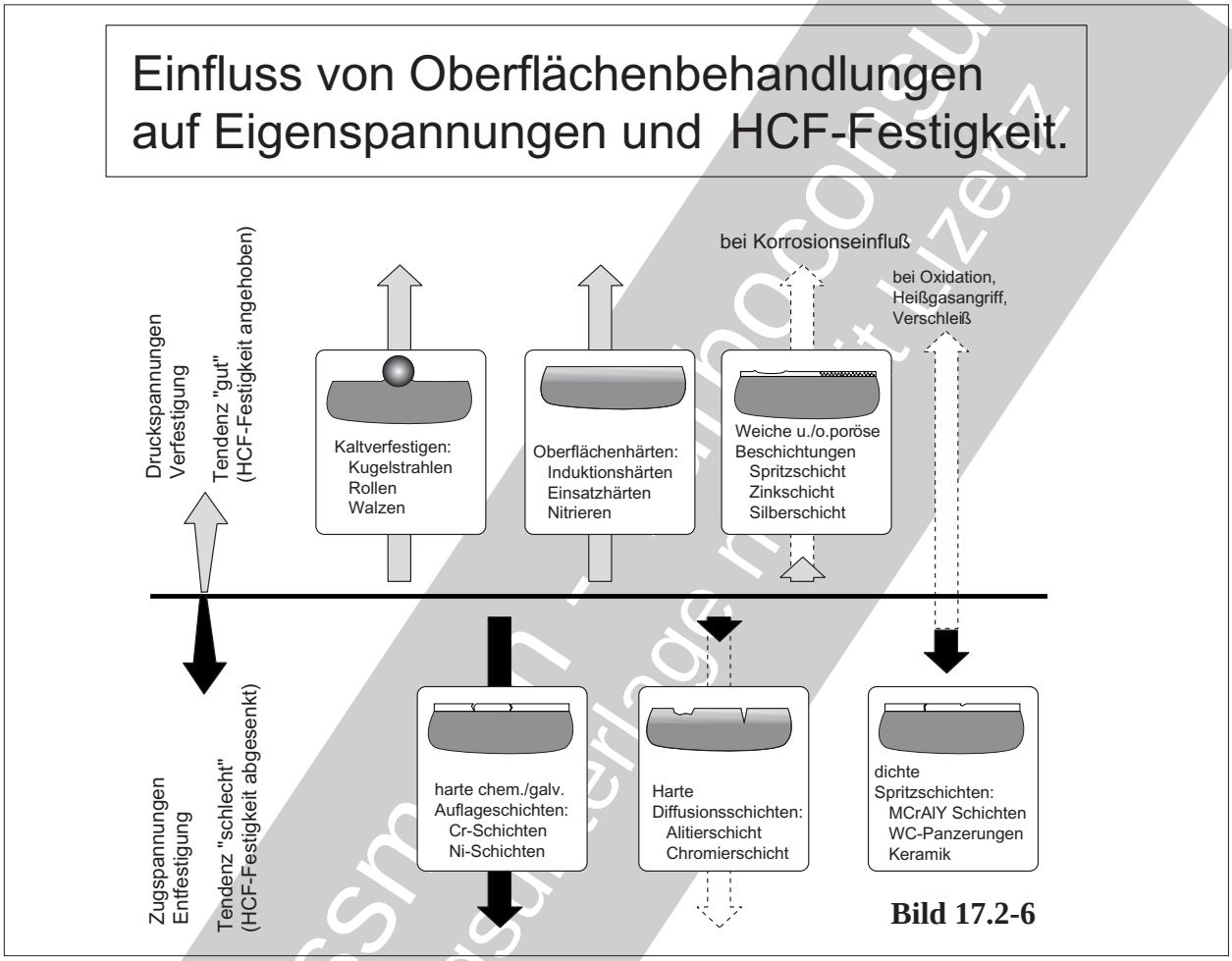


Bild 17.2-6

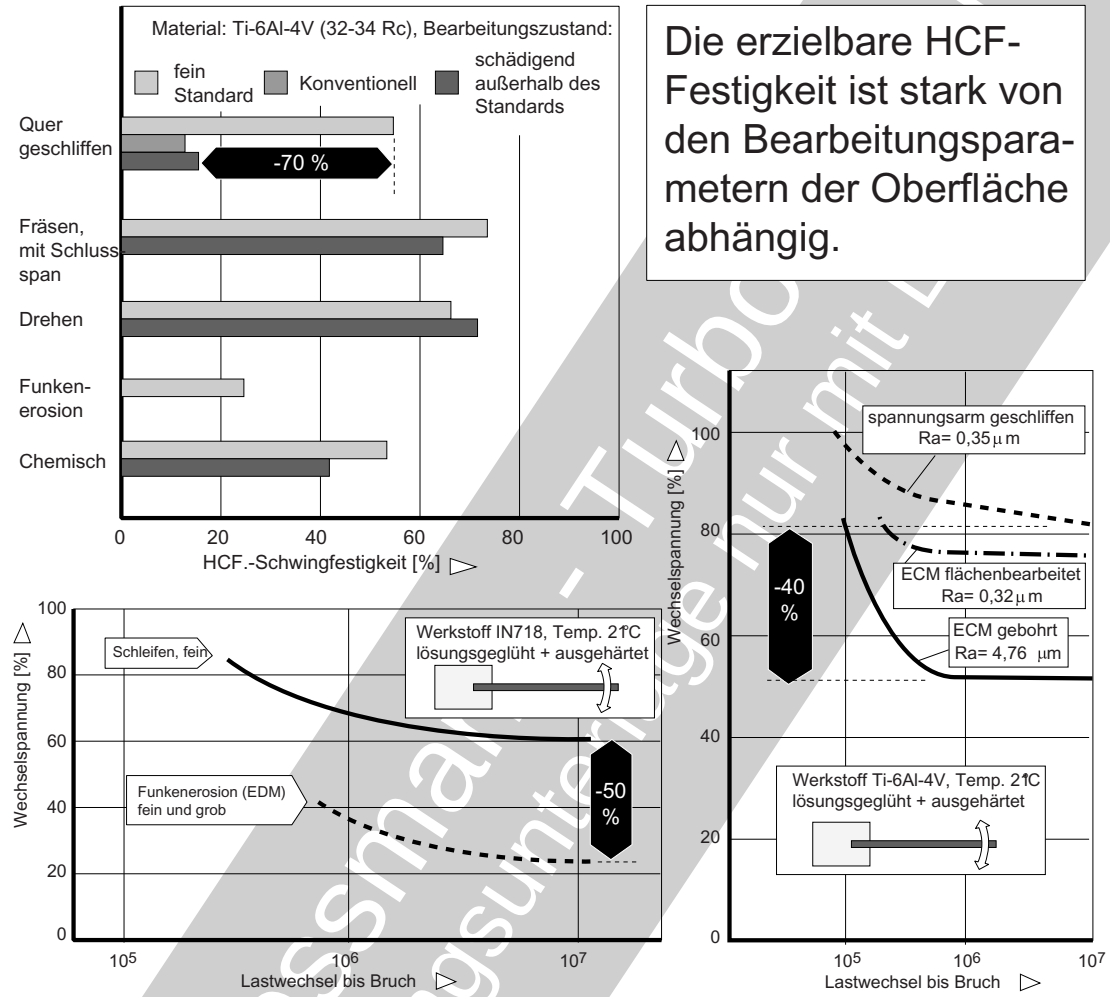
Bild 17.2-6: *Eine der wichtigsten und für Fertigungseinflüsse sensibelsten Werkstoffeigenschaften ist die* ***Schwingfestigkeit*** *im Dauerfestigkeitsbereich (HCF, Schwingfestigkeit im Bereich hoher Lastwechselzahlen). Sie ist für hochfrequent schwingende Bauteile die in kurzer Zeit ausreichend viele Lastwechsel akkumulieren, von großer Bedeutung. Solche Bauteile sind besonders Schaufeln von Verdichter und Turbine. Ganz allgemein kann gelten:* ***Verfestigung*** *infolge plastischer Verformung erhöht bei ausreichender Duktilität des Werkstoffs* ***die HCF-Festigkeit*** *(oben angeordnete Verfahren). Gleichzeitig auftretende* ***Druckeigenspannungen*** *macht man sich beispielsweise mit Kugelstrahlen (Band 3, Bild 12.2.1.6-5) und geeigneter Zerspanung (Bild 18.4-5.0) zu Nutze. Ein ähnlich positiver Effekt lässt sich mit der* ***Härtung*** *der Oberfläche erzielen (z.B. Nitrieren oder Einsatzhärten). Auch hier wirken neben einer Festigkeitssteigerung Druckspannungen (Bild 18.4-5.5).*

Andererseits kann der Abbau von Druckeigenspannungen und Verfestigungszonen (z.B. elektrochemischer Abtrag) bis zum Aufbau von Zugeigenspannungen (z.B. ungünstiger Schleifprozess) und Entfestigungen (z.B. im Bereich von örtlichen Gefügeveränderungen durch Erwärmung) die Schwingfestigkeit gefährlich absenken. Wenn zähe Beschichtungen die Oberfläche gegen Korrosionseinfluss abschirmen, kann das eine deutliche Anhebung der Schwingfestigkeit gegenüber dem ungeschützten Werkstoff ermöglichen.

Von ***spröden Beschichtungen mit Zugspannungen*** *(unten angeordnete Verfahren) ist immer eine Absenkung der Schwingfestigkeit zu erwarten (Lit 17.2-5, Band 3, Bild 12.2.1.2-2). Besonders gefährlich ist in diesem Fall eine Rissbildung bei plastischer Dehnung.*

© Axel Rossmann - Lehrconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“



Die erzielbare HCF-Festigkeit ist stark von den Bearbeitungsparametern der Oberfläche abhängig.

Bild 17.2-7

Bild 17.2-7 *(17.2-2 und 17.2-6): Die erzielbare Schwingfestigkeit im Oberflächenbereich hängt deutlich von Bearbeitungsverfahren und deren Parametern ab. Das Diagramm oben zeigt dies am Beispiel der* ***Titanlegierung Ti-Al6-V4****. Besonders geschliffene Oberflächen lassen im dargestellten Fall eine ausgeprägte Empfindlichkeit (Abfall der Schwingfestigkeit um ca. 70 %) gegenüber jeder „****unvorsichtigen****“* ***Schleifbearbeitung*** *erkennen.*
Fräsen und Drehen erzeugt generell ein höheres Festigkeitsniveau als Schleifen und andere nicht spanende Bearbeitungsverfahren. Auch bewirkt eine „gröbere“ Bearbeitung einen relativ geringen Schwingfestigkeitsabfall. Dies könnte mit einer plastischen Verformung im Oberflächenbereich und dabei induzierten Druckeigenspannungen in Zusammenhang stehen. Der Verfestigungseinfluss dürfte für Titanlegierungen entsprechend der geringen Verfestigungsneigung nicht ausgeprägt sein.
Funkenerosion (Electric Discharge Machining = EDM) zeigt die bekannt schlechte Schwingfestigkeit (Band 3, Bild 12.2.1.2-3).
Das im Vergleich zu Drehen und Fräsen niedrige Schwingfestigkeitsniveau chemisch bearbeiteter Oberflächen dürfte auf eine druckspannungsfreie Oberfläche als Folge eines verformungsfreien Abtrags zurückzuführen sein. Dieser Effekt ist bei einer ***Verfahrensänderung von Drehen oder Fräsen auf chemischen Abtrag*** *(z.B.Electro-Chemical Milling = ECM)* ***unbedingt zu berücksichtigen****. Eine solche Umstellung kann im Rahmen einer*

© Axel Rossmann - Turbo Vault
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Kostensenkung mit einer Blisk-Fertigung erfolgen. In einem solchen Fall kann ein anschließendes Verfestigungsstrahlen notwendig werden.
Das Diagramm unten rechts bestätigt offenbar die Absenkung der ***Schwingfestigkeit*** *bei der* ***ECM-Nacharbeit*** *spanend hergestellter Flächen. In diesem Fall handelt es sich um die optimale Schleiffläche einer Titanlegierung. Es darf jedoch vermutet werden, dass eine Schleiffläche, die bei weniger günstiger Parameterwahl unter Zugeigenspannungen steht, einen Anstieg der Schwingfestigkeit bei einem ECM-Abtrag zeigt. Voraussetzung ist, dass die chemische Behandlung keine örtlichen Kerben in Form eines selektiven Angriffs, z.B. an den Korngrenzen und/oder durch Korrosionsgrübchen, erzeugt. Dieser Effekt könnte die niedrige Schwingfestigkeit einer ECM-Bohrung erklären.*
Die verfahrenstypisch schädigende Wirkung (hier ca. 50 %) der ***Funkenerosion (EDM)*** *lässt sich dem Diagramm unten links für eine hochfeste Nickel-Schmiedelegierung, wie sie für Scheiben und Schaufeln zur Anwendung kommt, entnehmen.*

Bild 17.2-8 *(Lit. 17.2-7): Dieses Bild kann nur einen Eindruck vom* ***Einfluss unterschiedlicher Bohrverfahren auf die Schwingfestigkeit*** *gekühlter gegossener Turbinenschaufeln geben. Die Untersuchung wurde an Flachbiege-Schwingproben mit einer Bohrung (Skizze oben) durchgeführt. Die Belastungssituation entspricht etwa einer Kühlluftbohrung in einer schwingenden Turbinenschaufel.*
Im Folgenden soll eine Bewertung der Untersuchungsergebnisse versucht werden.
Die Auswirkung der Bohrverfahren auf die Schwingermüdung unterscheidet sich in ***Inkubationszeit*** *und* ***Rissfortschritt*** *(beispielhaft in Bildmitte gekennzeichnet). Angaben zur Höhe der dynamischen Belastung liegen nicht vor.*
Auffällig ist das ***schnellere Risswachstum der funkenerosiv*** *(EDM)* ***erzeugten Bohrungen****. Dieses Verhalten ist gekennzeichnet vom steilereren Anstieg der Rissfortschrittskurve im Vergleich zu einem elektrochemischen Bohrverfahren (STEM = „Shaped Tube Electrochemical Machining“). Über die Ursache lässt sich spekulieren. Eine höhere Schwingbelastung der EDM-Proben dürfte wohl auszuschließen sein, weil sonst mit einem erkennbar früheren Rissfortschritt zu rechnen wäre. Möglicherweise konnten die* ***typisch hohen, Zugspannungen in der Aufschmelz- bzw. Wiedererstarrungszone („Recast Layer“)*** *vom Kugelstrahlen nicht merklich abgebaut werden. Dieser Effekt mag von der Sprödigkeit des Recast Layers unterstützt werden. Sie ist eine Folge der Aufnahme von Kohlenstoff aus dem verfahrensspezifischen Dielektrikum (Petroleum). In der spröden Schicht können sogar beim Kugelstrahlen Partikel ausplatzen und/oder Risse entstehen. Ein Hinweis auf einen solchen Effekt wäre das etwas früher nachweisbare Risswachstum der gestrahlten Bohrungen.*
Der allgemein sehr späte (nach 10^8 Lastwechsel), anhand der Bruchfläche nachweisbare Rissfortschritt könnte im Zusammenhang mit Eigenschaften des Gusswerkstoffs stehen.
Unabhängig von Bohrverfahren und Rissfortschritt beginnt der nachweisbare Riss-

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

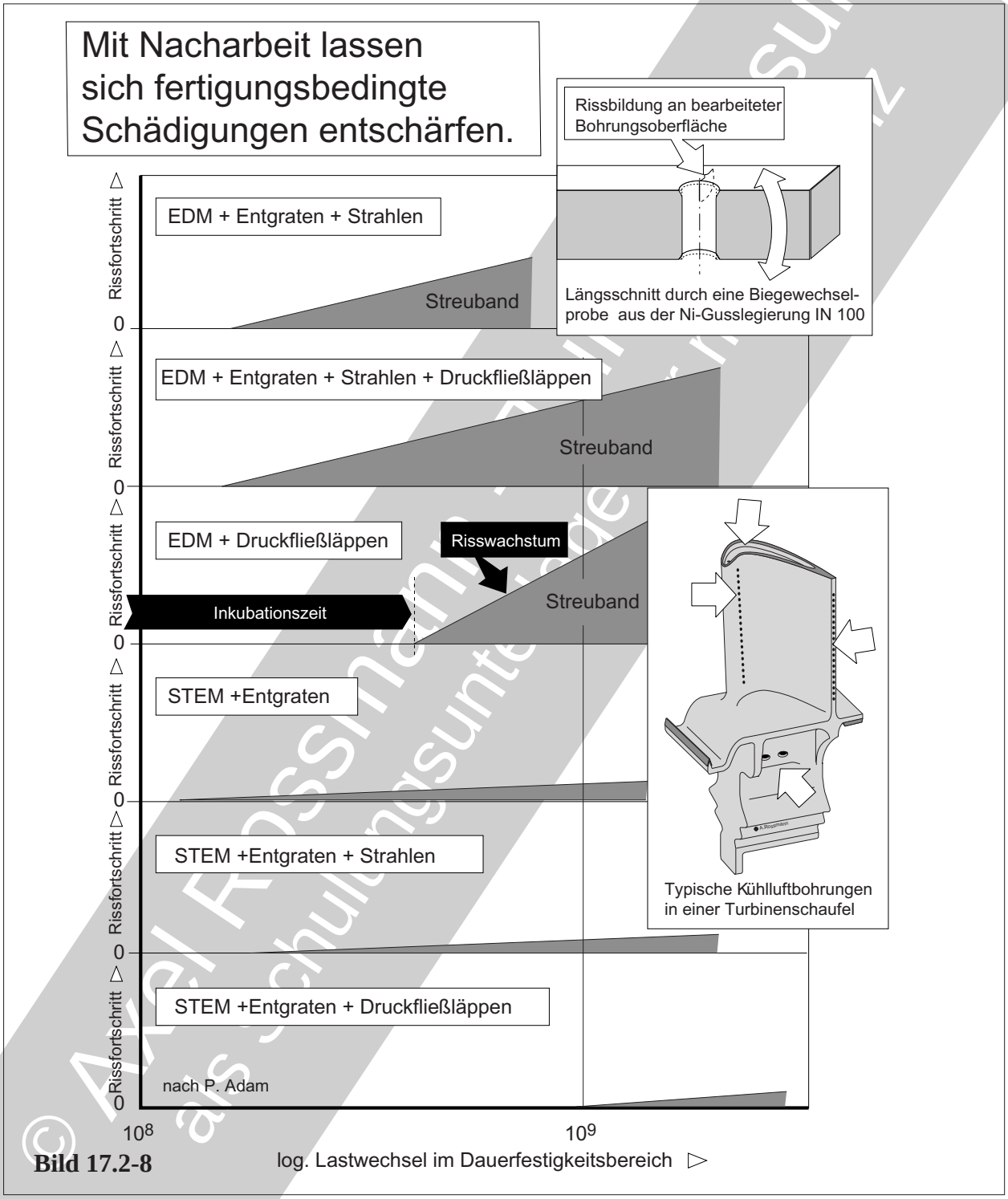


Bild 17.2-8

*fortschritt (**Inkubationszeit**) in einem Bereich von 10^8 bis 10^9 Lastwechsel (Band 1, Bild 5.4-2). Warum in zwei Fällen die druckfließgeläppte Bohrung scheinbar etwas später Risswachstum zeigte, dies aber in einem anderen Fall mit vergleichbarer Vorbehandlung nicht gilt, ist nicht einsichtig. Denkbar ist, dass mit dem Druckfließläppen tiefer gehende Schädigungen nicht entfernt werden konnten. Damit zeigen diese Versuche auch, **wie schwierig es ist, ausreichend reproduzierbare und für die Auswahl des Fertigungsprozesses geeignete dynamische Versuche durchzuführen**.*

Die Verfestigung einer Oberfläche ist ein wichtiger Schutz gegen eine unzulässige Verminderung der Schwingfestigkeit durch Oberflächenbeschädigungen.

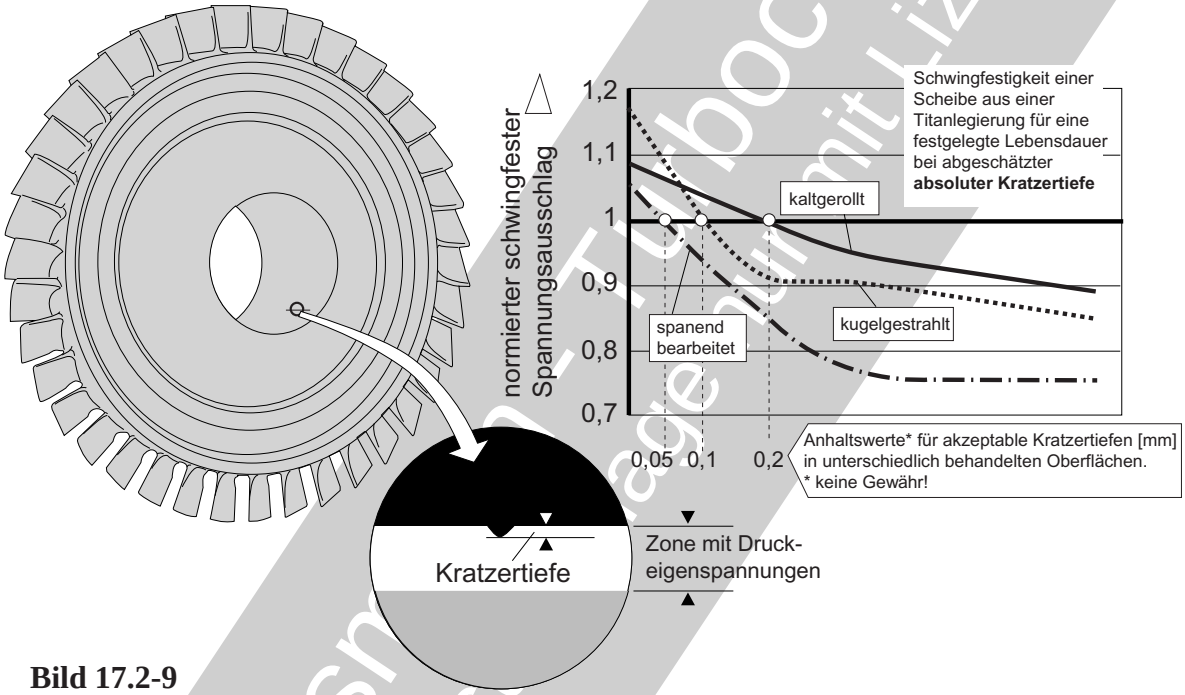


Bild 17.2-9

Bild 17.2-9 *(Lit 17.2-8):* ***Die Kaltverfestigung bzw. das Einbringen von Druckspannungen*** *in dynamisch hoch beanspruchten Bauteilen, wie Rotorscheiben (LCF) dient auch der* ***Minimierung des Einflussses von Oberflächenbeschädigungen, z.B. Kratzer****. Bei den typischerweise gering verfestigenden Titanlegierungen dürfte der positive Effekt in erster Linie auf Druckspannungen zurückzuführen sein. Für Nickellegierungen und Stähle ist wohl die Kaltverfestigung von größerer Bedeutung.*

Das Diagramm zeigt eine relative ***Schwingfestigkeit (HCF)*** *in Abhängigkeit von der Kratzertiefe am Beispiel einer* ***Titanlegierung*** *für Scheiben. Natürlich hängen diese Werte von den jeweiligen Versuchsbedingungen ab und sind somit eher als Trend zu verstehen.*

Eine lediglich spanend bearbeitete Oberfläche zeigt einen ***deutlichen Schwingfestigkeitsabfall ab einer Kratzertiefe von ca. 0,05 mm.*** *Dies ist die Tiefe, bei der die „1-Linie“ (unbeeinflusste Oberfläche) geschnitten wird. Offenbar handelt es sich um den vom* ***Zerspanungsprozess positiv beeinflussten Oberflächenbereich****.*

Eine ***kugelgestrahlte Oberfläche*** *zeigt ab einer Kratzertiefe von ca. 0,1 mm einen Schädigungseffekt. Dabei ist interessant, dass bei flacheren Riefen dieses Verfahren die höchste Schwingfestigkeit ermöglicht.*

Kaltrollen *ist ein sehr tief wirkendes Verformungsverfahren. Das wird an der relativ großen „schädigenden“ Kratzertiefe von ca. 0,2 mm erkennbar. Die Schwingfestigkeit bei flachen Kratzern liegt jedoch unter der, die sich mit Kugelstrahlen erzielen lässt.*

© Axel Rossmann - Turbocoach
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

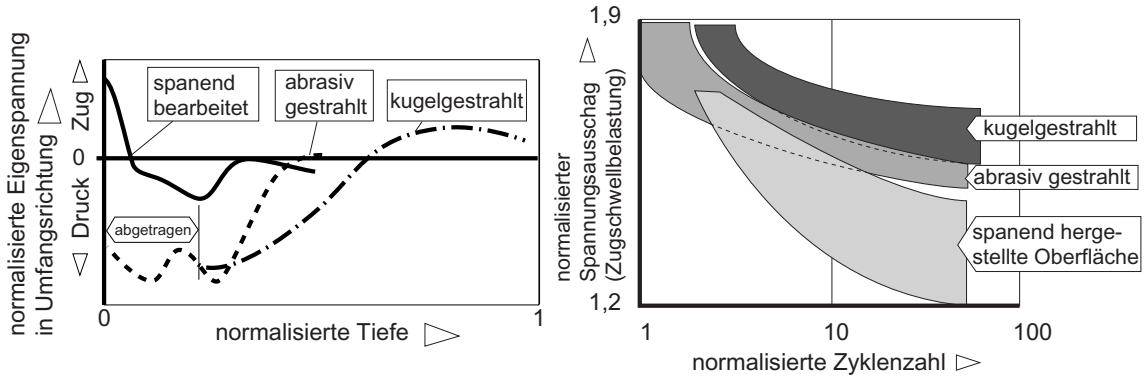
Bild 17.2-10 *(Lit. 17.2-8): Das Diagramm oben links zeigt den Verlauf der* ***Umfangskomponente*** *von bearbeitungsbedingten Eigenspannungen in Oberflächennähe einer* ***Scheibe aus einer Ni-Legierung****. Das Diagramm oben rechts lässt die Auswirkung dieser Verfahren auf die* ***Schwingfestigkeit*** *erkennen. Es ist anzumerken, dass solche Messkurven sehr verfahrens- und werkstoffspezifisch sein können und deshalb nur als Trends zu werten sind. Die* ***Zerspanung*** *hat in diesem Fall dicht an der Oberfläche zu merklichen tangential wirkenden* ***Zugspannungen*** *geführt, die dann in eine Druckspannungszone übergehen. Die Zugspannungen dürften die Scheibenoberfläche auch für kleine Beschädigungen in radialer Richtung empfindlich machen. Das scheint die vergleichsweise niedrige Schwingfestigkeit und deren große Streuung zu bestätigen. Trotzdem liegt die relative Schwingfestigkeit über 1 d.h. gegenüber einer unbeeinflussten Oberfläche liegt immer noch ein positiver Effekt vor.*
Ein ***abrasiver Abtrag*** *wie Oxidstrahlen erzeugte eine erstaunlich deutliche Druckspannungszone. Dabei wurde offenbar die dünne Zugspannungszone der spanenden Bearbeitung entfernt. Dieses Verfahren sorgt besonders im HCF-Bereich für ein deutlich verbessertes Schwingfestigkeitsverhalten. Das gilt sowohl für die Höhe der Festigkeit als auch die Streuung. Das Verhalten dürfte mit den niedrigeren Belastungen im HCF Bereich zu erklären sein. Flache Oberflächenfehler neigen offenbar dann nicht zum Risswachstum.*
Die ***kugelgestrahlte*** *Oberfläche zeigt selbst nach abrasivem Strahlvorgang eine tief wirkende schützende Druckspannungszone. Das Kugelstrahlen wirkt sich damit am deutlichsten positiv auf die Schwingfestigkeit aus. Dies gilt auch für hohe dynamische Belastungen hin zum LCF-Bereich. So lassen sich auch tiefere Schädigungen innerhalb der ausgeprägten Druckspannungszone „entschärfen“.*
Die unteren Diagramme zeigen das Verhalten einer Scheibe aus einer ***Titanlegierung****. Die angewendeten Bearbeitungsverfahren lassen*

© Axel Rossmann - Tribologie Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Qualitätssicherung: „Surface Integrity“

Eine Oberflächenverfestigung ist für die zyklische Lebensdauer eines Bauteils von großer Bedeutung.

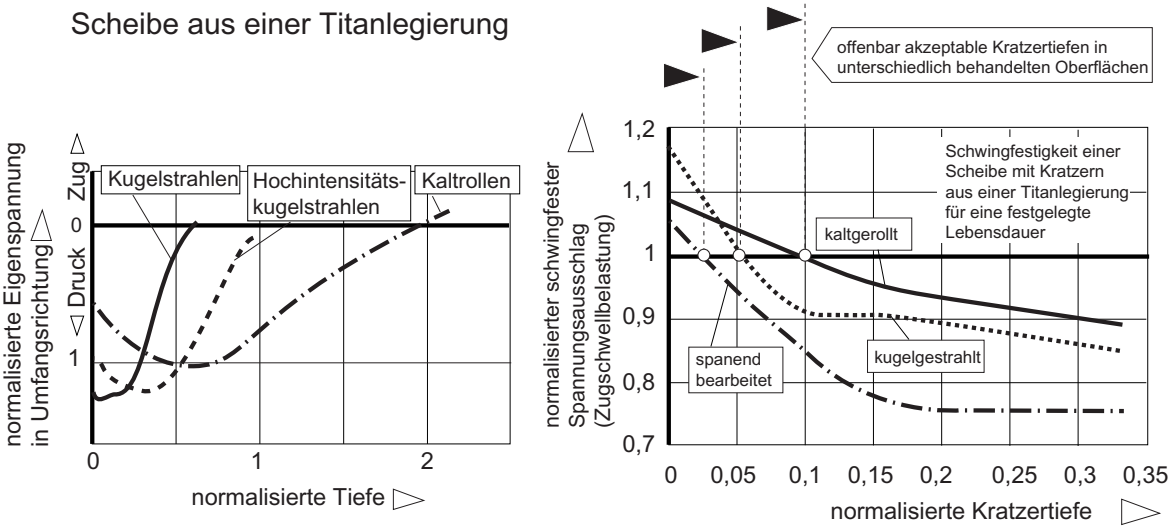
Scheibe aus einer Nickellegierung



Eigenspannungsverlauf über der Tiefe

zyklische Lebensdauer in Abhängigkeit von der Schwingbeanspruchung

Scheibe aus einer Titanlegierung



Eigenspannungsverlauf über der Tiefe

Einfluss der Kratzertiefe auf den ertragbaren Spannungsausschlag bei gleicher Lebensdauer.

Bild 17.2-10

*ausgeprägte Druckspannungszonen erkennen. Das gilt besonders für das **Kaltrollen** (Bild 17.2-9) und wird von der positiven Beeinflussung der Schwingfestigkeit bestätigt.*

Literatur zu Kapitel 17.2

17.2-1 Guy Bellows, „Surface Integrity of Eletrochemical Machining“, ASME-Paper 70-GT-117 der „Gas Turbine Conference & Products Show“, Brussels, Belgium, May 24-28, 1970, Seite 1-16.

17.2-2 M. Field, J.F. Kahles, „Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke, ‘Surface Integrity’ “, Zeitschrift „Fertigung“, Ausgabe 5/72, Seite 145-156.

17.2-3 ASM Handbook, Volume 5 „Surface Engineering“, ISBN 0-871170-377-7, 1994, Seite 144 und 145.

17.2-4 ASM Handbook, Volume 16 „Machining“, ISBN 0-871170-007-7, 1989, Seite 19-36.

17.2-5 F. Rotvel, „The Non-Destructive Measurement of Residual Stresses“ AGARD-AG-201-VOL. II, 1989, „Non-Destructive Inspection Practices, Seite 473-483.

17.2-6 „Machining Titanium & its Alloys“, www.supraalloys.com, 1.04.2004, Seite 1-12.

17.2-7 P. Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 67.

17.2-8 Frank Kirkland, „Cost Effective Use of New and Existing Aero Engine Materials“, „Aerospace Materials Conference 2000“, Toulouse, France, 20-22 Sept. 2000 Seite 1-23.

17.2-10 W.Degner, „Bedeutung der Oberflächenbeschaffenheit für die Erhöhung der Qualität und Zuverlässigkeit der Bauteile“, Zeitschrift „Feingerätetechnik“, 25. Jahrgang, Heft 2/1976, Seite 85-88.

17.2-11 E.Siebel, M.Gaier, „Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile“, Zeitschrift „VDI-Z“. 1956, Nr. 30, 21. Oktober, Seite 1715-1723.

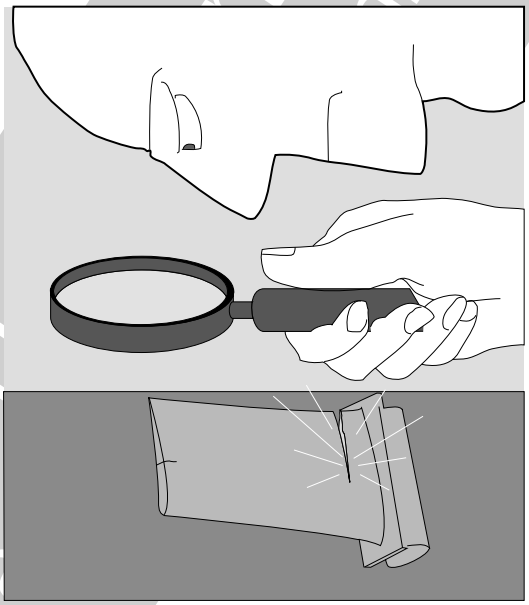
17.2-12 A.Rossmann „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 13-14.

©Axel Rossmann - Turbopconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

17.3 Prüfverfahren, Probleme und Grenzen

17.3.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Der "Erwartungshorizont" beeinflusst die Auffind-wahrscheinlichkeit



Unter **zerstörungsfreien Prüfverfahren** (= **ZfP**, engl. **Non Destructive Testing** = NDT) werden im Folgenden Verfahren verstanden, nach deren Anwendung das fehlerfreie Bauteil verwendet werden kann. Hierzu gehören die klassischen Standard-Serienverfahren wie

- Ultraschallprüfung (US-Prüfung, engl. Ultrasonic Testing),
- Röntgen (engl. X-Ray Testing)
- Wirbelstromprüfung (WS-Prüfung, engl. Eddy Current Testing),
- Magnetische Rissprüfung, Magnetpulverprüfung (engl. Magnetic Particle Inspection),
- Eindring(riss)prüfung (engl. Fluorescent Penetrant Inspection)

  und neuere Verfahren wie
- Thermografie.

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich nicht mit der Funktion der Verfahren. Hierzu ist genügend Fachliteratur verfügbar (Lit. 17.3-1 und Lit. 17.3-10). Es geht vielmehr um **verfahrenstypische Schwachstellen** und Probleme in der Praxis. Dazu wurde eine Auswahl (kein Anspruch auf Vollständigkeit) getroffen. Im Vordergrund steht der Gesichtspunkt der Bauteilsicherheit unter dem Einfluss der Serien-Neuteilfertigung.

Die Nachweisgrenzen der Prüfverfahren bestimmen die in der Auslegung und in den Spezifikationen berücksichtigten **Schwachstellen** (zulässig) und **Fehlstellen** (unzulässig, Bild 17.3.1-1). Mit dem Trend zu steigenden Bauteilbelastungen und festeren Werkstoffen muss sich die **Empfindlichkeit der zerstörungsfreien Prüfungen** weiter verbessern. Dieser eigentlich einleuchtende Zusammenhang, kann erfahrungsgemäß in der Praxis übersehen werden. Beispielsweise bei einer **scheinbar „harmlosen“ Werkstoffumstellung** in der Serie. Solche Umstellungen können bereits der Wechsel des Rohteillieferanten oder des Verfahrens (Pulvermetallurgie statt Schmieden) sein (Bild 17.3.1-4). Ein solches Versehen kann zu gravierenden Situationen führen, wenn bereits eine größere Zahl Bauteile verbaut sind oder die Serienauslieferung ohne Alternative erfolgen muss.

© Axel Rossmann - Transult als Schulungsunterlagen

Qualitätssicherung: Prüfverfahren

Unter Praktikern herrscht nicht selten die Vorstellung, dass Bauteile nach einer zerstörungsfreien Prüfung mit Sicherheit fehlerfrei sind. Dies ist nur insofern richtig, als die Wahrscheinlichkeit eines nicht gefundenen Fehlers (**Auffindwahrscheinlichkeit**, engl. **POD = Probability of Detection**) den Sicherheitsannahmen für das Bauteil entsprechen muss. Es ist also durchaus mit einem für das Prüfverfahren spezifischen „**Durchschlupf**“ zu rechnen (Bild 17.3.1-2, Bild 17.3.1-3.1 und Bild 17.3.1-3s.2). Die POD eines Prüfverfahrens ist von vielen Einflüssen abhängig (Bild 17.3.1-4). Natürlich bedarf es des **Fachmanns,** die optimalen Prüfbedingungen (z.B. die Bauteilkontur für eine bestmögliche Ultraschallprüfung) zu ermitteln und festzuschreiben. Das erfordert neben profunden Kenntnissen des Prüfverfahrens auch die Kenntnis hochbelasteter Bauteilzonen Lit. 17.3-13), wahrscheinlicher Fehlerlagen (z.B. von Schmiedefehlern in Rohteilen, Bild 17.3.1-5) und Werkstoffbesonderheiten (z.B. Korngröße), welche die verfahrensspezifische Fehlererkennbarkeit beeinflussen.

Eine Voraussetzung für eine optimale zerstörungsfreie Prüfung ist die **Zugänglichkeit** (Bild 17.3.1-6). Dies ist für die visuelle Auswertung der Eindringprüfung und magnetischen Prüfung unerlässlich und erfordert bereits während der Bauteilentwicklung eine Abstimmung mit der Konstruktion.

Auch die optimale **Vorbereitung des Bauteils**, z.B. Strahlen und/oder Ätzen, oder die Anwendung eines Thermozyklus zur Rissöffnung vor der Eindringprüfung ist Voraussetzung die erwartete POD zu erreichen (Bild 17.3.1-7).

Mit unerwarteten Einflüssen ist ebenfalls zu rechnen. Ein Beispiel ist die Beeinflussung der **Benetzbarkeit** von Bauteilen vor der Eindringprüfung. Sie kann von **eingeschleppten Verunreinigungen in Reinigungsbädern (**z.B. Silikonverbindungen, Bild 17.3.1-8) besorgniserregend beeinträchtigt werden.

Selbst wenn alle Voraussetzungen für eine optimale Prüfung geschaffen wurden, hängt die POD in hohem Maß vom Prüfer ab. Motivation, Erfahrung, Fachkunde und mentale Stabilität (Bild 17.3.1-9 und Bild 17.3.1-10) fördern die Sicherheit der Prüfung.

Auch scheinbar einfache **Dokumentationen,** wie die eines optischen Befunds sind nicht unproblematisch. So spielt die Schattenbildung auf Fotografien eine wichtige Rolle und kann den Befund fehlinterpretierbar verändern (Bild 17.3.1-13).

Bild 17.3.1-1: *Diese Betrachtung an Rotorscheiben soll das Dilemma des Einsatzes von Werkstoffen mit* ***erhöhter Festigkeit bei entsprechend angehobener Betriebsbelastung*** *verdeutlichen. Die Erfahrung lehrt, dass Werkstoffkosten gewöhnlich mit der Festigkeit ansteigen. Kosteneffizienz erfordert einen Einsatz in höher belasteten Bauteilen. Damit verschärfen sich die Qualitätsanforderungen an den Werkstoff. Besonders die* ***Schwachstellengröße*** *(zulässige Fehlstellengröße) muss* ***abgesenkt*** *werden. Dies lässt sich an den Kurven aus dem Diagramm zum bruchmechanischen Verhalten, unten rechts, erkennen. Betrachtet man das Risswachstum unter zyklischer Beanspruchung (LCF) als wichtigstes, die Lebensdauer bestimmendes Kriterium, erkennt man, dass der Rissfortschritt auf mehrfache Weise von einer Spannungserhöhung, beeinflusst wird.*

- Ein ***Risswachstum tritt bereits bei kleineren Fehlern*** *oberhalb eines* ***Schwellenwerts*** *(„F“ > a_{th} in Skizze oben rechts) auf.*

- Die ***Rissfortschrittsgeschwindigkeit*** *steigt an, d.h. die zyklische Lebensdauer „L“ wird kürzer.*

- Der spontane Restgewaltbruch erfolgt nach kürzeren Lebensdauern bei kürzeren kritischen Risslängen („R“ = a_c). Das heißt gegebenenfalls nach kürzeren Kontrollzeiten, im Extremfall muss der sofortige Austausch des Bauteils erfolgen.

Das Diagramm oben links zeigt die Größe wachstumsfähiger Fehlstellen (a_{th} = engl.

© Axel Rossmann - Juli 2006 - Consult
Weitergabe und Vervielfältigung nur mit Erlaubnis

Qualitätssicherung: Prüfverfahren

Je höher die Festigkeit des Scheibenwerkstoffs und damit die mögliche Belastung, umso empfindlicher muss die zerstörungsfreie Prüfung sein.

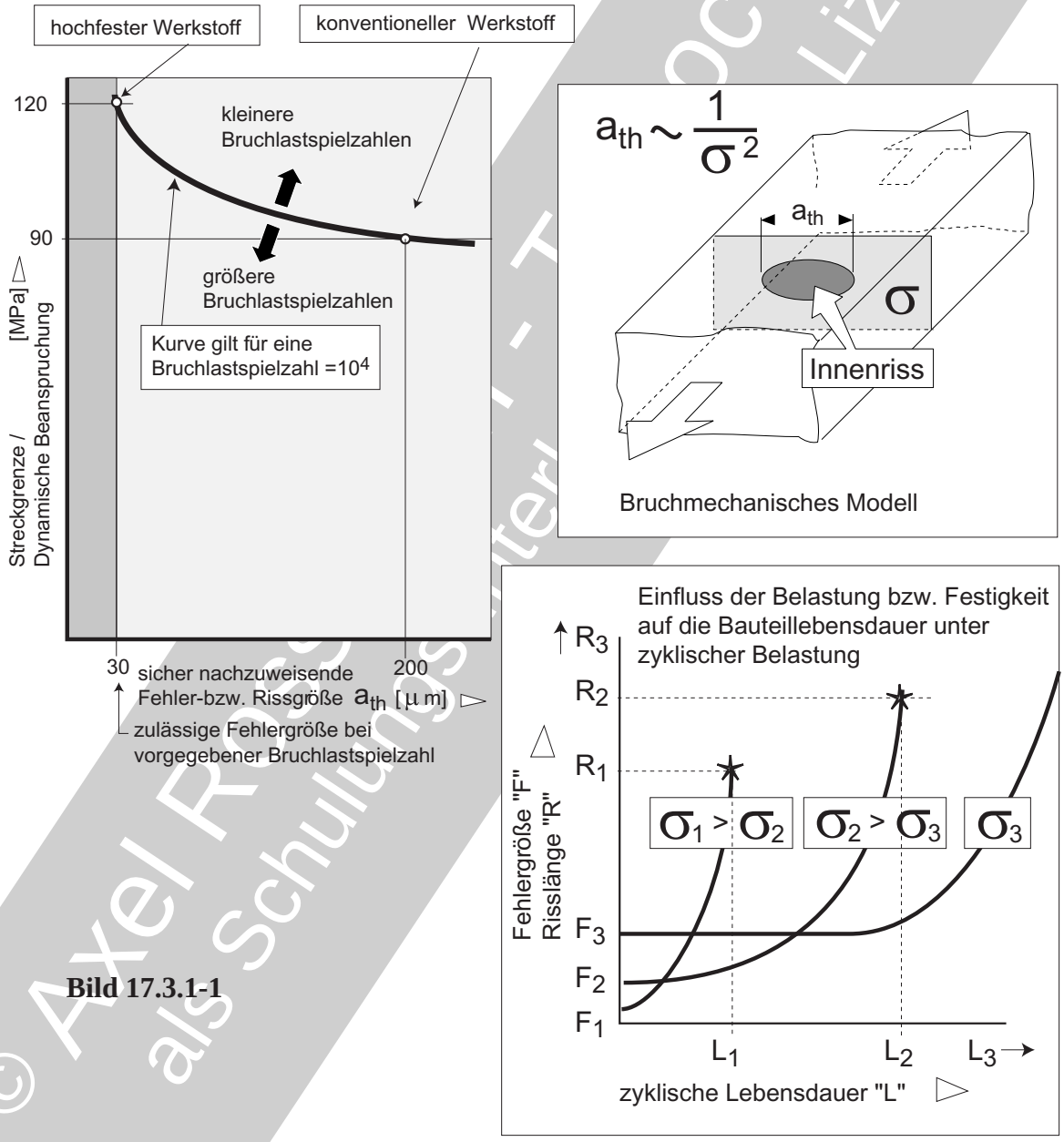


Bild 17.3.1-1

***Threshold**) in Abhängigkeit von einer dynamischen Belastung bis zur Streckgrenze. Kennzeichnende Lebensdauer sind 10^4 Lastspiele bis zum Bruch. In diesem bruchmechanisch abgeschätzten Beispiel (entsprechend Skizze rechts oben) dürfen Schwachstellen eine äquivalente Risslänge a_{th} nicht überschreiten. Die angewandte zerstörende Prüfung muss also größere Fehler mit ausreichender Sicherheit finden. Bei einer Spannung von 120 MPa beträgt a_c ca. 30 µ m. Für 90 MPa darf die Schwachstellengröße 200 µ m, d.h. bereits ein Vielfaches betragen.*

© Axel Ross als Schulungsunterlage - Tooconsult Lizenz

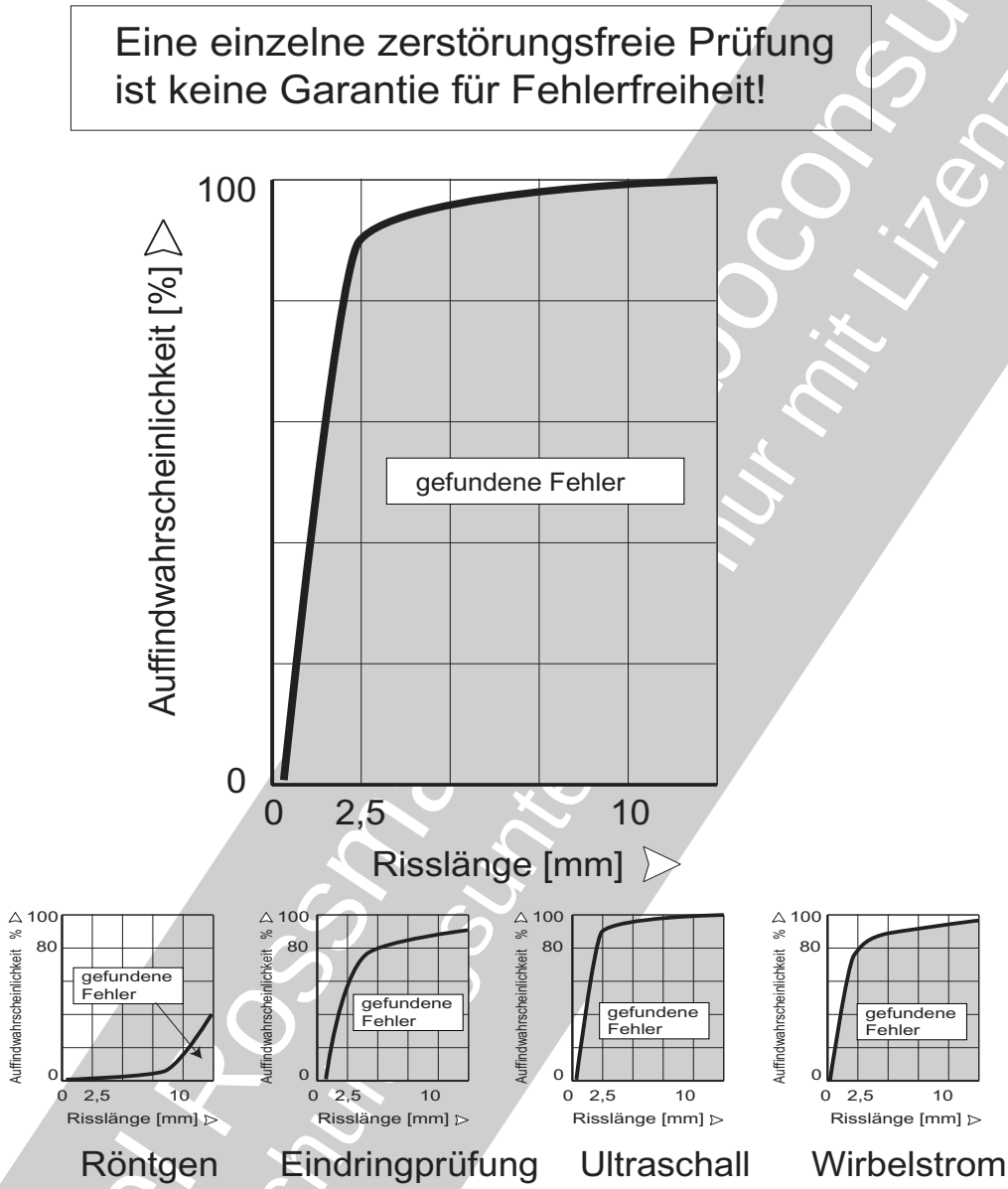


Bild 17.3.1-2 (Prüfungen an Bauteilen mit spanend bearbeiteten Oberflächen)

Bild 17.3.1-2 *(Lit. 17.3-4 und Lit. 17.3-8): Die Diagramme zeigen Trends der* ***Auffindwahrscheinlichkeit*** *(engl.* ***POD = Probability of Detection****) von Oberflächenanrissen. Sie lassen eine erste Einordnung der Zuverlässigkeit der häufigsten zerstörungsfreien Prüfmethoden (ZfP) im Serieneinsatz zu. Es handelt sich um Versuchsergebnisse an Proben aus Aluminium mit kleinen künstlichen Schwinganrissen. Generell gilt, dass sich die Rissgröße bzw. Risslänge und Risstiefe verfahrensspezifisch unterschiedlich auswirken. Eine POD von 100% ist offenbar nur in besonders günstigen Fällen zu erwarten. Das heißt, dass für hochbelastete Bauteile moderner Triebwerke* ***gefährliche Fehler im Millimeterbereich mit einer zerstörungsfreien Prüfung nicht absolut sicher auszuschließen sind*** *(Diagramm oben). Nur von einer Kombination mehrerer Maßnahmen wie unterschiedlichen ZfP, optimierten stabilen Fertigungsprozessen und Produktionsüberwachung sind die geforderten hohen Sicherheiten des Triebwerksbaus zu erwarten.*

Am „unzuverlässigsten“, was die POD kleiner Oberflächenrisse anbetrifft, hat sich im vorliegenden Fall die ***Röntgenprüfung*** *erwiesen*

© Axel Rossmann Bocconsult
als Schutzgesuntermittel nur mit Lizenz

Qualitätssicherung: Prüfverfahren

(Diagramm unten links). Die beste POD zeigte bei kleinen Oberflächenrissen die ***Ultraschallprüfung****.*

Weil die dargestellten Literaturangaben bereits älter sind, ist davon auszugehen, dass Ultraschall- und ***Wirbelstromprüfungen*** *mittlerweile Verbesserungen der Technik und der Auswertung erfahren haben. Besonders der Einsatz von Computern für die Auswertung dürfte die POD in einigen Fällen (Ultraschallprüfung, Wirbelstromprüfung) deutlich erhöht haben (Bild 17.3.1-3.2). Trotzdem ist auch hier bei Teilen ohne Befund nicht von absoluter Fehlerfreiheit auszugehen.*

Die POD hängt verfahrensspezifisch von einer Kombination unterschiedlicher Einflüsse ab (Bild 17.3.1-4). In einer Optimierung des Verfahrens für die jeweilige Anwendung sind diese Einflüsse zu berücksichtigen.

Bild 17.3.1-3.1 *(Lit. 17.3-7 und Lit. 17.3-9): In* ***Verschraubungsbohrungen*** *von Verdichterscheiben aus Stahl (Skizze) wurden LCF-Betriebsrisse festgestellt. Diese verliefen von den Bohrungskanten in radialer Richtung (Detail). Das Diagramm der Auffindwahrscheinlichkeit (POD) unterschiedlicher, seriengeeigneter ZfP-Verfahren über der Risslänge entspricht den Trends in Bild 17.3.1-2. Offenbar haben sich aber ca. 20 Jahre Verfahrensentwicklung ausgewirkt. Die* ***Wirbelstromprüfung****,* ***nun automatisiert****, weist die besten POD auf und ist in diesem Fall der Ultraschallprüfung deutlich überlegen. Die POD der magnetischen Rissprüfung und der Eindringprüfung sind am schlechtesten. Dass dies nicht nur auf die optische Erkennbarkeit der Anzeigen zurückzuführen ist, lässt sich aus der erstaunlich guten POD einer lichtoptischen Inspektion schließen.*

Merksatz:

Wird nach einer zerstörungsfreien Prüfung ein Fehler gefunden, bedeutet dies nicht unbedingt, dass der Fehler erst nach der Prüfung entstanden ist

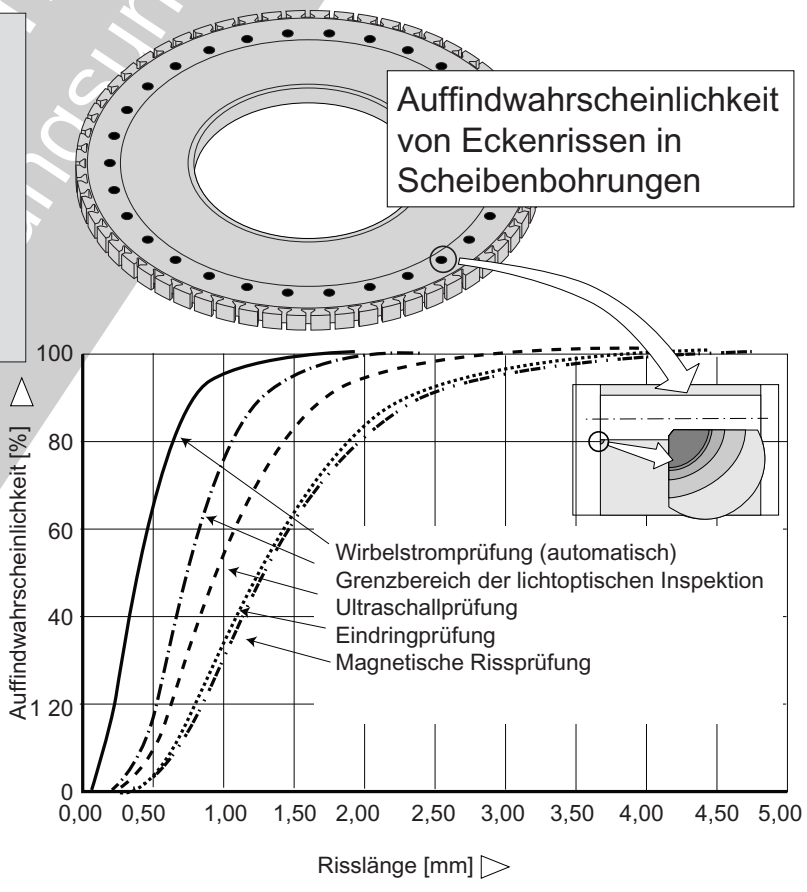


Bild 17.3.1-3.1

© Axel Schmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Die Korngröße beeinflusst die Fehlererkennbarkeit merklich und ist bei Werkstoffumstellungen in der Auslegung zu berücksichtigen.

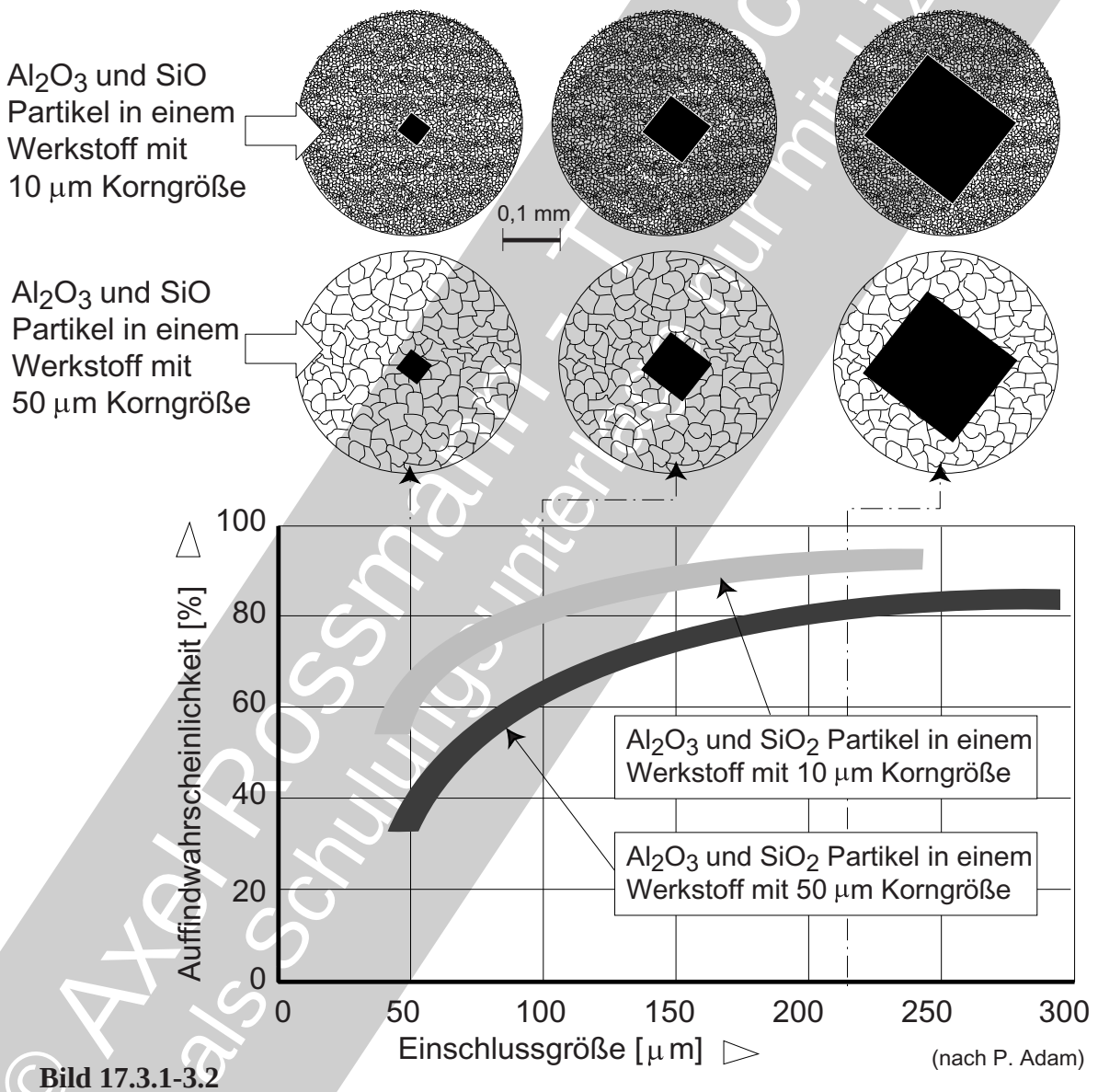


Bild 17.3.1-3.2

Bild 17.3.1-3.2 (Lit. 17.3.1-1): *Nicht zuletzt entscheiden die* ***Eigenschaften eines Fehlers und des Grundwerkstoffs (Matrix)*** *über seine Detektierbarkeit. Die nachfolgende Aufstellung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.*

Fehlerart:

*- **Gasporen** (Band 3, Bild 11.2-2.1,Bild 11.2-3, Bild 12.2.1.3.3-8.1 und Bild 12.2.1.3.3-8,2), **Lunker** (Band 3, Bild 11.1-7, Bild 11.2.-3 und Bild 11.3-8.1 und Bild)*

*- **Risse** (Band 3, Bild 11.2-2.1,und Bilder 12.2.1.3.1/-10/-11/-12/13/-14).*

© Axel Possmann - Technical Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

*- **Trennungen: Dopplungen** (Band 3, Bild 11.2-2.1, und 11.2.2.1-14), **Kaltschweißen** (Bild 11.2-2.1/-3), **Oxidhäute** (Bild 11.2-2.1 und Bild 11.2-5, **Schmiedefalten** (Bild 11.2.2-1), **Bindefehler** in Schweißungen (Band 3, Bild 12.2.1.3.1-8 und 12.2.1.3.3-2/-3)*
*- **Einschlüsse**: Keramische Partikel und Hartmetallpartikel (Werkzeugbruch) aus dem Erschmelzungs- und/oder Gießprozess (Band 3, Bild 11.2-2.1, Bild 11.2-12 und 11.2-13)*
*- **Seigerungen** aus dem Erschmelzungsprozess (Band 3, Bild 11.2-1, Bild 11.2.2.1-11, Bild 11.2.2.1-12, Bild 11.2.2.1-13 und Bild 11.3-12).*
*- **Gefügeabweichungen** (Band 3, Bild 11.1-4/-5 und Bild 11.2-16) wie „Hard- α“ in Titanlegierungen.(Bild 11.2.2.1-4)*

***Fehlergeometrie**:*

- Flächig (Trennungen), glatt oder zerklüftet.
- Scharfkantig (Riss, Einschluss) oder sphärisch glatt (Gaspore).
- Geschlossen, z.B. unter Einwirkung von Druckspannungen oder nach außen offen.
- Gezackter Verlauf (Riss)
- Größe/Ausdehnung des Fehlers
- Volumen des Fehlers, auch im Verhältnis zum Querschnitt des Bauteils.
- Zur Oberfläche geschlossen oder offen

***Fehlerlage, Bauteilgeometrie** und **-topografie**: Im Bauteil und/oder zur „Detektierungsrichtung“.*

- Verlauf in Ecken
- Tiefe unter der Oberfläche
- An der Oberfläche
- Längs der Detektierung (Riss beim Röntgen) oder quer.
- Hohles Bauteil.
- Wandstärken bzw. Querschnitte
- Zugänglichkeit mit Detektoren
- Rauigkeit der Oberfläche

***Fehlereigenschaften**:*

- Magnetisches Verhalten
- Elektrische Leitfähigkeit
- Elastische Eigenschaften
- Wärmeleitfähigkeit.

***Eigenschaften des Grundwerkstoffs** (Matrix):*

- Magnetisches Verhalten
- Homogenität
- Korngröße und Verteilung
- Kornorientierung, Textur, „Faserrichtung“.
- Elastische Eigenschaften
- Werkstofftypische Schwachstellen

*Die Details oben zeigen schematisch die Größe von keramischen Fehlstellen im Gefüge eines PM-Werkstoffs. Diese Fehler wurden künstlich in Proben eingebracht, um die Auffindwahrscheinlichkeit (POD, Bild 17.3.1-2) zu ermitteln. Das Diagramm zeigt deutlich, dass sich die **POD mit steigender Korngröße verschlechtert**. Diese Erkenntnis ist von fundamentaler Bedeutung für die Sicherheit höchstbelasteter Bauteile wie Rotorscheiben. Bei einer Umstellung des Werkstoffs und/oder der Rohteilherstellung (z.B. Umschmelzen, Schmieden) ist zu überprüfen, ob sich das Gefüge so verändert hat, dass die Auffindwahrscheinlichkeit leidet. In diesem Fall ist von größeren Schwachstellen, d.h. nicht ausreichend sicher detektierbaren Fehlern im Bauteil, auszugehen. Diese können wachstumsfähiger als bisher angenommen sein. Ist das in der Auslegung nicht berücksichtigt, kann das die Bauteillebensdauer gefährlich verkürzen.*

Merksatz:

Auch scheinbar **kleine Abweichungen** in der Rohteilherstellung können die **Bauteillebensdauer gefährlich reduzieren**. Deshalb sind solche Veränderungen abzusichern. Hierzu gehört der Nachweis einer **ausreichenden Auffindwahrscheinlichkeit**.

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 17.3.1-4: *Die serientauglichen zerstörungsfreien* ***Standard-Prüfverfahren haben individuelle Stärken und Schwächen*** *(Lit. 17.3-4). Diese sind vom Funktionsprinzip des jeweiligen Verfahrens bestimmt und für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens von großer Bedeutung. Sie sollen im Folgenden kurz beschrieben werden:*

Visuelle Prüfung:
Positiv: *Das preiswerte und einfache Verfahren erkennt Oberflächenfehler auch an komplexen Konturen wie Kanten. Dokumentation mit Fotografie ist möglich. Erstaunlich gute Auffindwahrscheinlichkeit (=POD) ist möglich (Bild 17.3.1-3). Auf Fehlstellen weisen Effekte wie Verfärbungen oder Topografiebesonderheiten hin.*
Negativ: *Stark von menschlichen Einflüssen abhängig. Keine Automatisierung. Befund überdeckt von nachträglichen Veränderungen (Bearbeitung). Eingeschränkt geeignet für schlecht einsehbare Bauteilzonen wie Bohrungen und Scheibenoberflächen in integralen Rotoren (Bild 18.6-6).*

Eindringprüfung *(engl. Liquid Penetrant Inspection, Fluorescent Penetrant Inspection):*
Positiv: *In günstigen Fällen hohe POD (vergleiche Bild 17.3.1-2 mit Bild 17.2.3-3.2). Relativ einfaches und preiswertes Verfahren. Prüft die gesamte zugängliche Bauteiloberfläche.*
Negativ: *Nur für Fehler die zur Oberfläche hin offen sind anwendbar. POD stark abhängig vom Oberflächenzustand. Wenn Eindringstoff an der Oberfläche zurückbleibt, kommt es zur* ***Hintergrundfluoreszenz****. Diese überdeckt die Fehleranzeigen. Eine solche Situation tritt ein, bei*
- zu großer Rauigkeit,
- Porosität,
- Verschmutzung (z.B. Beladung mit Strahlmittel, Band 3, Bild 12.2.1.6-11) oder Oxidschichten.
Auch eine verschlechterte Benetzung, z.B. durch silikonhaltige Verunreinigungen (Band 3, Bild 12.2.1.7-3 und Bild 17.3.1-8), lässt an der vorausgesetzten POD zweifeln.
Werden Risse bei der Entstehung nachträglich an der Oberfläche verschmiert oder zugedrückt, ist das Funktionsprinzip der Prüfung beeinträchtigt. Typische Beispiele sind Schleifrisse (Band 3, Kapitel 12.2.1.1), Fehlstellen im Bereich von zerspanten Flächen oder kugelgestrahlte Zonen (z.B. Schließen von Porosität bei Gussteilen). Weisen Bauteile hohe Makrodruckeigenspannungen auf (z.B. in vorgeschleuderten Schmiedescheiben, Band 1, Bild 5.4.1.1-9), können induzierte Druckeigenspannungen die Rissufer derart zusammendrücken, dass das Prüföl nicht mehr eindringt.
Sind Risse mit Korrosionsprodukten oder Oxiden gefüllt, ist ein Nachweis erschwert, häufig nicht möglich. Eine solche Situation kann z.B. bei interkristallinem Korrosionsangriff in Ätzbädern vorliegen.
Sind Risse mit geringer Tiefe zur Oberfläche weit geöffnet, kann der Eindringstoff beim Spülen ausgewaschen werden. Eine Anzeige tritt dann nicht mehr auf.

Ultraschallprüfung *(engl.* ***Ultrasonic Inspection****):*
Positiv: *Im günstigen Fall hat das Verfahren eine hohe Nachweissicherheit (vergleiche Bild 17.3.1-2 und Bild 17.3.1-3). Es ist für alle homogene Werkstoffe nutzbar. Der Nachweis innerer Fehlstellen sowie die Bestimmung von deren Größe und Lage ist möglich. Auch Fehlstellen aus Fremdmaterial wie Werkstoffverunreinigungen (Seigerungen) sind nachweisbar. Das Verfahren ist automatisierbar (Bild 17.3.1-2).*
Negativ: *Komplexe Bauteilkonturen schränken die Anwendung ein. Gegebenfalls ist eine „Ultraschallkontur" vor der Endbearbeitung erforderlich. „Ankoppelung" des Schallkopfs konturabhängig.*
Flache Fehlstellen an der Bauteiloberfläche (im Nahfeld) nicht nachweisbar. Besondere Fehlerlagen im Bauteil erfordern eine angepasste Prüfkonfiguration (Band 3 Bild 11.2.2.1-12). Fehler in nicht erwarteten Lagen können

© Axel Rossmann - Turbopersult
Abschnittsunterlagen Prüftechnik

*möglicherweise nicht erkannt werden („**Blind Spots**“, Bild 11.2.2.1-6).*
***Gefügeinhomogenitäten** können die POD wegen der Streuung des Signals entscheidend beeinträchtigen („**Gras**“ in der Anzeige). Das für Feingussteile (z.B. integrale Turbinenräder von Kleingasturbinen) typische Grobkorn (Bild 11.1-2), lässt eine der hohen Bauteilbelastung angemessene POD nicht zu.*
*Bewegt man sich im Bereich genutzter extrem hoher Werkstofffestigkeiten, kann bereits die gegenüber einem sehr feinkörnigen pulvermetallurgischen Werkstoff etwas grobkörnigere Schmiedevariante die erforderliche POD nicht mehr ermöglichen (Bild 17.3.1-1). Damit würde eine solche, **scheinbar risikolose Materialumstellung ausgeschlossen**.*
Poröse bzw. inhomogene Werkstoffe wie thermische Spritzschichten sind mit Ultraschall nicht prüfbar.

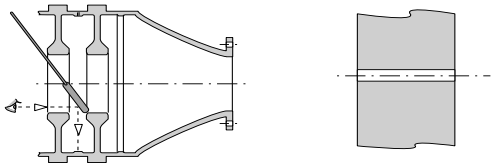
***Röntgenprüfung** (engl. **X-Ray Inspection**):*
***Positiv:** Das Verfahren ist unabhängig von der Beschaffenheit (Rauigkeit, Verschmutzung) üblicher Fertigungsoberflächen. Der **Nachweis innerer Fehlstellen** ist möglich. Neben klaffenden Fehlstellen (Risse, Poren) sind auch Verunreinigungen nachweisbar, welche die Strahlen anders schwächen als das Grundmaterial. Hierzu gehören keramische Einschlüsse wie Kernrückstände (Bild 11.2-2.1) oder in Kühlluftbohrungen verbliebenes Strahlmittel (Band 3, Bild 12.2.1.6-18). Das Verfahren ist auch bei grobkörnigen Werkstoffen wie Ni-Guss anwendbar. Es zeigt Poren- bzw. Lunkerfelder in Gussteilen (Bild 11.1-7) und Schweißungen (Band 3, Bild 12.2.1.3-19) bewertbar an. Mit dem Einsatz des **Mikrofokus Verfahrens** (engl. **X-Ray Micro Focus**) ist mit der erforderlichen Zugänglichkeit (Röntgenfoto) eine ca. 20-fache Vergrößerung erzielbar. Damit lassen sich auch sehr kleine Fehlstellen wie „Lagenlunker“ in Schaufelwänden (Lit. 17.3-1, Band 3, Bild 11.2-13) nachweisen. Das Verfahren ermöglicht die fotografische Langzeit-Dokumentation des Befunds.*
***Negativ:** Voraussetzung für die Fehlererkennbarkeit sind **ausreichend große Absorptionsunterschiede für die Röntgenstrahlen**. Damit ist die erkennbare Fehlergröße von der Schwächung des Durchdringungsquerschnitts abhängig. Je dünner der Querschnitt oder die Wand, umso kleinere Fehler lassen sich erkennen. Die Fehlerlage und Form sollte dem Röntgenstrahl den ungehinderten Durchtritt ermöglichen. Also sind quer zur Strahlrichtung und/oder gezackt verlaufende geschlossene Risse schlecht nachzuweisen. Weil das Verfahrensprinzip am Strahlaustritt einen Fotofilm benötigt, ist die Zugänglichkeit eine Voraussetzung für eine gute POD.*
Ausgeprägte Werkstoffinhomogenitäten wie Grobkorn in Gussteilen kann den Strahl so stark streuen, dass die POD zu niedrig liegt, um kleine Fehlstellen nachzuweisen.

***Magnetische Rissprüfung** (Magnetpulver Prüfung, engl. **Magnetic Particle Inspection**):*
***Positiv:** Einfaches, schnelles und preisgünstiges Verfahren zur Erkennung von **Oberflächenrissen an Bauteilen aus magnetischen Werkstoffen**. Zeigt auch **oberflächennahe unmagnetische Werkstoffverunreinigungen**. Risse unter einer ausreichend dünnen unmagnetischen Beschichtung (z.B. galvanischen Cr-Schicht) sind in magnetischen Werkstoffen nachweisbar (Band 3, Bild 12.2.1.8-3).*
***Negativ:** Fehler an Innenkanten wie in Vielkeilwellen werden von der Störung des Felds überdeckt (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-11). Keine Prüfung an nicht ausreichend einsehbaren Flächen. Nicht anwendbar bei unmagnetischen Werkstoffen oder Bauteilen mit zu dicken unmagnetischen Beschichtungen. Ungeeignet für schlecht magnetisierbare Bauteilzonen wie zu kleine Bohrungen. Dokumentierbarkeit des Befunds eingeschränkt.*
*Erfolgt die notwendige **Entmagnetisierung** nach der Magnetprüfung nicht oder nicht ausreichend, kann dies zu potenziell schädigenden Effekten führen. Hierzu gehört die **Ansammlung** magnetischer **Späne** auf Gleit- und Wälzflächen. Typische gefährdete*

© Klein, Bamann - Tutorium - das Lösungsunterlagenunternehmen

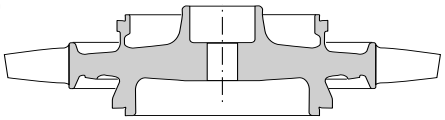
Typische negative und einschränkende Einflüsse auf die Effektivität zerstörungsfreier Prüfverfahren.

Visuelle Prüfung:
- schlechte visuelle Zugänglichkeit
- störende optische Effekte wie spiegelnde Oberflächen, Riefen, Kanten
- zu kleine Fehler

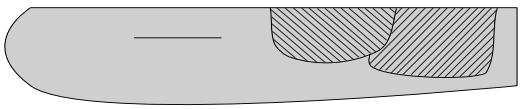


Eindringprüfung:
- Ungenügende Oberflächenqualität, Porosität, Rauigkeit (Hintergrundfluoreszenz)
- Verunreinigungen
- schlechte Sichtverhältnisse
- klaffende Risse
- zugedrückte bzw. klemmende Risse

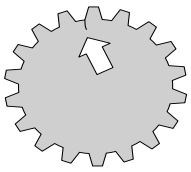
Ultraschall:
- Bauteilkontur, häufig Fertigkonturen ("Blind Spots")
- Gefüge (Inhomogenität, Grobkorn), Störungen ("Gras")
- Kleiner Oberflächenabstand
- ungünstige Fehlerlage
- ungünstige Fehlerform



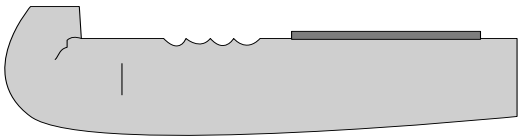
Röntgen:
- Fehlerlage bzw. zu geringe Schwächung des Prüfquerschnitts
- Gefügeinhomogenitäten (z.B. Beugungseffekte)
- schlechte Zugänglichkeit zur optimalen Filmposition



Magnetische Rissprüfung:
- Unmagnetische Werkstoffe und Bauteilpartien (z.B. unmagnetische Beschichtungen)
- Ungünstige Fehlerlagen, z.B. an Kanten und in Ecken
- schlecht magnetisierbare Bauteilzonen



Wirbelstrom:
- Gefügeinhomogenitäten
- Oberflächenrauigkeit
- zu großer Abstand von der Oberfläche
- ungünstige Bauteilkontur, nicht ausreichende Zugänglichkeit
- Beschichtungen
- Fehlerlage



*Bauteile sind **Wälzlager** und **Zahnräder** sowie gleitende Teile (z.B. Steuerkolben in Reglern). Weiterhin besteht der Verdacht, dass **rotierende Magnetfelder** solcher Bauteile Ströme erzeugen, die im Extremfall **elektronische Geräte** wie Regler **stören** oder **Oberflächen durch kleine Funken schädigen**.*

***Wirbelstromprüfung** (engl. **Eddy Current Inspection**):*
***Positiv:** Hoch empfindliches, automatisierbares und kontinuierlich dokumentierbares Verfahren mit hervorragender POD (Bild 17.3.1-2 und Bild 17.3.1-3). Anwendbar bei elektrisch leitenden Werkstoffen. Gut geeignet für **oberflächennahe Fehler**. Es kann sich dabei um Trennungen, aber auch kleine me-*

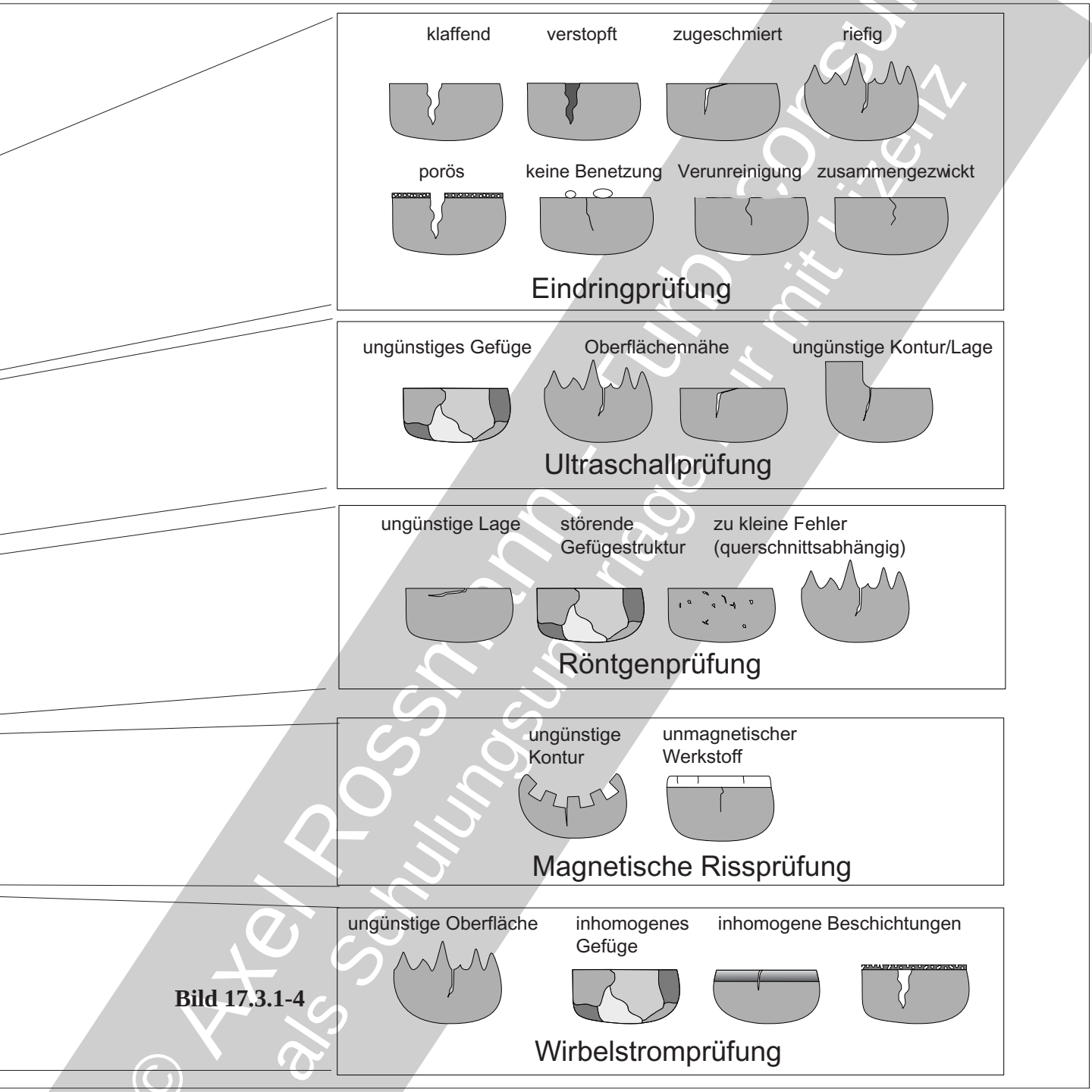


Bild 17.3.1-4

tallische oder nichtmetallische Einschlüsse (Band 3, Bild 12.2.2.5-5) und Inhomogenitäten handeln. Gut geeignet für die Prüfung von Bohrungen (Bild 17.3.1-3).

Negativ: *Reagiert auf kleine Oberflächenänderungen. Selbst für den Fachmann ist dann eine Signalbewertung schwierig. So können sich bereits zulässige Abweichungen der Rauigkeit oder Gefügeinhomogenitäten bermerkbar machen. Das Verfahren arbeitet in einer relativ dünnen Oberflächenzone. Tiefer liegende Fehler werden nicht angezeigt. Die Wirbelstromsonden müssen der Bauteilkontur angepasst sein und dieser nachgeführt werden. Damit kann eine umfangreiche und aufwändige Verfahrensadaption verbunden sein. Beschichtungen verhindern den Einsatz des Ver-*

© Axel Rossmann - Raubconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bei ungeeigneter Anwendung scheitert auch die beste zerstörungsfreie Prüfung.

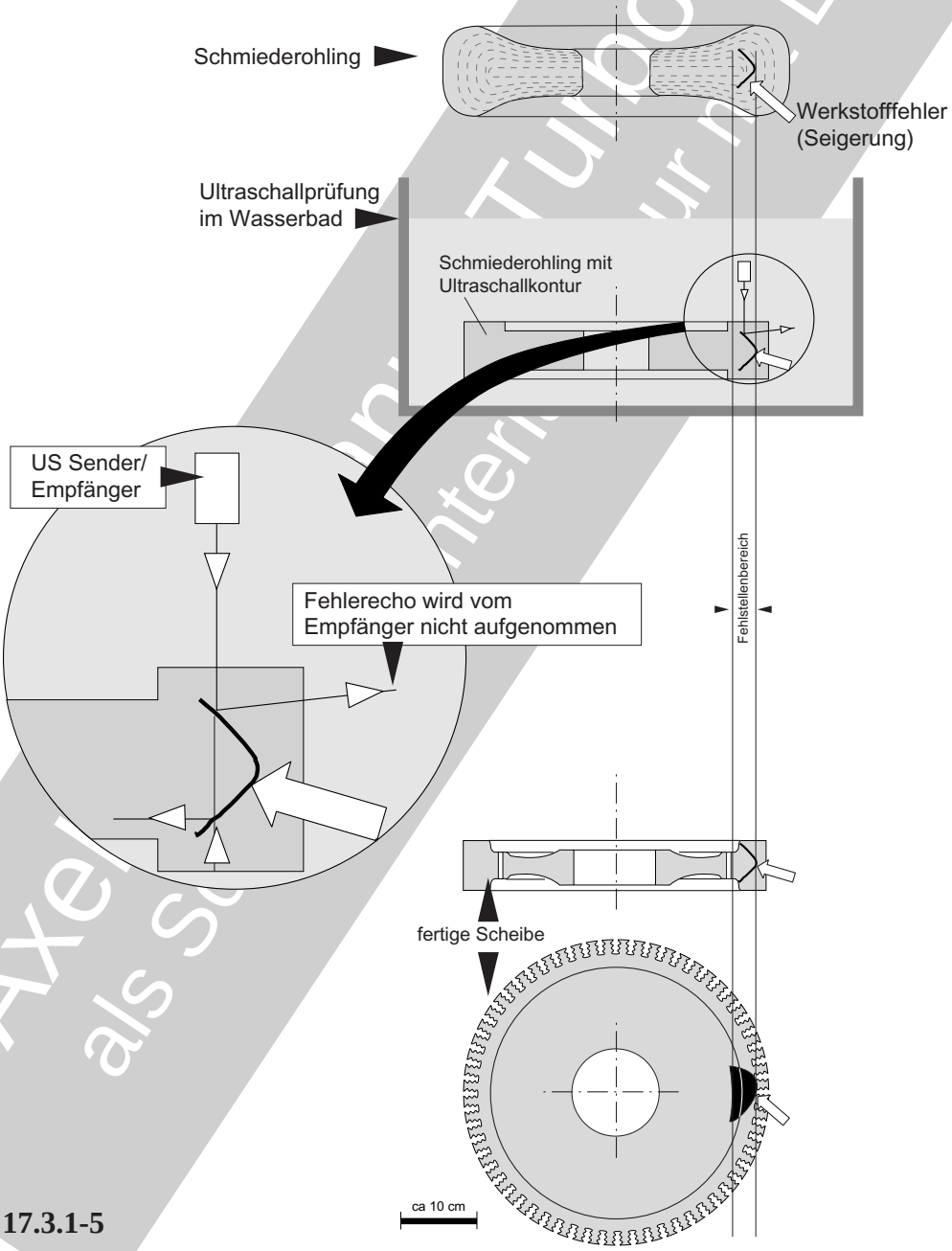


Bild 17.3.1-5

fahrens für den Grundwerkstoff. Schichten selbst müssen ausreichend homogen und elektrisch leitend sein, um eine Prüfung zu ermöglichen.

Bild 17.3.1-5: *Die dargestellte Situation der* ***Ultraschallprüfung des Schmiederohlings einer Turbinenscheibe*** *in* ***Ultraschallkontur*** *führte zum Scheibenbruch im Triebwerk (Bild 11.2-22). Das Prüfverfahren (Ultraschall = US) war nicht auf die Geometrie der, für den Fachmann eigentlich zu erwartenden, Fehlstelle abgestimmt. Die gekrümmte Form und die Lage im Kranzbereich (Skizze oben) war für den Gießprozess des Vormaterials (Entstehung der Seigerung) und der Schmiedeumformung typisch (Bild 11.2-11). In diesem Fall befanden sich US-Sender und Empfänger im selben Prüfkopf (Detail Mitte). Das am flächigen Fehler schräg reflektierte Echo konnte den Empfänger nicht erreichen.So wurde diese mehrere Quadratzentimeter große Fehlstelle (Seigerung) nicht erkannt. Eine Optimierung des Prüfverfahrens (US-Sender und Empfänger gegenüberliegend) garantierte die erforderliche Auffindwahrscheinlichkeit.*

Bauteilspezifische Auswahl, Anpassung und Optimierung eines Verfahrens *ist eine interdisziplinäre Aufgabe und erfordert viel Fachwissen. Zu berücksichtigen sind insbesondere:*

- ***Werkstoff:*** *Gefügemerkmale wie Korngröße und Inhomogenität (Ultraschallprüfung). Magnetisches Verhalten. Absorption von Röntgenstrahlen. Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität (Thermografie). Elektrische Leitfähigkeit (Wirbelstromprüfung). Typische zu erwartende Fehler aus Rohteil- bzw. Halbzeugherstellung und der zur Anwendung kommenden Fertigungsprozesse (z.B. Neigung zu Schleifrissen, .*

- ***Nachzuweisende Fehlerart:*** *Oberflächenfehler, Volumenfehler, Trennung (Riss, Dopplung/Schmiedefalte), Schrumpf- und Gasporen. Nichtmetallische Einschlüsse wie Seigerungen und Karbide. u.s.w.*

- ***Zu erwartende Fehlerlage:*** *Oberfläche, innen, an Materialanhäufungen (z.B. Scheibennabe), in dünnen Querschnitten (z.B. Wand eines hohlen Schaufelblatts), in Außen- oder Innenkanten, Bohrungen. In Bauteilzonen die mit einem bestimmten Prozess behandelt bzw. bearbeitet wurden (z.B. Schleifrisse an geschliffenen Tannenbaumfüßen, usw.)*

- ***Fehlergeometrie und Größe:*** *Eben, sphärisch gekrümmt, kugelig, Größe an der Nachweisgrenze u.s.w.*

- ***Geforderte Mindest-Auffindwahrscheinlichkeit*** *(POD): Ist abhängig von der Belastung der Bauteilzone und der geforderten Ausfallsicherheit.*

- ***Bauteilgeometrie:*** *Zugänglichkeit (z.B. visuell/fotografisch, mit verfahrensnotwendigen Sonden). Beeinträchtigung der Fehlererkennbarkeit (z.B. in Nuten von Vielkeilwellen). „Ultraschallkontur."*

- ***Hochbeanspruchte, die Lebensdauer bestimmende Bauteilzonen*** *mit besonders hohen Qualitätsansprüchen müssen bekannt sein. Hierzu gehört auch die der Auslegung zu Grunde gelegten max. zulässigen Fehlstellen (z.B. Nabenbereich und um Bohrungen von Scheiben, Schaufelfüße).*

- ***Einflüsse von Fertigungs- bzw. Bearbeitungsprozessen:*** *Verschmieren oder Zuhämmern von Poren und Rissen (Kugelstrahlen, Oxidstrahlen). Abdeckung von Fehlstellen durch Beschichtungen, Oxidation u.s.w. Eventuell notwendige Vorbehandlung des zu prüfenden Bauteiles um z.B. Verschmierungen zu öffnen (Thermozyklus, Ätzen, Bild 13.3.1-7).*

Merke:

Für Auswahl und Anpassung eines Prüfverfahrens ist neben der profunden Kenntnis der Prüfverfahren viel Fachwissen aus verschiedensten Disziplinen notwendig.

© Kloss, Thomas: Auszug aus Unterlagen zum Lehrgang Technische Redaktion

Die für eine Qualitätssicherung günstige Gestaltung einer Konstruktion ist manchmal schwierig aber notwendig.

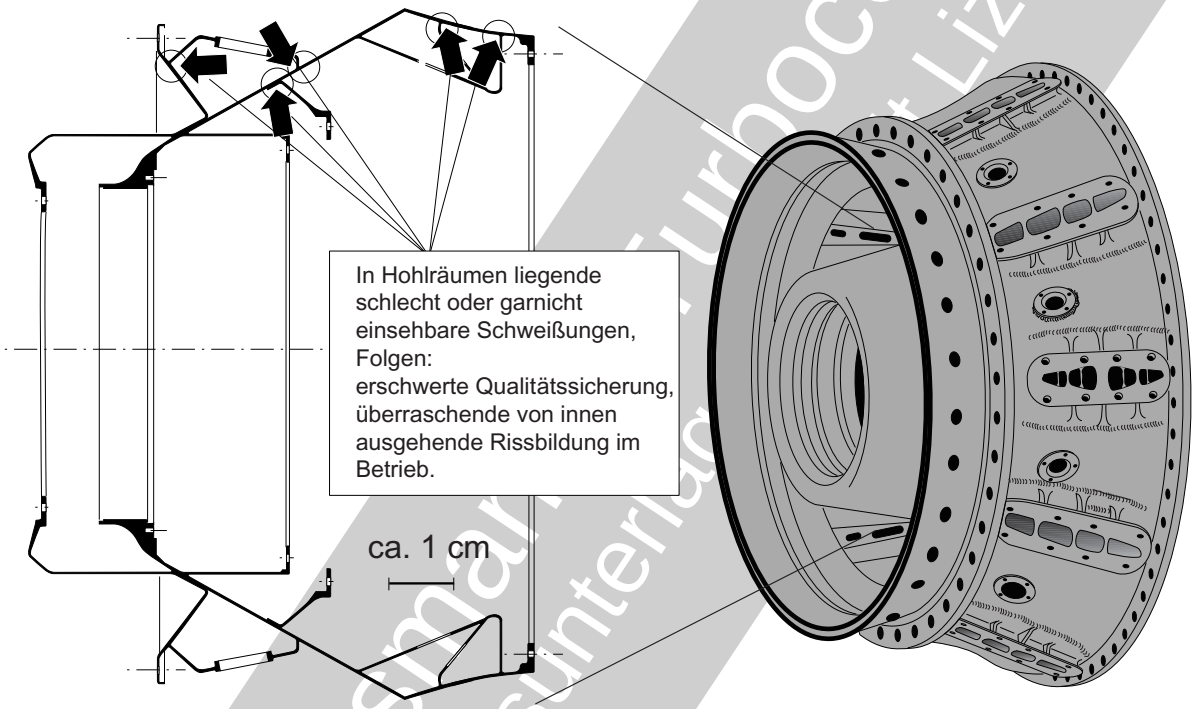


Bild 17.3.1-6

Bild 17.3.1-6: Bereits der Konstrukteur ist in besonderem Maß für die machbare Qualität eines Bauteils verantwortlich*. So hängt es von der Auswahl der Fertigungsverfahren ab (z.B. Schweißkonstruktion oder integrales Gussteil) welche Prüfverfahren zum Einsatz kommen und welche Grenzen diesen vom Bauteil gesetzt sind. Beispiele sind optisch nicht, oder nur sehr schlecht zugängliche, für Ultraschallprüfung ungeeignete Konturen und/oder mit Röntgen nur schwer erreichbare hochbelastete Bauteilzonen. Ein typisches Beispiel ist die Wurzel einer Schweißnaht (Gehäusedetail in Skizze links, Reibschweißung eines Rotors in Band 3, Bild 12.2.2.6-6). Bei schlechter Prüfbarkeit können solche Verfahren bereits ein vorgegebenes „Qualitätsrisiko“ darstellen.*

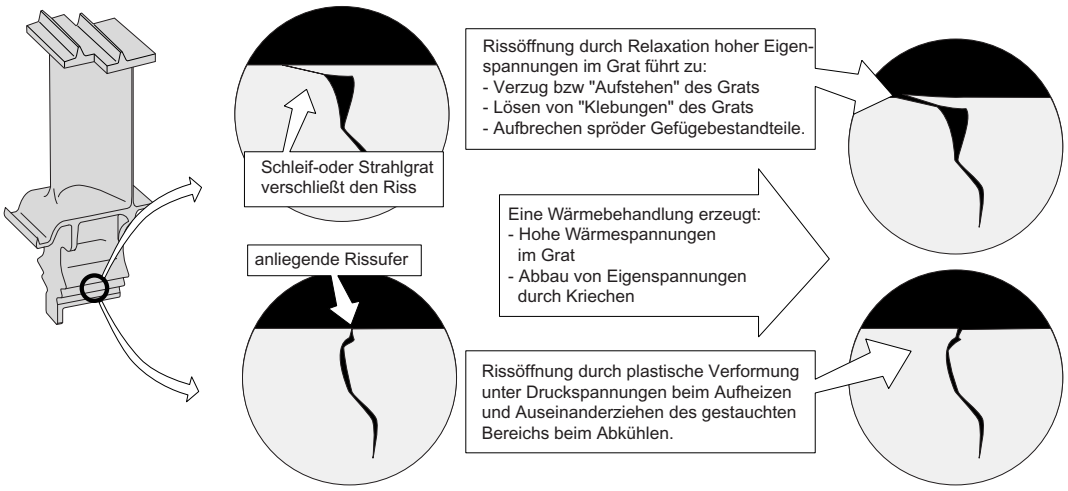
Bild 17.3.1-7: *Das Prinzip der* ***Eindringprüfung*** *verlangt eine zur Oberfläche hin ausreichend geöffnete Fehlstelle. Einige Fertigungsverfahren wie Zerspanung und Strahlprozesse (Kugelstrahlen, Abrasivstrahlen) können Risse so zudrücken oder verschmieren, dass die Auffindwahrscheinlichkeit deutlich beeinträchtigt wird. Auch Fremdmaterial wie Schneidöl, Prozessbäder und Feuchtigkeit können in Rissen ein ausreichendes Eindringen des Prüföls verhindern. Wurde das Bauteil unter Sauerstoffzutritt (z.B. an Luft) erhitzt, können sich in Rissen Oxide bilden, die den Rissprüfbefund beeinträchtigen. Diese Effekte lassen sich erfahrungsgemäß mit einer Behandlung des Bauteils vor der Rissprüfung entschärfen. Es handelt sich in erster Line um drei Verfahren:*

Fortsetzung auf Seite 17.3-16

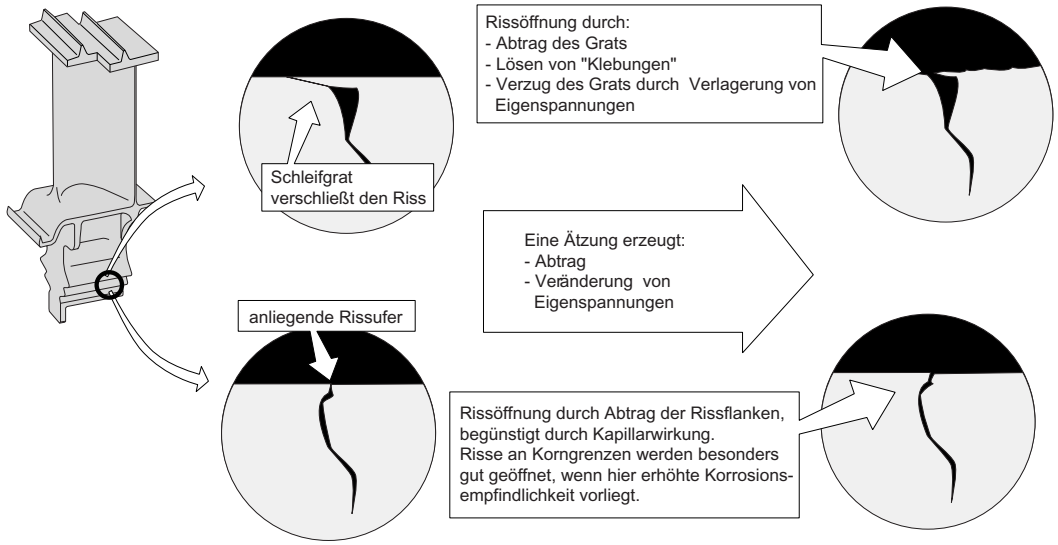
© Axel Possmann Turboconsult als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Qualitätssicherung: Prüfverfahren

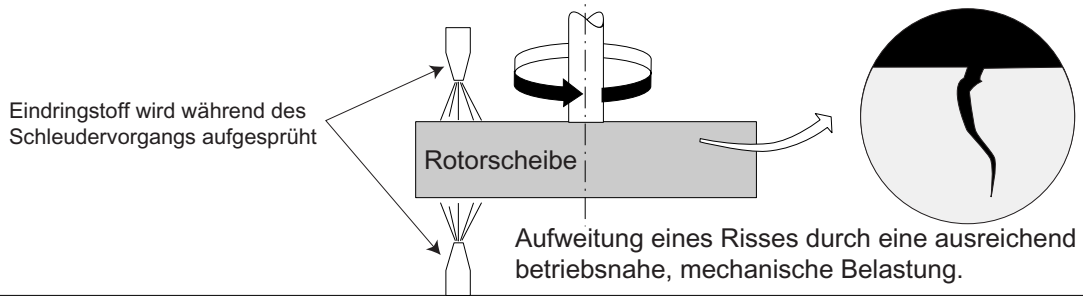
Vor oder bei der Eindringprüfung ist ein geeignetes Öffnen der Risse für den Nachweis von entscheidender Bedeutung.



Die Erfahrung lehrt: Zugeschmierte Risse lassen sich besser auffinden wenn vor der Eindringprüfung ein Wärmebehandlungszyklus erfolgte.



Geschlossene Risse lassen sich durch eine Ätzung öffnen. Diese kann jedoch den Grundwerkstoff schädigen und durch Hintergrundfluoreszenz die Erkennbarkeit beeinträchtigen.



Aufweitung eines Risses durch eine ausreichend betriebsnahe, mechanische Belastung.

Bild 17.3.1-7

Fortsetzung von Seite 17.3-14

*Einen **Temperaturzyklus,** der Ni-Legierungen etwa in den Bereich der Aushärtung (ca. 800°C) erwärmt (Skizze oben). Zwei Effekte scheinen dabei für die Rissöffnung in erster Linie wirksam:*
*Es liegt nahe, dass **Grate unter hohen Eigenspannungen** durch plastische Verformungen beim Fertigungsprozess (z.B. Zerspanung) stehen. Die **Lösung solcher Eigenspannungen** infolge Relaxation führt zu deren Verzug und „**Aufstehen**“ (Skizze oben, obere Details).*
***Stauchen der Grate** infolge der **Wärmespannungen** einer schnellen Aufheizung. Sie beruht auf dem dünnen Querschnitt und der schlechteren Wärmeabfuhr des Grats (Rahmen oben, untere Details).*
Eine zweite Möglichkeit ist eine Ätzung. Auch sie kann auf doppelte Weise wirksam werden: Von einer plastischen Verformung angepresste Grate weisen als Folge der Rückfederung Druckeigenspannungen an der „Oberflächenseite“ auf (Band 3, Bild 12.2.2.5-13). Der gute Ätzmittelzutritt wirkt hier besonders abtragend. Dabei lösen sich die Druckspannungen und es kommt zum „Aufstehen“ (Verzug) des Grats (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-5, Lit. 12.2.1.8-16) und einer Rissöffnung (Rahmen unten, obere Details).
Zusätzlich dürfte eine Rissöffnung durch den Abtrag der dünnen Gratquerschnitte und der oberflächennahen Rissufer (Rahmen unten, Details unten) die Prüfbarkeit unterstützen.
*Seltener wird die **mechanische Aufweitung** zur Öffnung von Rissen genutzt. Sie bietet sich für rotierende Scheiben und Ringe durch einen Schleudervorgang an (Rahmen unten). Hier ist es am ehesten möglich, **in allen lebensdauerrelevanten Bauteilzonen ausreichend hohe Spannungen zu erzeugen,** um eine Rissöffnung zu gewährleisten. Während des **Schleuderns** des Bauteils wird Eindringstoff aufgesprüht. Der Entwicklungsvorgang und die Auswertung erfolgen dann wie üblich am ruhenden Teil.*

***Bild 17.3.1-8:** Das Problem ist das plötzliche, einer Seuche ähnliche Auftreten schlecht auswertbarer eindringgeprüfter Oberflächen.*
*Diese „Seuche“ kann sich auf unterschiedliche Art ankündigen. Zuerst ist die Oberfläche mancher Teile unter der UV-Lampe ganz oder teilweise grün fluoreszierend. Es handelt sich offenbar um eine sog. „**Hintergrundfluoreszenz**“. Sie verhindert, dass ein Riss erkannt wird, weil dieser ebenfalls grün leuchtet, nun aber wegen des fehlenden Kontrasts nicht mehr auswertbar ist.*
*Es kann auch der gänzlich andere Fall auftreten, dass der Eindringstoff, dessen Funktion von der Benetzung der Oberfläche lebt, **plötzlich abperlt**, als ob die Bauteiloberfläche frisch eingefettet wäre. Nun erscheint die Oberfläche unter dem UV-Licht metallisch blank, d.h. dunkelviolett, ohne jede Fehlstelle. Ein solches Bild ist verdächtig. Es erscheint nicht mehr sicher, ob nicht doch ein Riss vorhanden ist, in den das Prüföl aber nicht eindringen konnte. Üblicherweise wird diesem Effekt mit einem **intensiven manuellen Reinigen** entgegengewirkt. Dies muss erfahrungsgemäß durchaus mehrmals vorgenommen werden. Es gestaltet sich daher sehr **zeit- und kostenintensiv, ganz zu schweigen von der allgemeinen Verunsicherung**.*
*Üblicherweise sind die beschriebenen Effekte auf Oberflächenverunreinigungen aus dem Fertigungsprozess zurückzuführen (Band 3, Bild 12.2.1.7-2). Es geht deshalb zuerst darum, das verursachende Medium zu identifizieren. Zuerst sind alle Reinigungsbäder, insbesondere die in der Rissprüfung, auf Verunreinigungen zu überprüfen. Diese können sich auf der Badoberfläche als dünner Film angesammelt haben. Jedes eingetauchte Teil wird beim Herausziehen mit diesem Film überzogen (Detail unten), der sich mit dem Rissprüfmitttel nicht verträgt. In vielen Fällen handelt es sich um **Silikonverbindungen wie Silikonöl**. Der Effekt ist von den Windschutzscheiben der PKW bekannt, trotz sauberer Wischer bilden sich lästige Schlieren.*

© AMEPosseckert - Technologietransfer
Lizenzunterlage nur mit Lizenz

Verunreinigungen auf Entfettungsbädern können die Rissprüfung sehr erschweren.

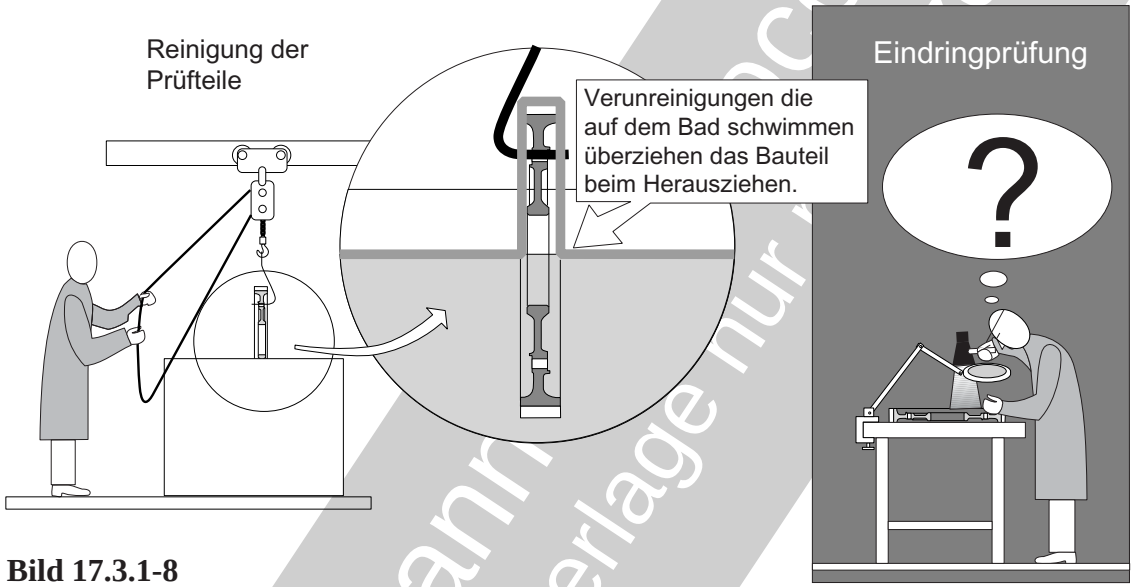


Bild 17.3.1-8

Silikonöle kommen, wenn nicht strikt verboten, immer wieder in der Fertigung zur Anwendung. Sie treten als ***Entschäumungsmittel*** *in Kühlschmierstoffen oder als* ***Trennmittel*** *in Formen (z.B. für FVK-Teile) auf. Dieses Silikonöl wird von den Werkstücken in die Reinigungsbäder getragen. Es wird zwar wie erwünscht abgewaschen, sammelt sich aber auf dem Bad (Band 3, Bild 12.2.1.7-2 und Bild 12.2.1.7-3).*

Folgende Abhilfemaßnahmen haben sich bewährt:

• ***Keine Anwendung von Silikonölen und Substanzen unbekannter und ungeprüfter Zusammensetzung*** *(z.B. Handcreme, Schmiermittel, „Schaumbremsen“, Trennmittel) in der Fertigung!*

• Wenn Werkstücke nicht mehr mit Eindringstoff rissprüfbar sind, müssen alle Reinigungsbäder erneuert werden. Priorität haben Bäder vor der Rissprüfung! Die Behälter sind vor der neuen Befüllung zu reinigen (Verschmutzungsränder)!

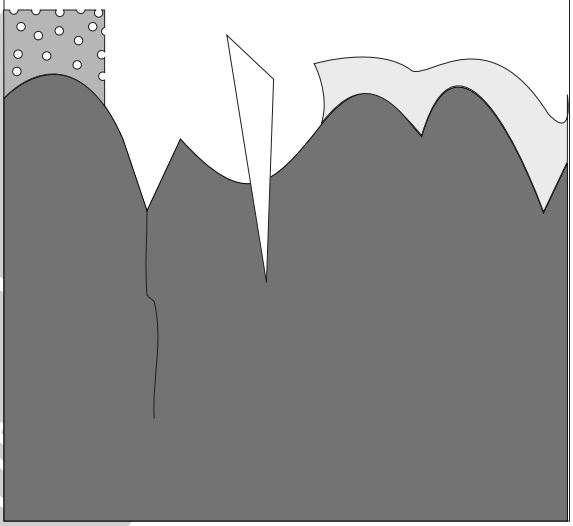
• Nicht jedes ungewöhnliche Verhalten der Bauteiloberfläche ist auf Verunreinigungen zurückzuführen, welche die Rissprüfbarkeit beeinträchtigen. Im Zweifelsfall ist die zuständige ***Fachabteilung hinzuzuziehen****. Sie hat die Möglichkeit, sich an Hand von Proben Gewissheit zu schaffen.*

• ***Sprays, Lotions, Seifen, Handcremes usw. aus Privatbeständen*** *dürfen nicht an den Arbeitsplatz mitgebracht werden. Zugelassen sind hier nur offiziell von den zuständigen Fachabteilungen freigegebene Pflegemittel.*

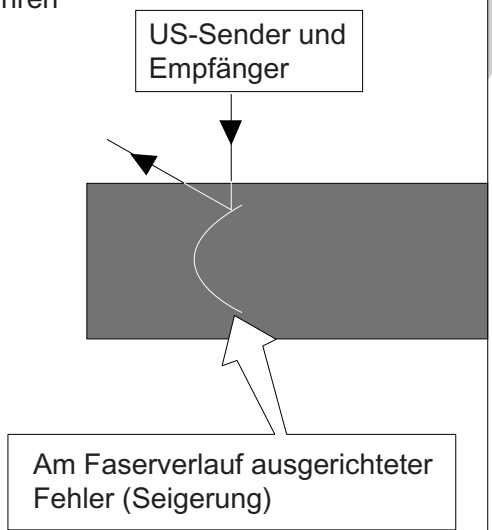
© Axel Rossmann Consult
als Schulungsunterlage nur für

Warum werden scheinbar sicher auffindbare Risse nicht gefunden?

Ungenügende Oberflächenbeschaffenheit, ungeeignete Vorbehandlung



Verfahrenstypische Schwächen bzw. nicht angepasstes Verfahren, ungeeignetes Verfahren



Fehlinterpretationen, ungenügende Fachkunde

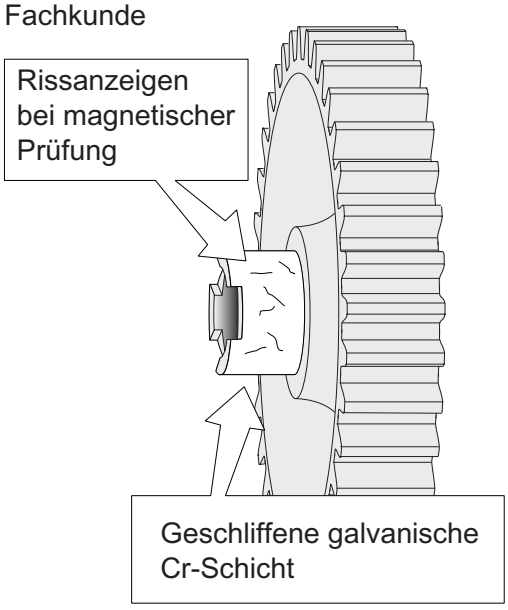


Bild 17.3.1-9

Bild 17.3.1-9: *Immer wieder kommt es vor, dass scheinbar sicher zu findende* ***Risse und Fehlstellen mit Prüfverfahren nicht gefunden werden****, von denen man eigentlich eine sichere Detektion erwartet hätte. Die Erfahrung zeigt, dass dabei immer wieder typische Situationen im Zusammenhang mit dem sog. „****Human Factor****“ (Lit. 17.1-8) im Spiel sind:*

Befund außerhalb des „Erwartungshorizonts“ *(Skizze oben links): Dieser Einfluss taucht immer wieder bei besonders großen (wenn auch sehr seltenen) übersehenen Rissanzeigen auf. So wurde offenbar ein Riss von mehreren Zentimeter Länge oberhalb der Fußplattform in einer Verdichterrotorschaufel übersehen. Es handelte sich um eine Schaufel aus Cr-Stahl eines älteren Triebwerkstyps. Die fluoreszierende Rissanzeige der routinemäßigen Magnetpulverprüfung war bei einem nachgestellten Fall an einer Schaufel mit einem vergleichbaren, im Labor erzeugten Schwingriss, von „neutralen“ Beobachtern auch aus größerem Abstand klar erkennbar. Trotzdem wurde auch an dieser Schaufel der Riss vom Prüfpersonal nicht bemerkt.*
In einem anderen Fall (Band 3, Bild 11.2.2.1-3) wurde ein ca. 20 Zentimeter langer Umfangsriss im Flansch einer Turbinenscheibe aus einer Ni-Schmiedelegierung mit der Eindringprüfung nicht erkannt.
In beiden Fällen waren offenbar die folgenden Faktoren im Spiel:
*-****Die Rissgröße überstieg bei weitem die Erwartung****. Gesucht wurde eigentlich nach Rissanzeigen im Bereich eines Millimeters. So wurde der Riss nicht als solcher erkannt. Verwechslungen mit „Wasserflecken“ liegen bei Eindringprüfungen nahe.*
- ***Risslage in einem nicht erwarteten Bauteilbereich****. Diese Situation liegt vor, wenn dem Prüfer die* ***bauteiltypischen, hochbeanspruchten Zonen*** *in Fertigung (z.B. Wärmebehandlung, Schleifbearbeitung) und/oder Betrieb* ***nicht bekannt und bewusst*** *sind. Es handelt sich also in einem solchen Fall auch um einen* ***Ausbildungsmangel****.*

- ***Lage des Risses in einem erschwert auswertbaren Bereich*** *der selbst Anzeigen erzeugt. Typisch sind Innenkanten. Hierzu gehören* ***Umfangsrisse in Flanschansätzen*** *(Band 3, Bild 12.2.1.8.3-10) und/oder an* ***Beschichtungsübergängen*** *(Band 3, Bild 12.2.1.8.3-9 und Bild 12.2.1.8.3-10). Auch Axialrisse (Torsion) in* ***Längsnuten von Vielkeilwellen*** *(Band 3, Bild 12.2.1.7-10 und Bild 17.3.1-4) lassen sich dieser Situation zuordnen. In diesen Fällen scheint ein* ***Mangel an Erfahrung und/oder Ausbildung*** *eine Rolle zu spielen.*
- ***Frustration und/oder zu große Routine****: Man muss sich die Situation eines Prüfers vor Augen halten, der über Jahre Rissanzeigen bis an der Nachweisgrenze (Bild 17.3.1-2) sucht, doch nie ein Erfolgserlebnis hatte. Dann kommt nach Jahren ein Teil mit einer mehrere Zentimeter langen Rissanzeige. In diesem Fall wird verständlich, wenn die Anzeige nicht in das eingeprägte „Suchmuster“ passt.*
Könnten hier Bauteile mit betriebstypischen, künstlich eingebrachten (Schwing-) Rissen Abhilfe schaffen? Eine solche Möglichkeit wird jedoch erfahrungsgemäß gescheut, mit dem Argument des Risikos eines Durchschlupfs.

- ***Ungenügende Oberflächenbeschaffenheit:*** *Ein typischer Effekt ist* ***Hintergrundfluoreszenz,*** *die von Eindringöl das an der Oberfläche verblieb ausgelöst wird. Oft handelt es sich um stark abrasiv gestrahlte Flächen (Skizze oben rechts, Aufrauung, Beladungseffekt). Auch ausgeprägte Bearbeitungsriefen (z.B. Drehriefen) oder poröse Schichten wie Oxidschichten und anhaftende Verunreinigungen sind ungünstige Bedingungen für eine Eindringprüfung. Ursachen derartiger Probleme sind zuerst in der Arbeitsvorbereitung und einer mangelnden Fachkenntnis der Prüfverantwortlichen zu suchen.*

- ***Nicht angepasste und/oder ungeeignete Prüfverfahren****: Typisch ist der in Bild 17.3.1-5 dargestellte Fall (Skizze unten links) einer Ultraschall-Prüfanordnung, die einen zu erwartenden Fehlertyp nicht berücksichtigte.*

© Meißner/Bonn - Tupodrs ist urheberrechtlich geschützt

Hier ist eine Ursache im ***Mangel an Gesamtsicht*** *(Bild 17.3.1-5) bei der* ***Konzipierung der Prüfung*** *zu suchen. So muss z.B. Art, Größe, Form und Lage typischer Rohteilfehler bekannt sein und berücksichtigt werden.*

- Missdeutung von Rissanzeigen *(Skizze unten rechts): Diese Problematik kann auch im Zusammenhang mit ungenügender Fachkenntnis und/oder der Auswahl eines ungeeigneten Prüfverfahrens stehen (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-10). Auch die unbefriedigende Information des Prüfpersonals über die* ***Besonderheiten und Hintergründe der zu prüfenden Bauteile*** *dürfte eine wichtige Rolle spielen. Die Skizze zeigt einen Fall (Band 3, Bild 12.2.1.8-3), bei dem Rissanzeigen einer Magnetpulverprüfung fälschlicherweise einer zulässigen und typischen Rissbildung in einer galvanischen unmagnetischen Cr-Schicht zugeschrieben wurden. Tatsächlich handelte es sich jedoch um tiefe Risse im darunter liegenden Grundwerkstoff des Zahnrades aus magnetischem Stahl.*

Bild 17.3.1-10: *Besondere Fachkenntnis und* ***Erfahrung*** *erfordert die Bewertung der Anzeigen eines Prüfverfahrens. Gerade* ***Auswertung und Bewertungen von Ultraschall- und Wirbelstromanzeigen*** *erfordern viel Fachkenntnis. Automatisierte Verfahren sind in diesem Fall besonders anspruchsvoll.*

Am Beispiel der Eindringprüfung soll die Problematik im Folgenden behandelt werden. Es geht zuerst um den ***geeigneten Oberflächenzustand****. Anzeichen wie Wasserflecken, Hintergrundfluoreszenz oder gestörter Benetzung (Bild 17.3.1-8) weisen auf eine nicht optimale Fehleranzeige und damit eine nicht ausreichende Auffindwahrscheinlichkeit (Bild 17.3.1-2) hin. Das kann die Wiederholung des Prüfprozesses notwendig machen. Gegebenenfalls ist zu überprüfen, ob der Prüfprozess noch den Vorschriften entspricht oder sich unzulässig verändert hat.*

Hinter einer Anzeige können sich eine Vielzahl unterschiedlicher Fehlstellen verbergen. Die Hauptaufgabe des Prüfers liegt darin, Fehleranzeigen den Spezifikationsangaben zuzuordnen. *Vordergründig geht es um „weiß-schwarz-Entscheidungen“. Die Bewertung einer Fehlergröße kann jedoch bei unterbrochenen Anzeigen sehr anspruchsvoll sein, besonders wenn man sich im Grenzbereich der Zulässigkeit befindet. Auch die Fehlerart kann bei vergleichbarer Anzeigengröße entscheiden. So ist ein Riss oft anders zu bewerten als eine orientierte Porosität die ebenfalls eine linienartige Anzeige hat.*

Der erfahrene Prüfer kann mit der individuellen Nachbehandlung einzelner Anzeigen Rückschlüsse auf Art und Tiefe der Fehlstelle ziehen. So kann es von großer Bedeutung für die Bewertung der Zulässigkeit eines Bauteils sein, ob es sich um eine rissartige Trennung oder um Porosität handelt.

*Ein „gekonntes“ Abwischen der Rissanzeige mit etwas Waschflüssigkeit („****Remover****“) kann anhand des erneut herausquellenden Eindringstoffs und damit der Intensität der Anzeige, etwas über die Risstiefe oder die Größe eines*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Eine lineare Eindringanzeige muss noch lange kein Riss sein. Umgekehrt gilt, dass Risse nicht immer zu linearen Anzeigen führen.

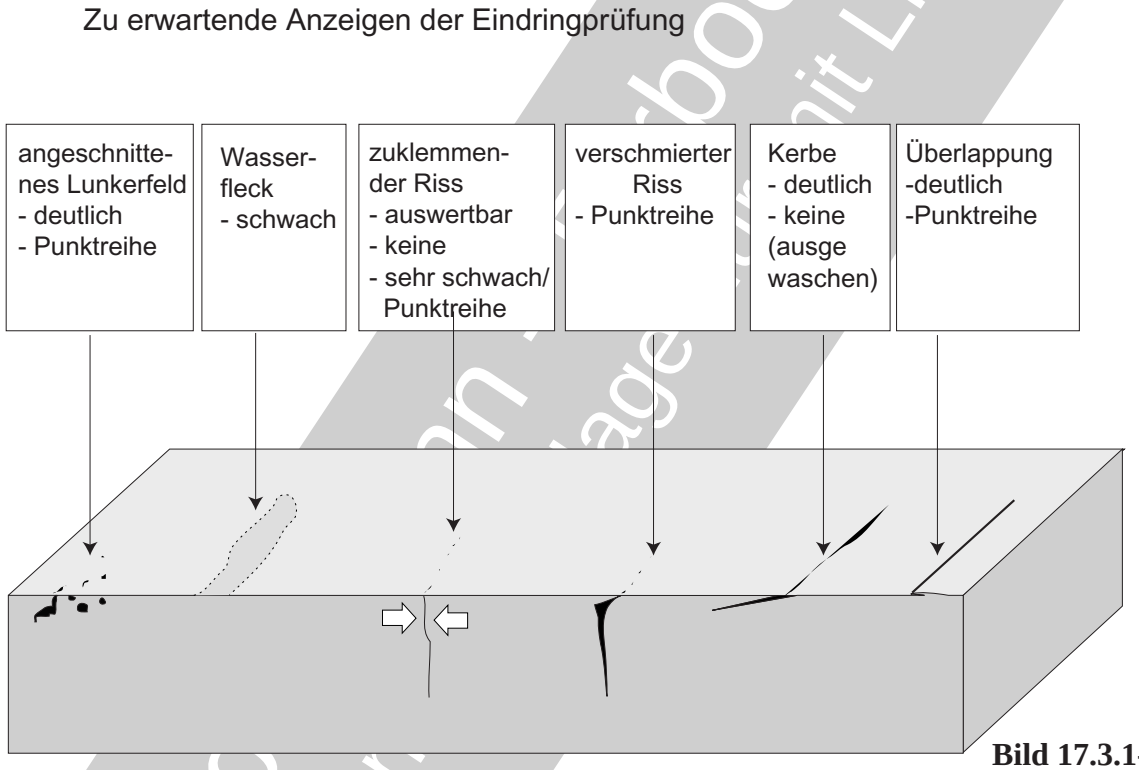


Bild 17.3.1-10

*Lunkerfelds unter der Oberfläche aussagen. Es lassen sich auf diese Weise auch **Artefakte von echten Fehleranzeigen unterscheiden**.*
Intensität, Verteilung, Häufigkeit, Verlauf und Form der Anzeige weisen auf die Art und Größe des Fehlers hin. So ist ein orientiertes Rissfeld in einer Schleiffläche für Schleifrisse charakteristisch. Voraussetzung für solche Bewertungen ist, dass die Bereiche der am Bauteil angewandten Fertigungsverfahren mit ihren typischen Fehlerbefunden bekannt sind. Selbst winzige Anzeigen in einer Schleiffläche sind alarmierend und genauer zu inspizieren, könnte es sich doch um zugeschmierte Risse handeln. Dem Prüfer sollten daher typische Fehler der einzelnen Fertigungsprozesse mit ihren bevorzugten Erscheinungsformen bekannt sein. Hierzu gehört die Lage entsprechend dem Bearbeitungszustand am Bauteil und die zu erwartenden Anzeigen.
Dies gilt natürlich auch für werkstofftypische Anzeigen in Rohteilen und Halbzeug. Sie sollten mit ihren bevorzugten Erscheinungsformen und der bauteilspezifischen Lage dem Prüfer ebenfalls geläufig sein.
Bestehen Bedenken in der Bewertung einer Anzeige, ist die Zusammenarbeit mit der zuständigen Fachabteilung (z.B. Metallografie, Bild 17.3.2-5 und Band 1 Bild 2.2.2.4-2) zu suchen. Örtliches Anpolieren und/oder mikroskopisch auswertbare Abdrücke (z.B. REM, Bild 17.3.2-8) können eine befriedigende Klärung herbeiführen.

Die Qualität der Spezifikation ist eine Voraussetzung für die Qualität des Prüfergebnisses.

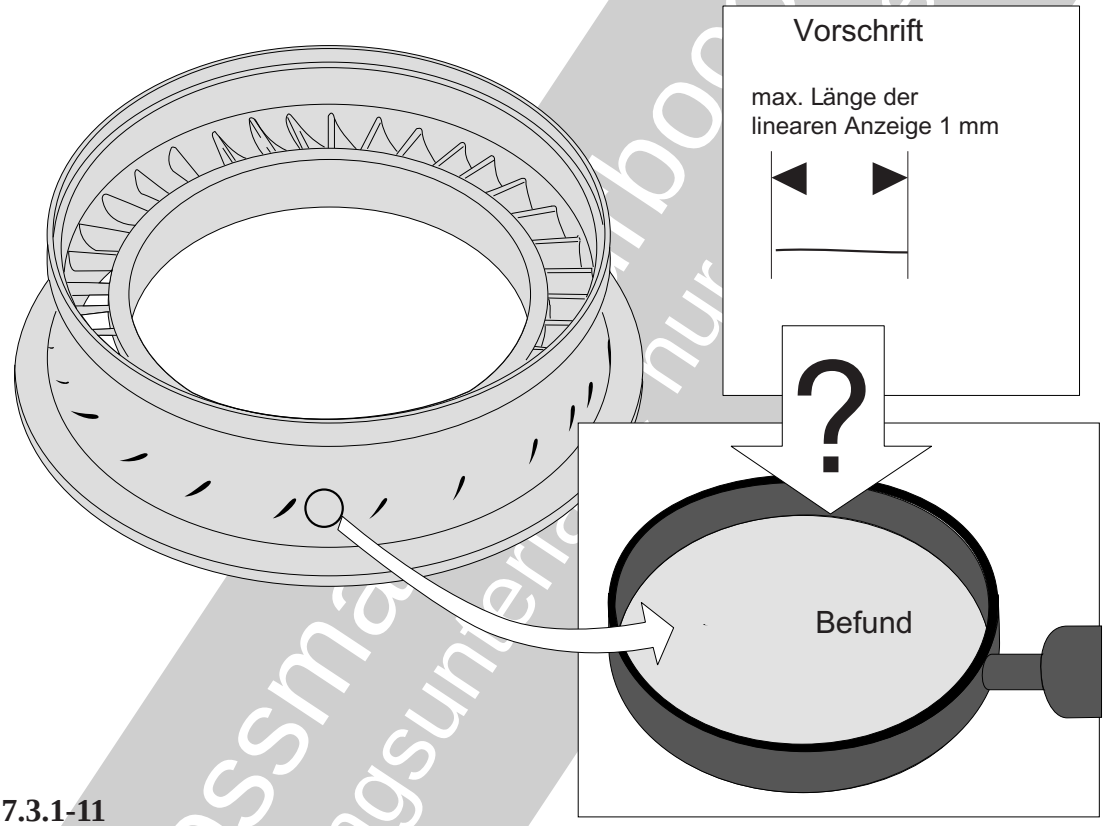


Bild 17.3.1-11

Bild 17.3.1-11: Klare unmissverständliche und praxisnahe Spezifikationsangaben *sind für eine ausreichend sichere Bewertung der Anzeigen von Prüfverfahren von entscheidender Bedeutung. Als Beispiel soll die Eindringprüfung dienen.*

Spricht eine Vorschrift z.B. von einer bestimmten, maximal zulässigen Anzeigenlänge, kann darin durchaus eine Interpretierbarkeit des Befunds enthalten sein. Zuerst ergibt sich die Frage, was eine lineare Anzeige ist. Liegt diese im Bereich der Nachweisgrenze, können bereits kleine Abweichungen im Verfahrensablauf einen linearen Befund in einen punktartigen Befund, z.B. durch Auslaufen, verändern.

Andererseits können angeschnittene, orientiert angeordnete Gussporen einen linearen, d.h. Rissbefund ergeben (Bild 17.3.1-10).

Teilweise zugeschmierte Risse (z.B. Schleifrisse oder überstrahlte Risse) sind in der Lage, eine für die Bauteilfestigkeit weniger gefährliche Porenkette vorzutäuschen.

Weil sich der Prüfer an den Wortlaut der Vorschrift halten muss*, ist es notwendig, dass der Ersteller der Vorschrift ausreichend Fachkunde und Erfahrung besitzt. Mit einer ausreichend exakten Fehlerdefinition müssen Unsicherheiten und Fehlbewertungen weitmöglichst vermieden werden.*

Missverständliche Angaben können besonders in übersetzten Vorschriften*, z.B. bei Lizenznahmen, enthalten sein.*

Mehr Sicherheit als lediglich Beschreibungen bringen klare Skizzen oder Fotos zu typischen Befunden mit einer zugeordneten Bewertung.

© Axel Rossmann bocomult
als Schulungsunterlagen nur

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 17.3.1-12: *Immer wieder kommt es vor, dass an Neuteilen, z.B.* ***nach längerer Lagerung*** *und erneuter Rissprüfung, vor dem Einbau* ***Risse*** *gefunden werden. Auch die Ablösung von Schichten oder unzulässige* ***Maßabweichungen*** *gehören zu vergleichbaren Befunden. Hier entsteht erfahrungsgemäß sofort der Verdacht, die Fehlstellen wurden bei den Prüfungen im Fertigungsablauf übersehen. Ein solcher Verdacht ist nicht ganz unbegründet, weil jedes Prüfverfahren auch einen gewissen Durchschlupf erwarten lässt (Bild 17.3.1-2). Diese Annahme ist jedoch bei weitem nicht immer berechtigt. Sie kann neben weiteren Schäden zur Verzögerung der Ursachenermittlung und der Abhilfen führen.*
In solchen Fällen ist immer in die Überlegungen einzubeziehen, dass es sich um ***verzögerte Rissbildung*** *handelt. Ein solcher Effekt, für den es unterschiedliche Ursachen gibt, führt auch zur Rissbildung während der Lagerung. Typische Ursachen verzögerter Rissbildung sind (Bild 18.7-8):*

Wasserstoffversprödung *(„**1**“) kann kurzzeitig, d.h. innerhalb von Stunden aber auch noch längere Zeiträume nach der Wasserstoffaufnahme Risse auslösen (Band 1, Kapitel 5.7). Die Wasserstoffaufnahme ist in einem Bad (z.B. Kadmierbad), über Feuchtigkeit oder Gas möglich. Bekannt sind Ursachen wie Feuchtigkeitszutritt beim Schmelzschweißen (Bild 18.4-13) oder Einsatzhärten in der Gasphase (Zahnrad, Band 3, Bild 12.2.1.8-5).*

Relaxation *(„**2**“): Als Folge eines Kriecheffekts (Bild 18.4-15.1 und Band 1 Kapitel 5.3.2), der auch unter Raumtemperatur auftreten kann, sind unzulässige Maßveränderungen (Skizze Mitte links) möglich. Beispiele sind* ***Verzüge*** *an Schweißkonstruktionen und komplex geformte Gussteile.*

Stress Relief Cracking *(„**3**“): Eine derartige Rissentstehung wird besonders an Schweißungen beobachtet (siehe Band 3, Bild 12.2.1.3-*

12 und Tabelle 12.2.1.3-1). Sie steht bei Stählen häufig im Zusammenhang mit Wasserstoffversprödung. Relaxation kann an Ni-Legierungen zum Wachstum von Warmrissen des Schmelzschweißprozesses beitragen.

***Ablösung von Schichten** („**4**“) kann sich bei spröden Schichten wie Wärmedämmschichten in einem Abheben der Ecken andeuten. Ein solcher Effekt ist im Zusammenhang mit Relaxation zu sehen. An zähen, dichten und dünnen Schichten wie galvanischen Silberschichten kann Blasenbildung beobachtet werden (Bild 12.2.1.6-10). Hier handelt es sich wahrscheinlich um Wasserstoffaustritt im Bereich der Haftfläche. Das Gas kann aus Schicht und/oder Grundmaterial stammen und wurde beim galvanischen Prozess aufgenommen.*

***Maßänderungen durch Volumenänderung** („**5**“) sind auf Umwandlungen instabiler Gefügezustände bei der Lagerung zurückzuführen. Sie werden nur sehr selten beobachtet. Dies kann zwei Gründe haben:*
- Anwendung geeigneter Gegenmaßnahmen mittels Tiefkühlen oder Anlassen gefährdeter gehärteter Stahlteile.
- Die sehr geringen Volumenänderungen fallen nur bei sehr eng tolerierten Bauteilen wie Reglerkolben auf (Band 3, Bild 12.2.2.9-8).

***Rissöffnung unter Betriebsbeanspruchung** („**6**“): Typisches Beispiel sind verschmierte Schleifrisse in Tannenbaumfüßen von Turbinenschaufeln (Band 3, Bild 12.2.1.1-4) oder durch intensives Strahlen verdeckte Fehlstellen. Die Risse öffnen sich unter thermischen und mechanischen Dehnungen (siehe auch Bild 17.3.1-7).*

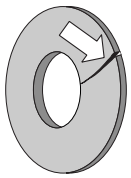
***Korrosion** („**7**“): Hierzu gehören Spannungsrisskorrosion, Lochfraß und interkristalline Korrosion. Bei ungünstigen Lagerungsbedingungen sind derartige Angriffe möglich. Begünstigt bzw. ausgelöst werden sie z.B. von zurückgebliebenen aggressiven Medien aus dem Fertigungsprozess („**8**“). Dazu zählen Flussmittel vom Hartlöten mit Schwitzwasser die auch korrosionsfeste Werkstoffe angreifen (Band 3, Bild 12.2.1.4-17).*

© Axel Bossmann - Turboconsult
Absicherungsunterlage nur mit Lizenz

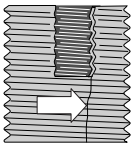
Qualitätssicherung: Prüfverfahren

Nach der Fertigung ist es möglich, dass sich scheinbar spezifikationsgerechte Neuteile vor dem Betriebseinsatz noch unzulässig verändern.

1 Rissbildung/Bruch durch Wasserstoffversprödung

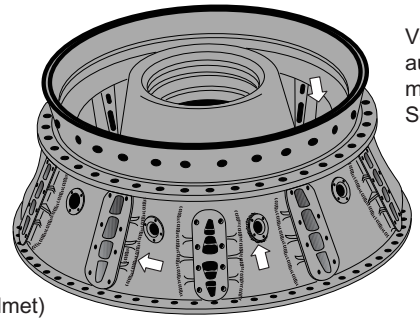


ca. 1 cm



Tellerfeder
(Federstahl verkadmet)

Gewindeeinsatz
(Einsatzstahl verkadmet)

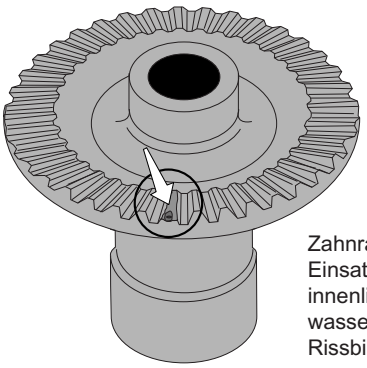


Verdichtergehäuse aus Vergütungsstahl mit versprödeten Schweißnähten.

ca. 10 cm

2 Verzug durch Relaxation

Aufbiegen eines einseitig gestrahlten dünnen Querschnitts, z.B. an einer nur einseitig zugänglichen Gehäusewand..

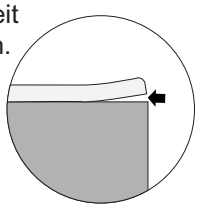


ca. 1 cm

Zahnrad aus Einsatzstahl mit innenliegender wasserstoffinduzierter Rissbildung

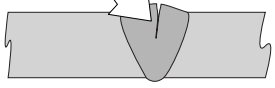
3 Ablösen von Schichten

die unter Eigenspannungen stehen, welche die Haftfestigkeit übersteigen.



4 Stress relief cracking:

klaffender Riss in und/oder neben einer Schweißung



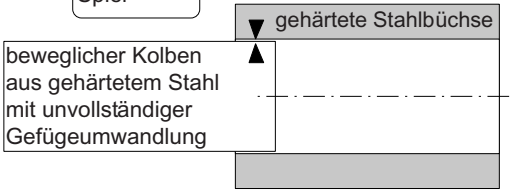
6 Rissöffnung unter Betriebseinflüssen

Öffnung von Schleifrissen

7 Maßänderung durch Volumenänderung

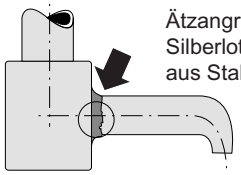
wenige "μ" Spiel

hochpräzises Bauteil des Kraftstoffsystems



8 Korrosion (SpRK, Lochfraß):

z. B. durch unvollständiges Entfernen von aggressiven Fertigungsmedien wie Ätzbäder und Flussmittel.



Ätzangriff an einer mit Silberlot gelöteten Öldüse aus Stahl vom Typ CrNi 18/10.

Bild 17.3.1-12

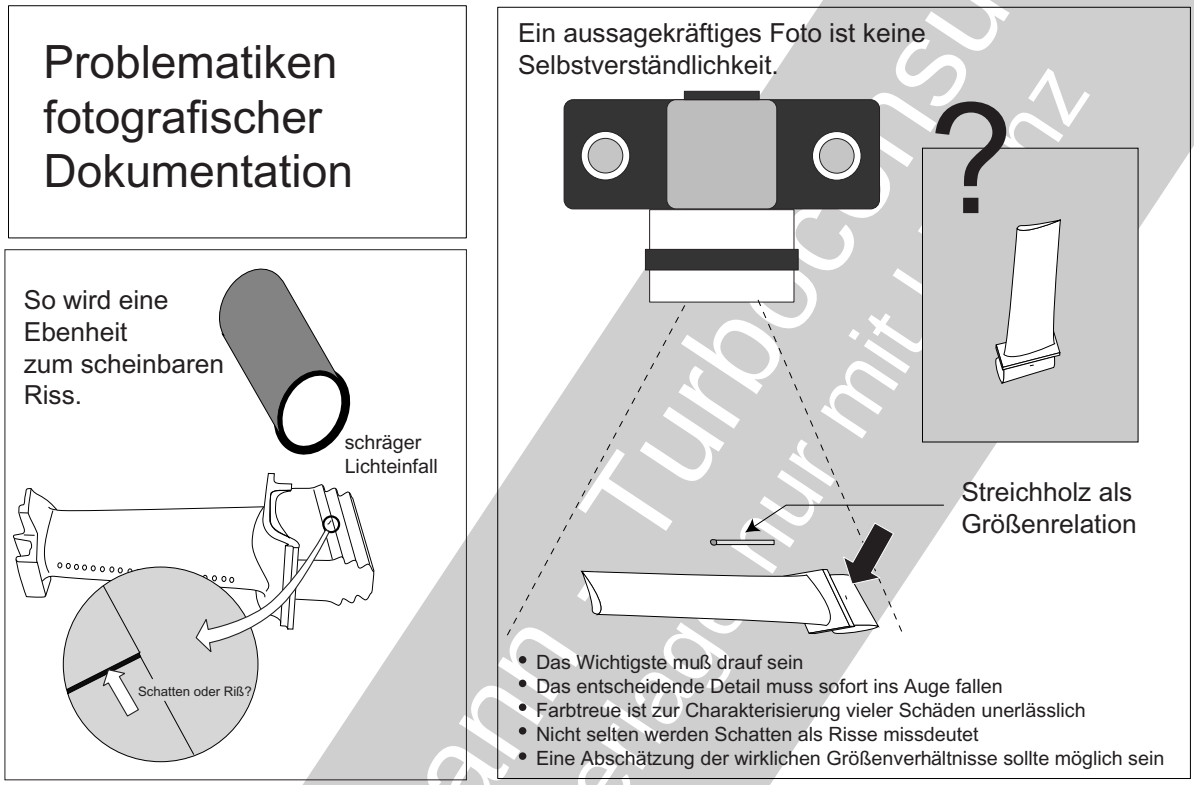
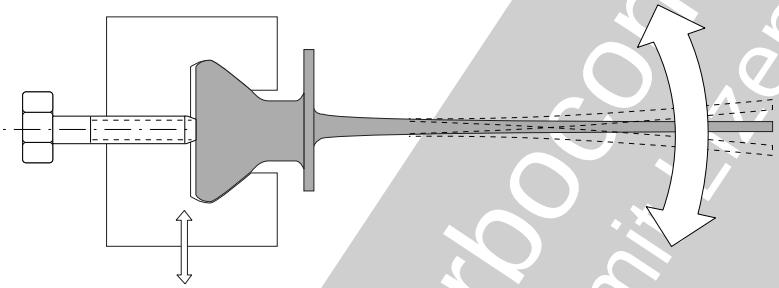


Bild 17.3.1-13

Bild 17.3.1-13: *Die* ***Dokumentation visueller Befunde*** *wie Aufnahmen von Topografiebesonderheiten und Fehlstellen (z.B. Risse), UV-Prüfanzeigen (z.B. Eindringprüfung oder einer Magnetpulver-Prüfung) kann durchaus zu späteren Fehleinschätzungen führen.*
- Schatten an Riefen und Grate können Rissen täuschend ähneln (Skizze links).
- Die Bauteil- bzw. Fehlstellengröße sollte auch für „Außenstehende“ abschätzbar sein (Skizze rechts). Ein Gegenstand allgemein bekannter Größe oder ein Maßstab (Lineal, kariertes Papier) reicht meist aus.
- Die Lage der Fehlstelle am Bauteil sollte erkennbar sein.
- Verfälschende Farbabweichungen sind zu vermeiden. Beispiele sind Verfärbungen infolge Anlauffarben und Oxidation.
Die Autenzität einer fotografischen Dokumentation wird von den Möglichkeiten der heutigen computergestützten Bildbearbeitung immer mehr in Frage gestellt*. So entstehen bereits Unsicherheiten, wenn Befunde verdeutlicht werden, indem sie gegenüber der Umgebung mit Kontrast- und Farbänderungen hervorgehoben werden. Auf diese Weise wird die Beweiskraft fragwürdig.*

© A. Rossmann - Turbo Consult
Nur mit Lizenz
Gültigkeit unter

17.3.2 Zerstörende Prüfverfahren



Die Abgrenzung einer **zerstörenden Prüfung** von einer zerstörungsfreien Prüfung erscheint auf den ersten Blick einfach, bei genauerem Hinsehen kommen jedoch Bedenken. Natürlich sind Prüfungen bei denen das Bauteil zerstört, für einen späteren Betrieb unzulässig verändert oder Proben entnommen wurden, als zerstörend zu bezeichnen. Wie steht es jedoch mit Prüfungen, die nur bei ungenügender Bauteilqualität eine Verwendung ausschließen? Hierzu kann man Glasperlenstrahlen als Haftfestigkeitsprüfung von Silberschichten zählen (Bild 18.8-6). Auch ein sogenannter **Prooftest** der sich einer Überlast bedient ist nicht eindeutig zuordenbar. Ein Beispiel ist das Schleudern keramischer Rotorteile. Teile mit unzulässiger Qualität werden durch Bruch ausgeschieden während solche, die den Test überstehen, zum Einbau kommen.

Es gibt auch Prüfverfahren die je nach Anwendung und Vorgehensweise als zerstörend oder zerstörungsfrei zu bezeichnen sind. Typische Beispiele sind mikroskopische Untersuchungen der Metallografie (Band 1, Bild 2.2.2.4-1 und Bild 2.2.2.4-2) und am Rasterelektronenmikroskop (REM, Band 1, Bild 2.2.2.4-3).

Müssen dem Bauteil Proben entnommen werden, handelt es sich gewöhnlich um ein zerstörendes Verfahren. Genügen Abdrücke (Band 1, Bild 2.2.2.4-4) oder kann die Oberfläche direkt untersucht werden, ohne das Bauteil unzulässig zu beeinflussen, handelt es sich zweifellos um ein zerstörungsfreies Verfahren.

Alle diese Verfahren, die beide Zuordnungen ermöglichen, werden in diesem Kapitel unter zerstörenden Verfahren behandelt.

Eigenspannungsmessungen (Tabelle 17.3.2-1) können sowohl zerstörungsfrei (an der Oberfläche mit **Röntgenbeugung**) als auch zerstörend (Tiefenverlauf mit der **Bohrlochmethode**) vorgenommen werden (Band 3, Bild 12.2.2.4-21).

Haftfestigkeitsprüfungen an Beschichtungen (Tabelle17.3.2-2) lassen sich gewöhnlich nur zerstörend durchführen bzw. benötigen eine nachfolgende Neubeschichtung. Man nutzt deshalb möglichst mit dem Bauteil beschichtete separate Proben (Bild 18.8-5 und Bild 18.8-6).

Werkstoffkennwerte für die Auslegung der Bauteile werden mit zerstörenden Prüfungen an Proben ermittelt. Hierzu zählt die **LCF-Festigkeit** der Rotorkomponenten. Themoermüdungslebensdauer und die Kriechfestigkeit von Heißteilen gehören ebenfalls dazu. Die **HCF-Festigkeit** (Schwingfestigkeit im Bereich der Dauerfestigkeit) wird dagegen vorzugsweise an Bauteilen bestimmt bzw. nachgewiesen. Es handelt sich in erster Linie um **Schwingversuche** an Schaufeln die in Resonanz gebracht werden (Bild 17.3.2-3).

Zerstörende Verfahren kommen im Rahmen der Qualitätssicherung in erster Linie bei der **Ausfallmusterprüfung,** stichprobenartigen **Wareneingangsprüfungen** (Bild 17.3.2-3), **Lebensdauernachweisen** (Bild 17.3.2-2), **Zulassungsprüfungen** (z.B. zyklische Schleuderversuche**,** Bild 17.3.2-4) sowie der **Prüfung integraler Proben** (Bild 17.3.2-1) zum Einsatz.

© Keil Bossmann Turbokonsult
Alle Rechte vorbehalten, auch auszugsweise Vervielfältigung nur mit Genehmigung

Zerstörende **metallografische Untersuchungen** an Schliffen (Band 1, Bild 2.2.2.4-1 und Bild 2.2.2.4-2) prüfen im Rahmen von Ausfallmuster- und Wareneingangsprüfungen Bauteile auf vorschriftsgerechte Gefüge (z.B. an Schmiederohlingen von Rotorscheiben) und mögliche Fehlstellen wie Schrumpflunker in Gussteilen. Untersuchungen feinster Gefügebestandteile wie die γ'-Phase aushärtbarer Nickellegierungen, kann **elektronenmikroskopisch** (**REM**, Band 1, Bild 2.2.2.4-3) an Proben aus dem Bauteil erfolgen.

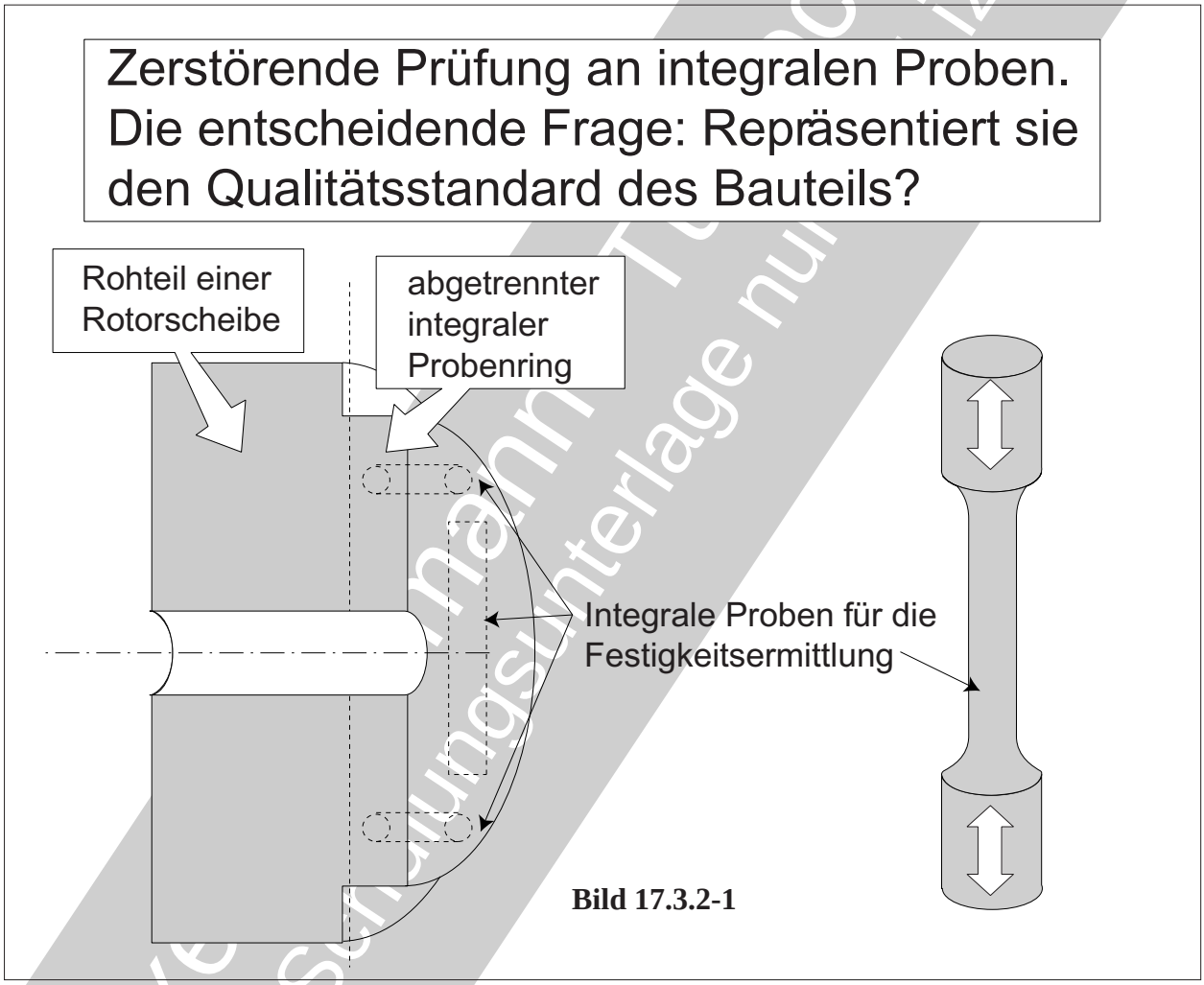


Bild 17.3.2-1

Bild 17.3.2-1: *Für die* ***Wareneingangsprüfung*** *hoch beanspruchter Serienbauteile wie Rotorscheiben, werden aus Rohteilen Proben bewusst angebrachtem überschüssigem Material entnommen. Die zerstörende Prüfung dieser Proben sollte vor dem Fertigungsprozess abgeschlossen sein. Sonst kann die Situation eintreten, dass bereits hohe Fertigungskosten angefallen sind und/oder eine rechtzeitige Nachbeschaffung der Rohteile nicht mehr möglich ist, wenn die Wareneingangsprüfung unzulässige Abweichungen feststellt. Weil die Prüfungen durchaus zeitaufwändig sind, ist auf einen ausreichenden Vorlauf zu achten. Natürlich muss das Prüfmaterial so am Bauteil angeordnet sein, dass die Probenergebnisse (meist LCF und/oder Kriechen, Probenskizze) für die lebensdauerbestimmende Bauteilzone repräsentativ sind. In der Skizze links handelt es sich um einen integralen Probenring der vom Rohteil abgetrennt wird. Aus ihm werden die spezifizierten (integralen) Proben entnommen.*
Probenlage und -orientierung *ist dabei so gewählt, dass Aussagen über die der Auslegung zu Grunde gelegten Kennwerte gewährleistet sind.*

© Axel Hartmann Technikconsult
Schulungsunterlage nur zur Lizenz

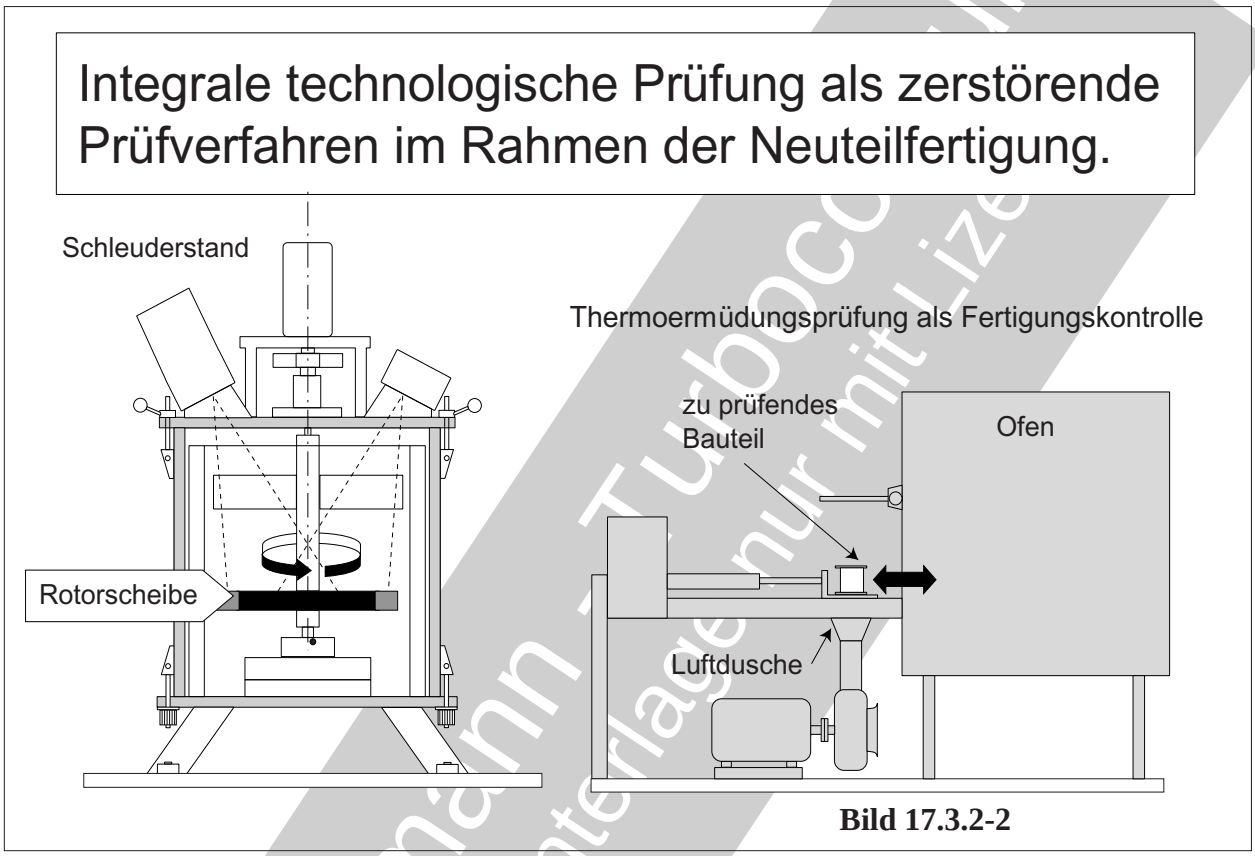


Bild 17.3.2-2

Bild 17.3.2-2: *In vielen Fällen kommt man um einen Qualitätsnachweis mit einer* ***technologischen Prüfung*** *nicht herum. Diese ist zerstörend und muss deshalb als repräsentativ für ein größeres Fertigungslos gelten können. Unter einer technologischen Prüfung versteht man eine Prüfung, die typische lebensdauerbestimmende Betriebslasten und Schadensmechanismen an einem fertigen Bauteil simuliert. Dabei kann das Prüfteil Technologien wie Beschichtungen aufweisen, die sich in Kombination mit dem Grundwerkstoff auf das Bauteilverhalten auswirken. In derartigen Strukturen sind die Betriebslasten und/oder das Zusammenwirken der verschiedenen Technologien derart komplex, dass sie nicht von einfachen Proben repräsentiert werden können. Die Ergebnisse sind deshalb qualitativ, d.h. lediglich für Vergleiche des erwünschten Verhaltens geeignet.*
Typische Beispiele für solche Prüfungen sind:

Zyklische Schleuderversuche *(Skizze links) mit Temperaturgradienten an beschichteten Zwischenstufenringen (Spacer) oder Anstreifversuche an Einlaufbelägen in Gehäusen.*

Thermoermüdungsprüfung *an Turbinenleitschaufeln die mit keramischer Wärmedämmschicht versehen sind (Skizze rechts). Hier werden statistische Prüfungen des Fertigungsprozesses durchgeführt, indem einzelne Bauteile der Serie entnommen und definierten thermischen Zyklen unterworfen werden. Erreicht das Prüfteil eine Mindestzyklenzahl ohne unzulässige Schädigungen, wird das zugehörige Fertigungslos zur Auslieferung freigegeben.*

© Axel Rossmann - Turbocoach
Diese Unterlage nur mit Lizenz

Beispiel 17.3.2-1 (Bild 13.3.2-3): Im Rahmen einer Fertigungserprobung wurden eine Vielzahl Verdichterrotorschaufeln einer axf-Prüfung unterzogen. Es fiel auf, dass Schaufeln niedrige axf-Werte aufwiesen, ohne dass erklärende Besonderheiten zu erkennen waren. Massabweichungen außerhalb der Zeichnungsforderungen lagen nicht vor. Auch erklärende Unterschiede in der Oberflächenqualität (Rauigkeit, Verfestigung, Eigenspannungen) und dem Werkstoff konnten nicht gefunden werden. Eine statistische Auswertung ergab, dass die beanstandeten Schaufeln sich in ihrem Verhalten beim axf-Versuch systematisch in scheinbar untergeordneten Abweichungen von den anderen unterschieden:

- Die Resonanzfrequenz (Prüffrequenz) lag etwas (im Prozentbereich) tiefer.
- Die Anrisse der Schwingbrüche lagen etwas näher zur Fußplattform.

Eine sehr genaue, nicht serientypische, Vermessung der Blattgeometrie ergab einen Trend der die Besonderheiten der Prüfergebnisse einleuchtend erklärte:

Schaufeln mit höherem axf-Wert wiesen ein etwas **dünneres Profil an der Spitze** und einen etwas **dickeren Querschnitt im Übergang zur Fußplattform** auf („**Eiffelturmeffekt**"). Diese Schaufeln hatten damit an der Spitze eine geringere Masse und am Fuß eine höhere Steifigkeit. Beide Merkmale erhöhen die Eigenfrequenz der Grundbiegeschwingung wie sie beim axf-Versuch angewendet wird. Die unterschiedliche Lage der Schwinganrisse ließ sich mit der niedrigeren Beanspruchung und einem gleichmäßigeren Übergang zur Fußplattform erklären.

Diese Erkenntnisse führten zu einer Festschreibung der schwingfesteren Blattgeometrie in den Zeichnungsforderungen.

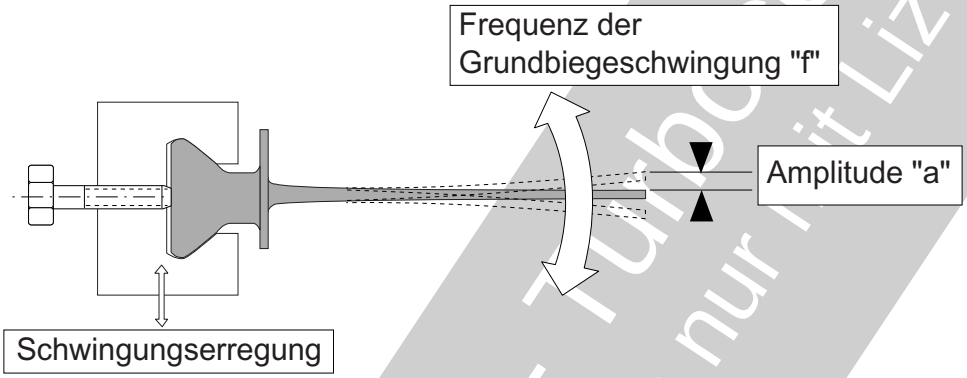
Bild 17.3.2-3: *Aus manchen Bauteilen wie Schaufeln lassen sich keine befriedigenden* ***repräsentativen Proben*** *für zerstörende Untersuchungen, insbesondere Schwingfestigkeitsprüfungen im HCF-Bereich (Band 1, Bild 5.4.3.2-3) entnehmen. So lässt sich z.B. die Oberfläche der Schaufel im höchstbelasteten Bereich wie dem Übergang vom Blatt in die Fußplattform, nicht ausreichend von einer Probe simulieren. Hier spielen Fertigungsparameter, Werkstoffbesonderheiten (z.B. Schmiedestruktur mit Kornorientierung und Korngröße) eine Rolle, die sich in einer „Standard"-HCF Probe nicht ausreichend bauteilnah reproduzieren lassen. Man denke nur an den vergleichsweise kleinen Krümmungsradius einer Rundprobe oder die unterschiedliche Steifigkeit unter der Einwirkung der Zerspanungskräfte. Davon sind entscheidende Verfestigungs- und Eigenspannungseffekte betroffen.*

Aus diesem Grund werden z.B. im Rahmen der ***Wareneingangsprüfung von Verdichterschaufeln*** *statistisch Teile entnommen und einer „axf-Prüfung" unterzogen (Band 1, Bild 5.4.3.2-7). Diese Prüfung bei einer Resonanz lässt nicht nur einen betriebsnahen Nachweis ausreichender* ***HCF-Festigkeit*** *zu. Ungewöhnliche* ***Anrisspositionen*** *am Profil und/oder in radialer Richtung können Indizien für* ***Bearbeitungsabweichungen*** *oder* ***Werkstoffbesonderheiten*** *sein. Die* ***Resonanzfrequenz*** *ermöglicht auch Rückschlüsse auf Abweichungen der komplexen* ***Schaufelgeometrie*** *(Rahmen unten).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Qualitätssicherung: Prüfverfahren

Die axf-Prüfung ermöglicht wichtige Schlüsse auf Veränderungen der Betriebseigenschaften.



Abweichungen welche sich auf die dynamische Schaufelfestigkeit auswirken können und auf die der axf-Versuch hinweist:

- Werkstoff: Gefüge, Härte und Fehler aus erreichtem "axf"-Wert.
- Fertigungsbedingt wie Eigenspannungen, Überhitzung, Schwingermüdung aus erreichtem "axf"-Wert.
- Anrissposition am Blatt.
- Geometrie (z.B. "Eiffelturmeffekt") aus der Resonanzfrequenz.

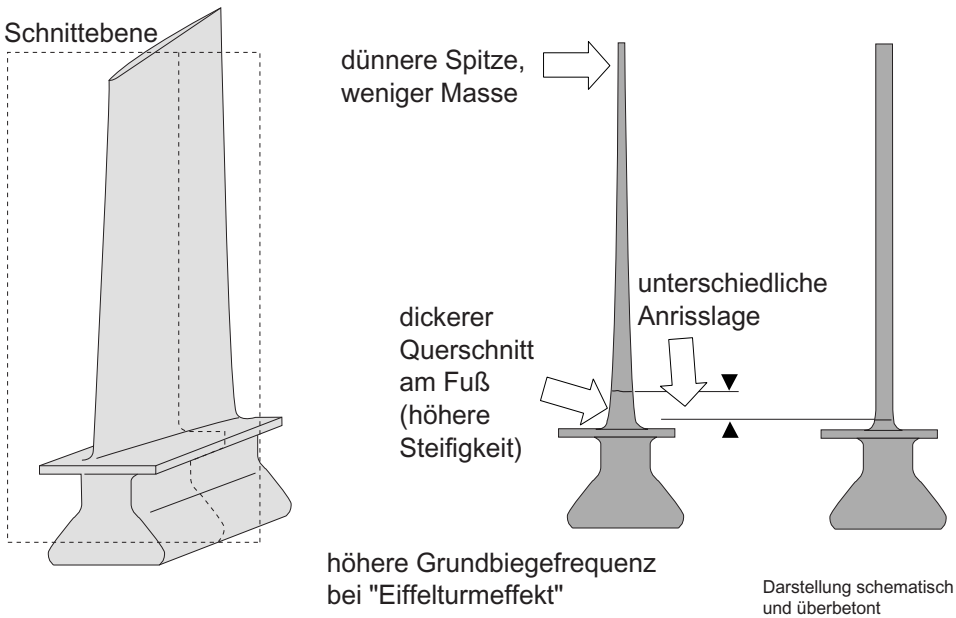


Bild 17.3.2-3

© Mossmann - Turbo Consult
Lizenz nur mit Lizenz

Zulassungsprüfungen mit zyklischen Schleuderversuchen als Lebensdauernachweis von Rotorscheiben erfüllen nur dann ihren Zweck, wenn alle Fertigungsschritte ausreichend festgeschrieben und die Prozesse stabil sind. Auch scheinbar kleine Änderungen bedürfen zumindest der Zustimmung zuständiger Fachabteilungen und Zulassungsverantwortlicher.

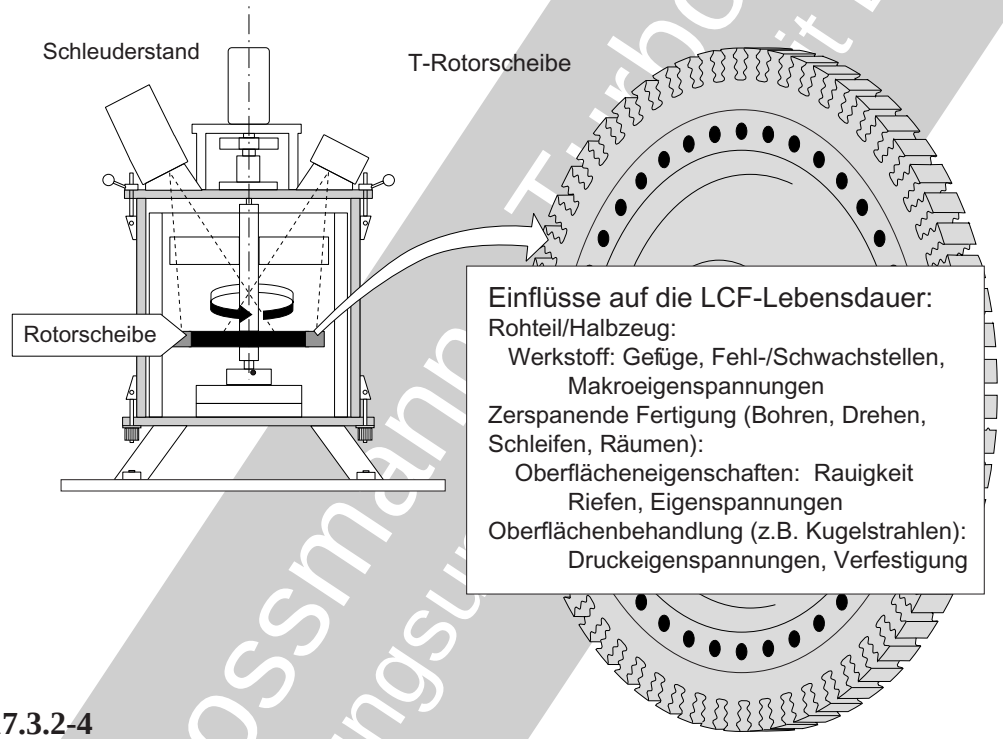


Bild 17.3.2-4

Bild 17.3.2-4: *Wird ein* ***Triebwerksbauteil zugelassen****, durchläuft es Prozeduren die gewährleisten, dass alle folgenden Serienteile die nachgewiesenen Eigenschaften haben. Dies ist nur möglich, wenn die in der Entwicklungsphase optimierten Verfahrensschritte der Fertigung ausreichend festgeschrieben sind und sicher reproduziert werden. Hierfür sind sog.* ***stabile Fertigungsprozesse*** *Voraussetzung. D.h. es ist mit ausreichender Sicherheit auszuschließen, dass Verfahrensparameter abdriften. Werden aus* ***Rationalisierungsgründen*** *oder unter dem Aspekt einer* ***technischen Verbesserung*** *Änderungen erforderlich, können für sicherheitsrelevante Bauteile umfangreiche Zulassungsarbeiten notwendig werden.*

Ein typisches Beispiel sind ***Rotorscheiben*** *(Skizze rechts). Bereits der* ***Wechsel des Rohteillieferanten*** *oder* ***Umstellungen in der Rohteilherstellung*** *(z.B. Erschmelzung) fordern erneut Nachweise wie zyklische Schleuderversuche. So erhält man die* ***sicheren Betriebslastwechsel*** *(Skizze links) als Basis einer Zulassung. Entsprechendes gilt auch für* ***scheinbar harmlose Umstellungen in der Fertigung.*** *Hierzu gehören* ***Änderungen der Prozessparameter****. Selbst der Einsatz eines neuen Typs einer Bearbeitungsmaschine, neuer Schneidmittel (z.B. von Hartmetall auf Keramik) oder Schneidschmierstoffe kann den „Nachweismechanismus“ auslösen.*

© Axel Rossmann Turbo Result
als Schulungsunterlagen

Vor- und Nachteile der Messmethoden für Eigenspannungen

Methode	Vorteile	Nachteile	Besonderheiten
1 Röntgenografische Messungen (Bild 18.4-21)	○ Zerstörungsfrei ○ schnell	○ begrenzte Zugänglichkeit ○ Oberflächenzone im µ-Bereich ○ Anlagen- und zeitaufwändig ○ nicht leicht interpretierbar	tiefere Messung erfolgt schrittweise bei schichtweisem Abtrag
2 Messung mit DMS			
2a Bohrlochmethode (Bild 18.4-21)	○ misst Verlauf bis ca. ○ 1 Millimeter Tiefe ○ preiswert ○ schnell	○ nicht ganz zerstörungsfrei	○ Beherrschung des Bohrverfahrens ○ benötigt Erfahrung
2b Auftrennen (Bild 18.4-21)	○ lässt Abschätzungen in größeren Querschnitten zu	○ beeinflusst durch den Trennprozess ○ teuer ○ zerstörend ○ relativ aufwändig	erforderlich ist das Zerschneiden des Prüflings
3 Neutronenbeugung (Lit. 17.3-1 und Lit. 17.3-2)	○ Verlauf über mehrere Zentimeter ○ zerstörungsfrei ○ gute Zugänglichkeit	○ hohe Kosten ○ nur wenige Anbieter	Neutronenquelle erforderlich (Reaktor)
4 Durchbiegung (Almenmessung) beim Kugelstrahlen (Bild 12.2.1.6-2, Lit. 17.3-3)	○ einfach ○ preiswert ○ Probe für spätere Kontrollen lagerbar	○ indirekte Messgröße ○ indirekter Bezug zum Bauteil	○ Almenplättchen ○ Vergleichsmessung ○ Verfahrenskontrolle beim Kugelstrahlen
5 Messung an galvanischen Beschichtungen (Bild 18.4-22)	○ Während des Beschichtungsprozesses ○ preiswert	○ indirekter Bezug zum Bauteil ○ kein Verlauf in der Schicht	○ Verzug eines Substratstreifens oder einer Blechwendel ○ Verfahrenskontrolle

Tabelle 17.3.2-1

Beschreibung siehe nachfolgende Seite.

© Axel Possmann - Tupconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Tabelle 17.3.2-1: Eigenspannungen *(Kapitel 18.4) werden in vielen Fertigungsprozessen induziert (z.B. Zerspanung, Verfestigung durch Partikelstrahlen, Beschichten, Schweißen) und/ oder verändert (z.B. abtragende Verfahren wie ECM oder Ätzen, Spannungsarmglühen). Weil sie die dynamische Festigkeit der Bauteile und damit deren Betriebssicherheit beeinflussen, können sie als wichtiger Qualitätsindikator gelten. Eigenspannungen dürfen deshalb gegenüber dem zugelassenen Bauteilzustand nicht unzulässig abweichen. Leider ist bis heute eine befriedigende, auch für komplexe Bauteile, zerstörungsfreie, das gesamte Volumen erfassende Messmethode nicht vorhanden.*

Eine der häufigsten Messmethoden (Bild 18.4-21), weil zerstörungsfrei, ist die ***röntgenografische Methode*** *(„**1**“). Ihr größtes Handicap ist, dass nur* ***Mikroeigenspannungen*** *einer sehr dünnen Oberflächenschicht erfasst werden. Solche Messungen bieten sich im Rahmen der Verfahrensoptimierung (z.B. Zerspanung, Verfestigen) an.*

Zerstörend sind Messverfahren die einen Materialabtrag bzw. Trennschnitt zur Veränderung des Eigenspannungszustands (Abbau) benötigen. Daraus wird der ***Makroeigenspannungszustand*** *ermittelt. Dazu kann die mit DMS bestückte möglichst kleine Bauteilzone herausgetrennt werden („2b“). Eleganter und detailgenauer, z.B. mit einer Bestimmung des Eigenspannungsverlaufs in das Werkstück, ist die Bohrlochmethode („**2a**“) .*

Mit Hilfe der ***Neutronenbeugung*** *(„**3**“) sind bereits Ansätze erkennbar, die einer Makrospannungsmessung im gesamten Volumen eines Bauteils (z.B. einer Turbinenscheibe) nahe kommen. Derzeit sind Aufwand und Kosten jedoch sehr hoch. Deshalb bietet sich das Verfahren nur in Ausnahmen mit höchstem Risikopotenzial an.*

*Weil Eigenspannungsänderungen (Auf- oder Abbau) zum Verzug eines Bauteils führen, lässt sich aus diesem auf Eigenspannungen schließen. Dieses Prinzip wird bei der „**Almenintensitätsmessung**“ („**4**“, Band 3, Bild 12.2.1.6-2) im Rahmen des Verfestigungsstrahlens angewendet. Gemessen wird die Durchbiegung separater, flacher, vor der Behandlung ausreichend eigenspannungsfreier Blechproben. Diese durchlaufen den Verfestigungsprozess mit dem Bauteil.*

Galvanisch abgeschiedene Beschichtungen *können sehr hohe, gefährliche Zugeigenspannungen aufweisen. Um sie zu beherrschen, werden zur Prozessoptimierung und -kontrolle Messverfahren verwendet („**5**“), die an separaten Proben die Eigenspannungen während des Schichtaufbaus bestimmen. Auch dabei dient die Verformung eines dünnen Blechquerschnitts (Bild 18.4-22) unter der Einwirkung der Eigenspannungen als Messgröße.*

Tabelle 13.3.2-2: *Angegeben sind* ***Haftfestigkeitsprüfungen*** *mit entsprechenden, zugehörigen Bildern die in verschiedenen Kapiteln behandelt werden.*

Die ***Messung der quantitativen Haftfestigkeit*** *von Beschichtungen und Klebeverbindungen ist in den* ***meisten Fällen nur zerstörend möglich****. Erfolgt die Messung an separaten Proben („**1**“) ist sie für das Bauteil zerstörungsfrei. Die Aussagen sind für das Bauteil aber nur indirekt und taugen allenfalls für eine Prozessüberwachung. In Ausnahmen wie Belägen aus Elastomeren („**2**“) ist es möglich, den als gut befundenen geprüften Bereich wieder einzukleben. In einem solchen Fall kann man von einer „quasi zerstörungsfreien Prüfung“ sprechen.*

Eine direkte Prüfung am Bauteil ist bei dünnen, zähen metallischen Beschichtungen mit Hilfe des ***Verfestigungsstrahlens*** *(„**3**“) möglich.*

Eine direkte, qualitative, vergleichende Prüfung der Haftfestigkeit an Bauteilen kann mit ***Thermozyklen*** *erfolgen. („**4**“, Bild 17.3.2-2). Sie führen gewöhnlich zur Zerstörung des Bauteils und dienen der statistischen Prozessüberwachung.*

An Lacken ist das ***Gitterschnittverfahren*** *(„**5**“) verbreitet. Dabei wird die Lackschicht von ei-*

© Axel Possmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Vor- und Nachteile der Messmethoden für die Haftfestigkeit und Ablösungen von Beschichtungen und Klebeverbindungen

	Methode	Vorteile	Nachteile	Besonderheiten
1	Indirekte Messung an mitgefertigten Proben: - Zug (Knopfproben) - Flachbiegeproben (Bild 18.8-5)	○ Zerstörungsfrei für das Bauteil	○ indirekt, nicht am Bauteil ○ relativ aufwändig ○ bauteilfremde Einflüsse möglich	dient in erster Linie der Prozessüberwachung
2	Direkte Messung durch Ablösung (Bild 18.8-5, Bild 18.8-6)	○ zerstörungsfrei ○ einfach ○ schnell	○ begrenzte Anwendung ○ nicht ganzflächig	Anwendung bei Elastomeren
3	Direkte Prüfung durch Glasperlen-strahlen (Bild 18.8-6, Bild 16.2.1.6-10)	○ wenn fehlerfrei dann zerstörungsfrei ○ ganzflächig	○ nicht quantitativ ○ aufwändig ○ Gefahr der Schädigung	zähe (galvanische) metallische Beschichtungen (z.B. Silber)
4	Direkte Prüfung mit thermischen Zyklen (Bild 18.8-6)	○ Integrale Prüfung ○ betriebsnah	○ zerstörend ○ teuer/aufwändig ○ vergleichend/ qualitativ	Prüfling wird zerstört, d.h. dient lediglich der statistischen Prozesskontrolle
5	Gitterschnitt, indirekte Prüfung (Bild 18.8-6)	○ einfach ○ am Bauteil	○ qualitativ ○ nicht ganzflächig	Prozessüberwachung von Lackierungen. Lackierung am Bauteil ist zu erneuern
6	Direkte Prüfung mit Ultraschall	○ am Bauteil	○ Voraussetzungen nur in wenigen Fällen ○ aufwändig	Stellt nur Ablösungen fest. Nicht möglich bei porösen und dünnen Schichten
7	Direkte Prüfung mit Ultraschall (Bild 18.8-6)	○ zerstörend ○ am Bauteil ○ an einer separaten Probe	○ Voraussetzungen nur in wenigen Fällen ○ aufwändig	Schicht wird zerstört. Prüft das Verhalten bei hochfrequenten Schwingungen
8	Direkte Messung mit Thermografie (Bild 18.8-6)	○ am Bauteil ○ zerstörungsfrei ○ einfach ○ ganzflächig	○ stellt nur Ablösungen fest	Abhängig von auswertbaren Temperaturgradienten

Tabelle 17.3.2-2

nem orienterten „Kratzergitter“ geschädigt und eventuelle Abblätterungen bewertet.

***Haftfestigkeitsprüfungen mit Ultraschall** sind auf unterschiedliche Weise möglich. Mit dem **Echoverfahren** lassen sich lediglich bereits vorhandene Ablösungen (Haftfestigkeit = 0) an geeigneten Schichten (dicht, ausreichend dick) nachweisen („**6**“). In diesem Fall ist bei Zugänglichkeit die gesamte Beschichtungs-*

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

fläche prüfbar. Die Prüfung kann als zerstörungsfrei gelten.
*Einen qualitativen örtlich begrenzten Hinweis auf die Haftfestigkeit spröder keramischer und/ oder poröser Beschichtungen wie thermisch gespritzte Wärmedämmschichten oder Einlaufschichten, erhält man mit Ultraschallschwingungen. Das ausreichend dünnwandige Bauteil oder die Probe wird von der Rückseite intensiv mit einer Ultraschallsonde angeregt („**7**“), bis es zur Ablösung der Schicht kommt.*
*Ein Verfahren, mit dem die gesamte Beschichtungsfläche auf relativ einfache Weise zerstörungsfrei nach örtlichen Schichtablösungen überprüft werden kann, ist die **Thermografie** („**8**“). Das Verfahren ist nach ausreichender Optimierung einfach und preiswert. Das Ergebnis lässt sich fotografisch dokumentieren.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 17.3

17.3-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 193-221.

17.3-2 D.M.Walker, R.Y. Hom, „Residual Stress Analysis of Aircraft Aluminium Forgings“,Zeitschrift „Advanced Materials & Processes“ , June 2002, Seite 57-60.

13.7-3 J.Horowitz, „Das ‘Shot-peening’-Verfahren“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 32 (1978) 7, Seite 285-292.

13.7-4 R.E.Green Jr, „Non-Destructive Methods for the Early Detection of Fatigue Damage in Aircraft Components“, AGARD Lecture Series No. 103 „Non-Destructive Inspection Methods for Propulsion, System and Components“, 23-24 April 1979, London, UK, und 26-27 April Milan, Italy, Seite 6.1-6.31.

13.7-5 K.Nitzsche, „Schichtmesstechnik“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

13.7-6 W.Dettner, I.Elze, „Handbuch der Galvanotechnik“, Seite 258-295.

13.7-7 A.K.Koul, R.V.Dainly, „Fatigue Fracture of Aircraft Engine Compressor Disks“, „Handbook of Case Histories in Failure Analysis“, Seite 241-250.

17.3-8 W.D.Rummel, P.H.Todd Jr.,R.A.Rathke, W.L.Castner , „The Detection of Fatigue Cracks by Nondestructive Test Methods“, Zeitschrift „Materials Evaluation“., 1974, No. 32, Seite 205-212.

17.3-9 D.S.Forsyth, A.Fahr, „The Sensitivity and Reliability of NDI Techniques for Gas Turbine Component Inspection and Life Prediction“, NRC/IAR Report, LTR-ST-2055, July 1996.

17.3-10 N.G.H. Meyendorf, P.B.Nagy, S.I.Rohklin, „Nondestructive Materials Characterization with Applications to Aerospace Materials“, Springer-Verlag, 2004, Springer Series „Materials Sciences“ 67, ISBN 3-540-40517-8.

17.3-11 ASM, „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11, Failure analysis and Prevention“, 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 11-71.

17.3-12 L.Engel, H.Klingele, „An Atlas of Metal Damage“, Wolfe Science Books/Carl Hanser Verlag Munich, 1981, ISBN 0-7234-0750-9.

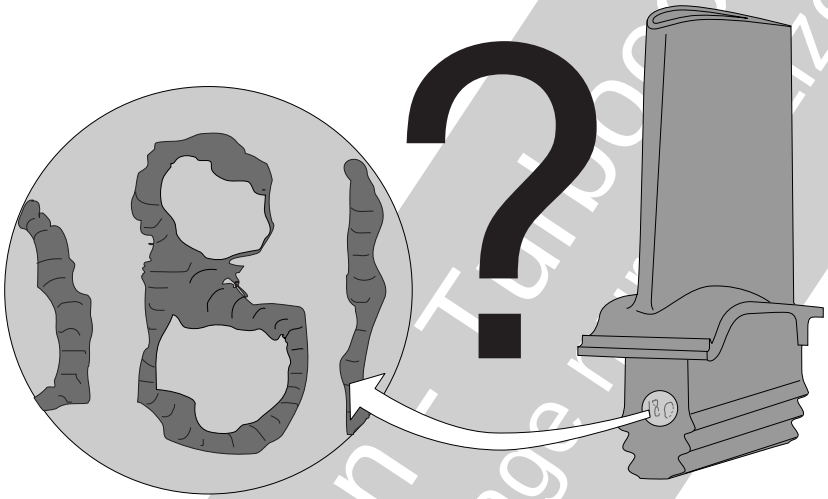
17.3-13 A.Rossmann „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 3, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Bild 12.6.1-3.

© Aero Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

17.4 Kennzeichnung von Bauteilen

Unleserliche Kennzeichnung gefährdet die Rückverfolgbarkeit und so die Qualitätssicherung.



Die Kennzeichnung (Signierung) von Bauteilen (engl. **Direct Part Mark** = **DPM**) ist ein Eckpfeiler des Qualitätssicherungsystems im Triebwerkbau. Sie ermöglicht die Identifikation, Rückverfolgbarkeit und Zuordnung in Rohteilherstellung, Fertigung, Nacharbeiten, Qualitätssicherung und Einschränkungen in der Verwendbarkeit von Bauteilen. Treten Schäden oder Probleme auf, so sind die Voraussetzungen zum Einschätzen von Risiken und für gezielte Abhilfen gegeben.

Meist handelt es sich um Buchstaben- und Ziffernfolgen. Gießereien kennzeichnen an nicht zu bearbeitenden Flächen auch mit einem eingegossenen Firmenemblem. In Einführung sind Kennzeichnungen in Form von Rastern (2D-Data-Matrix, Bild 13.4-4) die eine große Informationskapazität aufweisen und eines Lesegeräts bedürfen (**Direct Part Mark Identification = DPMI**). Weiterer Vorteil gegenüber der Schrift ist eine geringere Empfindlichkeit gegen Beschädigungen. Kennzeichnungen an Neuteilen ziviler und militärischer (im Text „m“) Triebwerkskomponenten können sich unterscheiden. Sie erhalten je nach Sicherheitsanforderungen (Tabelle 13.4-1) typische Informationen:

- **Sachnummer/Zeichnungsnummer/Teilenummer** (engl. **Part Number = PN**): Identifiziert das Bauteil und damit alle zugehörigen Vorschriften.
- **Kennzeichnung von Varianten/Nacharbeiten**: Lässt gegebenenfalls Abweichungen von der Zeichnung identifizieren
- **Kode/Kennzeichen (m) zur Herstelleridentifikation:** Jedem Hersteller von Fertigteilen ist eine Kennzeichnung aus Buchstaben und einer Zahl zugeordnet. Rohteilhersteller, insbesondere von Gussteilen, verwenden Firmenembleme an später nicht bearbeiteten, funktionsunwichtigen Bauteilzonen („integrale Kennzeichnung“). Projektbezogen (m).
- **Stück-Nummer** (engl. Serial Number = SN): Lässt auf das Fertigungslos rückschließen. Dies ist von besonderer Bedeutung, um Bauteile mit möglichen Abweichungen einzugrenzen und Abweichungen gegenüber anderen Fertigungslosen zu erkennen.
- **Chargen-Nr** (engl. **Heat Code/Suffix-Nr**): Nummer einer Rohteilcharge und Lage in einem Rohteil (z.B. Block, Bild 11.2.2.1-11, Bild 11.2.2.1-12 und Bild 11.3-11).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

- **Herstellungsdatum-Kode**. Bei Elastomeren mit eingeschränkter Lagerungszeit.
- **Sonderzulassungen**: Z.B. nur für Bodenläufe (engl. **Ground Use Only = GUO**) oder Kennzeichnung für eine zugelassene Abweichung.
- **Kennzeichen für zerstörungsfreie Prüfungen** und die **verantwortlichen Prüfer bzw. Prüfstellen**.
- **Position von Bauteilen für die Montage** (z.B. Rotorkomponenten, z.B. „TOP“) um z.B. einen Wuchtzustand reproduzierbar zu machen. Zur Rekonstruktion von Positionen gleicher Bauteile (Schaufelpositionen an Rotoren).

Hinzu kommen weitere nachträgliche Kennzeichnungen im Betrieb, wenn z. B. Sonderprüfungen oder bestimmte Reparaturverfahren zur Anwendung kamen. An Hand dieser Beschriftungen ist es möglich, bei sicherheitsrelevanten Bauteilen wie Rotorkomponenten den gesamten Herstellungsprozess, angefangen von der Erschmelzung bis zur Neuteilauslieferung nahezu lückenlos zu rekonstruieren. Massenteile wie Schrauben lassen dagegen auf Grund einer eingeschränkten Kennzeichnung meist nur auf den Hersteller schließen.

Wie beschrieben hat eine Kennzeichnung große Bedeutung für die Triebwerkssicherheit. Aus diesem Grund muss die Kennzeichnung ausreichend gut lesbar sein. **Verwechslungen oder unsichere Identifikation können zu hohen Risiken** (z.B. im Schadensfall zur Eingrenzung der Risiken), Zeitverlust und Kosten führen.

Für Kennzeichnungen gibt es eine Vielzahl von Verfahren (Bild 17.4-3, Tabelle 17.4-2). Sie können direkt oder indirekt das Bauteilverhalten, z.B. die Schwingfestigkeit auf Grund einer Kerbwirkung, beeinflussen. Aus diesem Grund ist von Kennzeichnungsverfahren die gleiche Stabilität wie von Fertigungsprozessen zu verlangen. Zusätzlich legt der Konstrukteur den Bereich des Bauteils in der Zeichnung fest, in dem die Markierung vorgenommen werden darf (Bild 17.4-2). Es handelt sich um möglichst niedrig betriebsbelastete Zonen. Diese Bereiche sind unbedingt einzuhalten. Falls das nicht möglich ist (zu kleine Fläche), muss von den zuständigen Fachabteilungen, insbesondere der Konstruktion, eine ausreichend dokumentierte Genehmigung vorliegen.

Werden im Fertigungsablauf oder bei einer Nacharbeit (Kapitel 17.5) notwendige Kennzeichnungen entfernt oder unleserlich (Zerspanung, Strahlbehandlung), sind diese nachher wieder geeignet anzubringen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

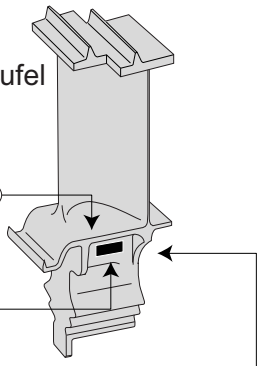
Tabelle 17.4-1: *Im Triebwerksbau richtet sich die* ***Kennzeichnungspflicht*** *und der Umfang des Dateninhalts nach der Sicherheitsrelevanz bzw. der* ***Sicherheitsklasse*** *des Bauteils bzw. der Baugruppe. Der Dateninhalt kann aus Vorschriften entnommen werden.*

Fertigung: Qualitätssicherung Kennzeichnung von Bauteilen

Sicherheits-klasse der Teile	Fertigteile: Bauteile, Verbundgruppen, Baugruppen	Stück-Nummer/ Serial-Number pflichtig
1A	Kritische rotierende Teile **mit** begrenzter Lebensdauer zyklisch, LCF/Thermoermüdung und/oder Kriechen. Ein Versagen kann für das Fluggerät eine direkte oder indirekte **unmittelbare Gefahr** darstellen (**Hazardous Effect**).	Ja
1C	Kritische rotierende und statische Teile **ohne** begrenzte Lebensdauer. Ein Versagen kann für das Fluggerät eine direkte oder indirekte **ernsthafte Gefahr** darstellen (**Hazardous Effect**).	Ja
2S	Teile, deren Versagen **ernsthafte Folgen** (**Major Effects**) für die Triebwerksleistung und die Betriebssicherheit haben kann.	Ja
2B/S	Schaufeln, deren Versagen **ernsthafte Folgen** (**Major Effects**) für die Triebwerksleistung und die Betriebssicherheit haben kann.	Ja
2B/L	Teile, deren Versagen **ernsthafte Auswirkungen** (**Major Effects**) für die Triebwerksfunktion und -leistung haben kann. Sie erhalten jedoch aus **wirtschaftlichen oder organisatorischen Gründen** keine Stück-Nummer.	nein
2L	Teile in der Erprobungsphase, deren Lebensdauer **noch unbekannt** ist und aus wirtschaftlichen Gründen noch Erfahrungswerte ermittelt werden müssen, ab der Endprüfung.	Ja
2R	Erprobungsteile für die Versuchsaufbauten (RIG-Teile) deren Laufzeiten überwacht werden müssen.	Ja
2N	Teile die aus wirtschaftlichen Gründen oder Platzgründen keine Stück-Nummer erhalten ("Schüttware", z.B. Schrauben). In Ausnahmefällen kann zur Rückverfolgbarkeit eine Kennzeichnung angebracht werden.	nein
unklassifiziert	Teile, deren Ausfall die Triebwerksleistung oder die Zuverlässigkeit **nicht ernsthaft beeinträchtigt**. Teile, die einer Langzeitüberwachung unterliegen	nein
Wichtig: Diese Tabelle enthält lediglich Hinweise. Grundsätzlich sind die aktuellen Vorschriften zu beachten		

Tabelle 17.4-1

Forderungen an Markierungen bzw. Verfahren zu deren Anbringung.



- Enthält alle geforderten Informationen.
- Gut anzubringen und gut lesbar: Keine falsche Interpretierbarkeit.
- Dauerhaftig unter Betriebsbedingungen:Temperatur, Oxidation, Erosion
- Keine bedenklichen Festigkeitseinbußen
- Keine negativen Auswirkungen bei nachfolgenden Fertigungsprozessen: Keine Korrosion, keine Probleme bei Beschichtungen (z.B. galvanische Verfahren), keine Schädigung bei Temperatureinwirkung (z.B. Wärmebehandlung, Lötung)
- Keine Beeinträchtigung der Montage: Unzulässige Toleranzveränderung bei Passflächen (Zentrierflächen). Keine Beeinträchtigung der Auflage von Fügeflächen (z.B. an Flanschen).
- Keine Beeinträchtigung des Betriebsverhaltens der Bauteile wie Schwingfestigkeit, Korrosion, Oxidation.
- Keine Beeinträchtigung der Reparatur durch Einschränkungen und/oder unzureichende Lesbarkeit: z.B. Reinigungsverfahren (Ätzen, abrasives Strahlen), Beschichtungen, Lötungen.

Bild 17.4-1

Bild 17.4-1: *Die Forderungen an eine* ***Markierung*** *bzw. das anzuwendende Verfahren (Tabelle 13.4-2 und Tabelle 13.4-3) richtet sich nach sehr unterschiedlichen* ***Vorgaben*** *aus dem gesamten Lebenszyklus.*

Konstruktion*: Lage der Kennzeichnung in einer möglichst niedrig belasteten Bauteilzone die negative Auswirkungen auf das Bauteilverhalten in Montage, Betrieb und bei einer Reparatur ausschließt.*

Fertigung: *Einfache und sichere Anbringung mit möglichst geringem Aufwand.*

Logistik*: Ausreichender Informationsinhalt, nicht zuletzt für eine ausreichende Rückverfolgbarkeit im Schadensfall. Gute und sichere Lesbarkeit. Hierzu gehören auch Kennzeichnungen die der Teileverfolgung in der Fertigung dienen.*

Montage: *Kennzeichnungen, die eine Bauteilposition (z.B. Wuchtposition, Lage) anzeigen, sind für die Montage notwendig. Ihre Position am Bauteil ist meist mit dem Informationsinhalt vorgegeben. Auch ist darauf zu achten, dass Kennzeichnungen nicht an Auflageflächen und eng tolerierten Passungen angebracht werden. Erzeugen Markierungsverfahren einen Aufwurf, besteht die Gefahr von Spannungsspitzen. Die Auflage von Flanschen könnte sich im Betrieb setzen und die Verschraubung lockern. Entstehen Spalte, ist mit Undichtigkeiten zu rechnen.*

Betrieb*: Keine Beeinträchtigung des Betriebsverhaltens. Im Vordergrund steht die Bauteillebensdauer bzw. Sicherheit und die Funktion (z.B. aerodynamische Anforderungen). Dabei muss gewährleistet sein, dass die Kennzeichnung nicht unzulässig verändert wird, z.B. durch Oxidation oder Verschleiß. Falls wegen Problemen Bauteile im eingebauten Zustand zu identifizieren sind, ist eine von außen er-*

© Axel Kossmann

kennbare (z.B. Boroskopie) Kennzeichnung von Vorteil.
Reparatur: *Verfahren wie Hochtemperaturlöten, abrasives Strahlen, Ätzen (vor der Eindringprüfung) oder Diffusionsbeschichten können auf den Bereich der Kennzeichnung einwirken. Dabei kann die Lesbarkeit der Markierung so leiden, sodass zumindest Fehlinterpretationen begünstigt werden.*

Bild 17.4-2: *Der* ***Kennzeichnungsvorgang hat Vorgaben*** *zu folgen. Sie müssen dem, der die Art der Kennzeichnung festlegt, gewöhnlich dem Konstrukteur, geläufig sein.*

Montage- und Zentrierflächen: *Prägende Kennzeichnungsverfahren werfen Material das verdrängt wurde auf. Diese Erhebungen können eine Anlage von Flanschflächen („**1**“) verhindern, ein Spalt entsteht. Durch diesen Spalt kann an Gehäusen oder Leitungen unter Innendruck eine Leckströmung entstehen, die sich auf unterschiedliche Weise schädlich auswirkt:*
- ***Heißgasaustritt*** *mit der Gefahr von Überhitzungen und Feuer.*
- ***Öl- oder Kraftstoffaustritt*** *mit Feuer.*
- *Verschlechterte Wirklungsgrade bei Leckverlusten.*
- ***Eindrücke mit Kerbwirkung*** *schädigen Flanschflächen. Mikrobewegungen können diesen Effekt verstärken.*
- ***Örtliche hohe Flächenpressungen*** *mit Spannungskonzentration und Kerbwirkung.*
- ***Setzen der Flanschverbindung*** *kann unterschiedliche Folgen haben: Lockerung, Reibverschleiß (Fretting), Unwuchten an Rotoren, dynamische Überlastung der ungenügend vorgespannten Verschraubung.*

Ähnliche Überlegungen gelten für formschlüssige Auflageflächen wie an ***Tannenbaum- („3“) und Schwalbenschwanzfüßen****. Solche Flächen sind besonders hoch schwingbelastet, d.h. bereits bei geringer Kerbwirkung treten gefährliche Spannungen auf.*
Zentrierflächen *(„**2**“) wie Ringflächen an Rotorscheiben sind eng toleriert. Die Fügung bei der Montage ist erschwert. Entstehen* ***Axialriefen*** *als Folge von Fressvorgängen und/oder Verschleißspuren, besteht so die Gefahr eines LCF-Anrisses. Besonders gefährdet sind* ***dünne rotierende Ringquerschnitte mit großem Durchmesser,*** *in denen hohe Tangentialspannungen zu erwarten sind.*
Es empfiehlt sich also nach Möglichkeit immer, störende Aufwerfungen zu vermeiden und gegebenenfalls behutsam, nach Vorschrift, zu entfernen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Qualitätssicherung Kennzeichnung von Bauteilen

Gute Lesbarkeit *erfordert eine ausreichende Markierungsgröße bzw. Zeichengröße. Das bedeutet gute Zugänglichkeit für das Markierungsverfahren und den Lesevorgang. Zusätzlich muss die Dauerbeschriftung* ***gegen Betriebseinflüsse ausreichend geschützt positioniert*** *sein.*

Bauteilbelastung*: Kennzeichnungen sollten generell* ***nicht in hochbeanspruchten, insbesondere lebensdauerbestimmenden Bauteilzonen*** *angebracht werden. Selbst an relativ kleinen hochbeanspruchten Bauteilen mit vielen Funktionsflächen (Auflagen, aerodynamisch wirksam) sollten sich für eine Kennzeichnung geeignete Flächen finden lassen (Beispiele im Rahmen). Letztendlich kann nur der Konstrukteur bzw. die Festigkeitsabteilung geeignete Flächen angeben und im fraglichen Fall ungeeignete explizit für eine Beschriftung ausschließen. Zu ungeeigneten Bereichen zählen die relativ großflächigen Naben von Rotorscheiben („**4**“). Diese können grundsätzlich als dynamisch (LCF-) hochbeansprucht gelten. Weder in der Bohrung noch auf den Stirnseiten darf ohne ausdrückliche Genehmigung der zuständigen Fachabteilungen eine Kennzeichnung vorgenommen werden. Auch Markierungen am Scheibenkranz, dicht unterhalb der Schaufelnuten, wo immer von hohen Tangentialspannungen ausgegangen werden muss, sind zu unterlassen.*
Gundsätzlich sind ***Kanten für die Beeinflussung einer Kennzeichnung tabu****. Sie stehen immer im Verdacht hoher Beanspruchungen mit einer Neigung zu Eckenrissen. Ein* ***Mindestabstand zwischen Kennzeichnungsfeld*** *und Kante ist deshalb grundsätzlich (Rahmen, rechte Skizze, „5“) einzuhalten.*
Typische beschriftungsgeeignete Bauteilzonen sind beispielhaft an Verdichter- und Turbinenrotorschaufeln im Rahmen dargestellt.

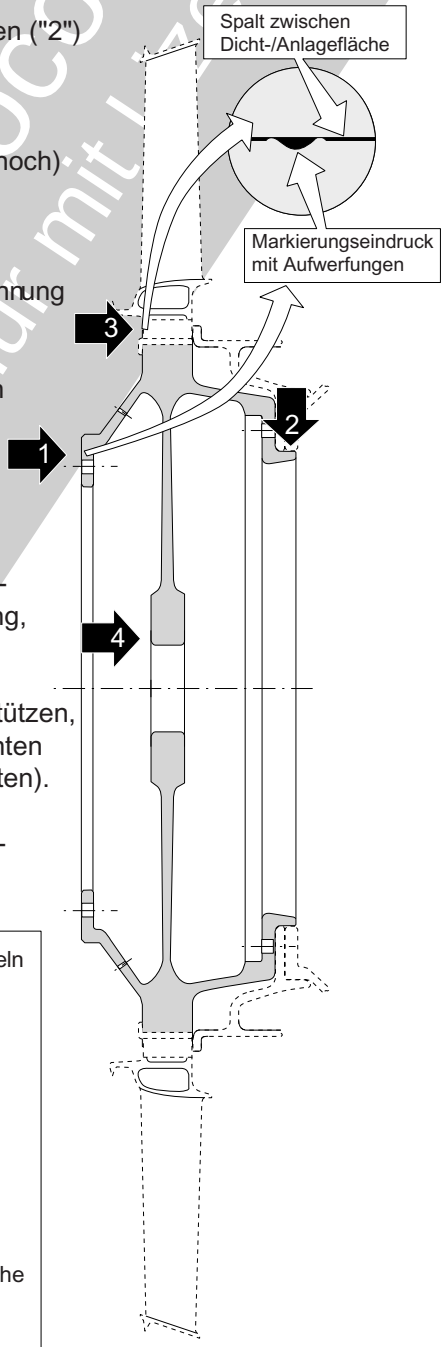
Oberflächen mit Beschichtungen *wie Diffusionsschichten oder Auflageschichten (z.B. galvanische Schichten) stehen für eine nachträgliche Kennzeichnung gewöhnlich nicht zur Verfügung. Insbesondere auf* ***spröden Schichten wie Al-Diffusionsschichten*** *für den Oxidationsschutz von Heißteilen darf nicht gekennzeichnet werden. Gegebenenfalls besteht die Möglichkeit einer Kennzeichnung vor der* ***Beschichtung.*** *Es ist jedoch anzumerken, dass der Beschichtungsprozess nicht von der Kennzeichnung gestört werden darf. Denkbar ist z.B. die Behinderung einer galvanischen Abscheidung oder der Diffusion für eine Diffusionsschicht mit einer Farbkennzeichnung.*
Bauteilsteifigkeit *und -festigkeit müssen ausreichend sein, eine Überlastung, insbesondere eine plastische Verformung beim Markierungsvorgang zu verhindern. Plastische Verformungen mit Schädigungen können je nach Auflage und Einspannung, in Bauteilzonen auftreten, die nicht im Bereich der Markierung liegen (Bild 17.4-3). Es ist durchaus möglich, bei Bauteilen mit einer komplexen Geometrie, auf den ersten Blick keinen Zusammenhang zwischen beiden Bereichen zu erkennen. Beispiele für besonders filigrane Bauteile sind integrale Verdichterleitapparate, Blechteile wie sie in Brennkammern üblich sind, gekühlte Turbinenschaufeln und dünnwandige Gehäuse. Die Folge einer plastischen Verformung ist vordergründig Verzug und damit ungenügende Maßhaltigkeit. Plastische Verformung bedeutet aber auch den Aufbau von Eigenspannungen die bei Zug (Rückfedern, Bild 18.5-13) die Schwingfestigkeit gefährlich absinken lassen können. Erschwerend kann hinzu kommen, wenn sich* ***in spröden Schichten Risse*** *bilden, deren Kerbwirkung die Schwingfestigkeit deutlich herabsetzt. Selbst wenn die Risse in einer niedrig betriebsbeanspruchten Zone liegen (Bild 18.5-11), können sie eine Schutzwirkung der Beschichtung unzulässig verschlechtern. An Heißteilen ist verstärkte örtliche Oxidation zu erwarten. Spröde Auflageschichten wie Wärmedämmschichten können sich bereits bei ausreichender elastischer Verformung des Grundwerkstoffs unbemerkt ablösen und im Betrieb überraschend früh versagen.*

© Axel Rossmann - TU Chemnitz
Lizenz: Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen

Fertigung: Qualitätssicherung Kennzeichnung von Bauteilen

Was beim Kennzeichnungsvorgang berücksichtigt werden sollte.

- Keine Kennzeichnung an Montageflächen ("1"), Zentrierflächen ("2") und Auflageflächen (z.B. Schaufelfüße, "3"): Gefahr der Beeinflussung von Spielen und Konzentrizität.
- Dauerkennzeichnungen müssen möglichst deutlich (1-4 mm hoch) und haltbar angebracht werden. Keine Beeinträchtigung der Funktions- und Maßeigenschaften des Bauteils.
- Keine die Festigkeitseigenschaften beeinflussende Kennzeichnung an Flächen in lebensdauerrelevanten Bauteilzonen ("4").
- Mindestabstand von 0,8 mm zu Kanten und Übergangsradien einhalten ("5").
- Neukennzeichnungen neben ursprünglicher Kennzeichnung mit gleich großen Schriftzeichen.
- Kennzeichnung vor Oberflächenbehandlungen wie Diffusionsbeschichtung (z.B. Inchromieren), elektrolytische Beschichtung, Elektropolieren, Farben- und Lackaufbringung.
- Filigrane Bauteile geeignet gegen Kennzeichnungskräfte abstützen, sonst Verzugsgefahr und/oder Rissbildung an spröden Schichten auch außerhalb der Kennzeichnung (z.B. Al-Diffusionsschichten).
- Nach Möglichkeit störende Aufwerfungen durch die Metallverdrängung vom Kennzeichnen sorgfältig entfernen.



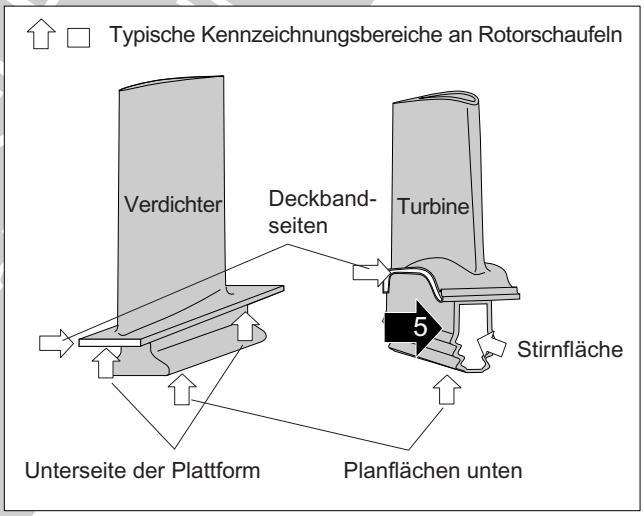


Bild 17.4-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

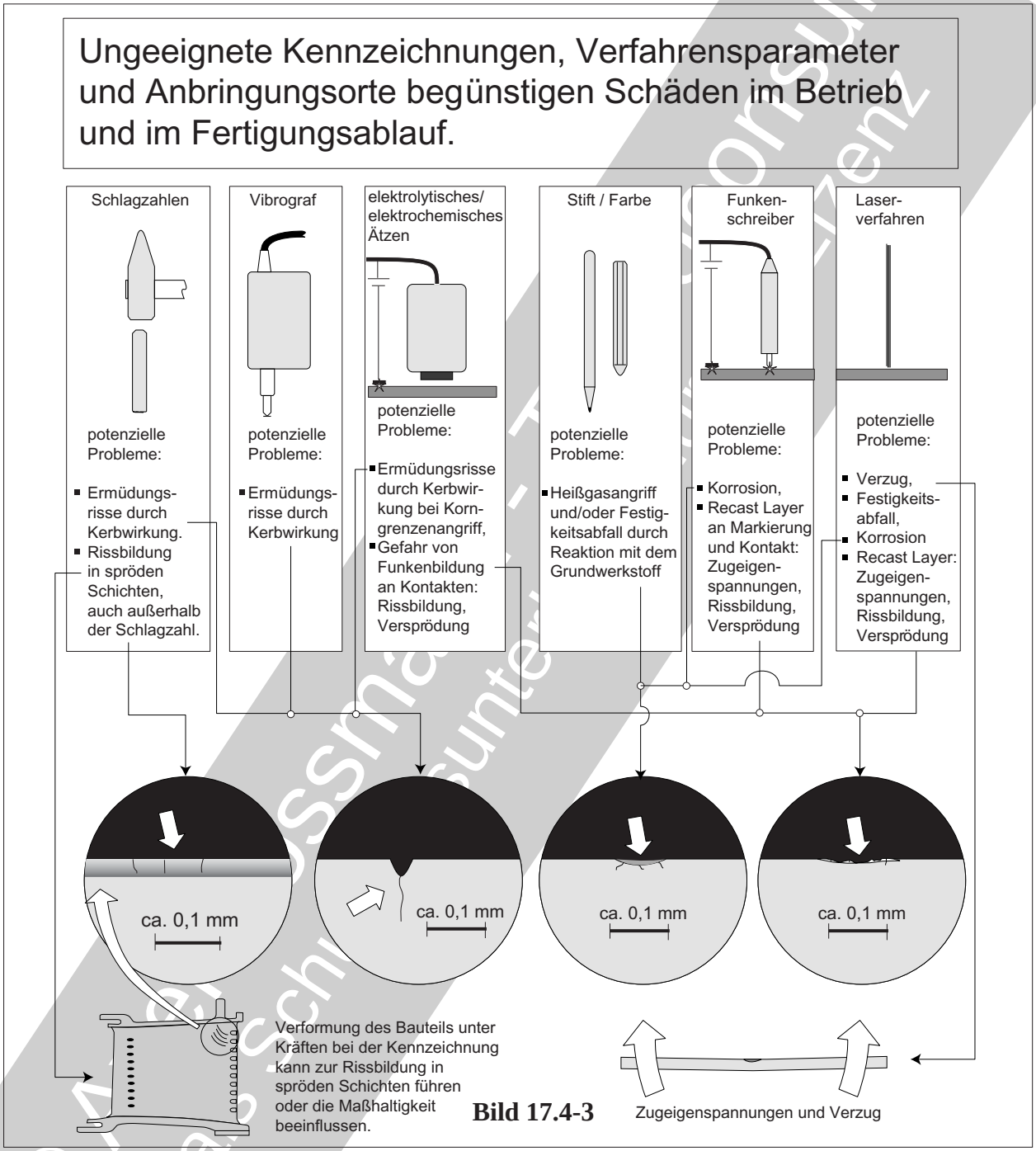


Bild 17.4-3

Bild 17.4-3: Kennzeichnungsverfahren *unterscheiden sich neben Eigenschaften wie Lesbarkeit, Zeitaufwand und Kosten auch in potenziellen Schädigungsmöglichkeiten (siehe auch Tabelle 17.4-2 und Tabelle 17.4-3).*

Schlagzahlen: *Die vergleichsweise tiefen Einkerbungen begünstigen mit ihrer Kerbwirkung Schwinganrisse. Dies gilt insbesondere für Thermoermüdung. Offenbar wird eine schützende Verfestigung im Schlagzahlenbereich abgebaut, sodass sich die Kerbe voll auswirkt. Unmittelbar an den Einschlagzahlen ist mit günstigen Druckspannungen zu rechnen. Trotzdem wurden an Schlagzahlen in Turbinenschaufeln aus einer Ni-Schmiedelegierung* ***beim Elektropolieren Risse*** *beobachtet, wahrscheinlich Spannungsrisskorrosion.*
Die Krafteinwirkung beim Einschlagen können filigrane, nicht ausreichend unterstützte Bau-

teile auch außerhalb der Markierung überlasten bzw. plastisch verformen und Rissbildung in spröden Beschichtungen auslösen (Detail unten links, Bild 17.4-2).
Von Schlagzahlen ist ein merklicher Aufwurf um die Markierungen zu erwarten, der an Füge-, Zentrier-, Dicht- und Auflageflächen nicht akzeptiert werden kann.

Vibrograf: *Diese Kennzeichnung mit einer vibrierenden Hartmetallnadel kann ähnlich wie Schlagzahlen, wenn auch nicht so intensiv, zu einer merklichen* ***Kerbwirkung*** *führen. Im Bereich einer Markierung auf spröden Schichten wie Al-Diffusionsschichten, ist mit* ***Mikrorissbildung*** *und einem deutlichen Schwingfestigkeitsabfall zu rechnen. Auch hier ist, wie bei allen elektrisch betriebenen Verfahren, eine versehentliche* ***Funkenbildung*** *mit fehlerhafter Ausrüstung (Kabel) unbedingt zu vermeiden.*

Elektrolytisches/elektrochemisches Ätzen *(engl. Electro-Chemical Etching = ECE): Zu beachten ist, dass der Werkstoff nicht geschädigt wird (Al-Mg-Legierungen). Ein Korngrenzenangriff muss auf jeden Fall mit geeigneten Verfahrensparametern ausgeschlossen werden. Der durchaus merkliche, wenn auch kurzfristige, Stromfluss kann an schlechten Kontakten mit* ***Funkenbildung*** *das Bauteil schädigen (Bild 18.6-2). Die Erfahrung zeigt, dass unachtsames Umgehen mit der Stromzufuhr zum Bauteil oder beschädigte Kabel (zum Werkzeug, zum Bauteil) schädliche Funkenbildung auslösen (Bild 18.6-7).*

Funkenschreiber: *Dieses Verfahren arbeitet mit elektrischen Funken. Das Prinzip entspricht in seiner Auswirkung auf die Oberfläche der funkenerosiven Bearbeitung. So ist mit den Schädigungen im Bereich der wiedererstarrten Zone (Recast Layer, Band 3, Bild 12.2.1.2-1 und Bild 12.2.1.2-5) zu rechnen:* ***Versprödung, hohe Zugeigenspannungen, Mikrorissbildung****. Sie bedingen einen deutlichen Schwingfestigkeitsabfall der den Einsatz des Verfahrens generell nicht ratsam macht und an hochbeanspruchten Bauteilen ausschließen sollte. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass sich im* ***Kontaktbereich der Stromzufuhr*** *zum Werkstück (meist lediglich über eine metallische Blechauflage) gefährliche Funken bilden.* ***Fehlerhafte Stromkabel*** *können auch an Bauteilzonen weit außerhalb der Markierung Funken entstehen lassen (Bild 18.6-7).*

Laserverfahren: *Schmilzt und/oder verdampft die Oberfläche, ist mit ähnlichen Schädigungen wie bei Verfahren mit elektrischen Funken zu rechnen.* ***Risse, Versprödung und hohe Zugeigenspannungen*** *sind bereits bei scheinbar niedriger Strahlenergie zu erwarten (Lit. 17.4-1). Selbst das sog.* ***Laser Coloring****, mit dem Anlassfarben als Markierung erzeugt werden, kann zu Gefügeveränderungen führen. Bei manchen Werkstoffen ist eine Sensibilisierung denkbar. Das macht sie für interkristalline Korrosion empfindlich (Band 3, Bild 12.2.1.3-1). Auch mit Zugeigenspannungen und einem Schwingfestigkeitsabfall ist zu rechnen.*

Stifte und Farben: *Mit ihnen werden im Gegensatz zu den bereits behandelten „permanenten" Verfahren, kurzzeitige Kennzeichnungen aufgebracht. Es besteht die Gefahr, dass nicht zugelassene Farben zum Einsatz kommen. Bestandteile wie Kohle, Zink, Kupfer oder Blei reagieren bzw. diffundieren während der Fertigung (z.B. Wärmebehandlung, Bild 18.3-4) oder im Betrieb mit dem Bauteilwerkstoff. So können sich Eigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit oder Oxidationsbeständigkeit verschlechtern.*

© AMB Ossmann Turbo Consult
als Grundlage für Übungen mit Lizenz

Fertigung: Qualitätssicherung
Kennzeichnung von Bauteilen

Anwendung	Kennzeichnungsverfahren	Eignung und Besonderheiten des Verfahrens
Dauerkennzeichnung	Prägen/ Einpressen, Warmpressen	**Geeignet:** Für die Prägekraft abstützbar, ausreichend robuste Gussteile und Schmiedeteile, Teile aus Stangen (z.B. Schrauben) und Blechen (z.B. Befestigungslaschen), Schaufeln. **Bedenken:** Kerbwirkung (Abfall der Schwingfestigkeit). Aufwurf, nicht auf Anlageflächen und aerodynamisch wirksamen Flächen.
	Einwalzen	**Geeignet:** Auch für sphärische Flächenformen. **Ungeeignet:** Bei Querschnitten die im Betrieb Verschleiß unterliegen. **Bedenken:** Kerbwirkung (Abfall der Schwingfestigkeit). Aufwurf, nicht auf Anlageflächen und aerodynamisch wirksamen Flächen.
	Elektrolytisch/ Elektrochemisch	**Geeignet:** Viele metallische Werkstoffe auch von hochbelasteten Bauteilen wie Druckrohren (Kraftstoff, Öl, Luft), Wälzlagerringe, Titanteile. Weil keine nennenswerten Kräfte auftreten, auch geeignet für filigrane Bauteile (z.B. < 1,25 mm Wandstärke). **Ungeeignet:** Für Leichtmetalle wie Al- und Mg-Legierungen und gehärtete Stähle (schädigender Angriff möglich).
	Gravieren (maschinell)	**Geeignet:** Für gering beanspruchte Blechquerschnitte mit >1,25 mm Wandstärke und Erzeugnisse aus Stangenmaterial. **Ungeeignet:** Für Leichtmetalle wie Al- und Mg-Legierungen und gehärtete Stähle. **Bedenken:** Kerbwirkung (Abfall der Schwingfestigkeit).
	Integrale Kennzeichnung	**Geeignet:** Für spanlos hergestellte Rohteile wie Guss- und Schmiedeteile. Wird z.B. bereits in der Modellform beim Feinguss angebracht. **Ungeeignet:** Wenn die Kennzeichnungsfläche nachträglich abgearbeitet wird, oder eine unzulässige Kerbwirkung auftreten kann.
	Schlagstempel	**Geeignet:** Rohteile wie Guss- und Schmiedeteile und Teile aus Bändern und Stangen. **Ungeeignet:** Zu harte Werkstoffe (>45 HRC), dünnwandige Teile , bei Leichtmetallen (Al- und Mg-Legierungen) < 6,5 mm (Verformungs- und Rissgefahr). **Bedenken:** Kerbwirkung (Schwingfestigkeitsabfall), Rissbildung (SpRK, IK) in galvanischen oder Ätzbädern. Aufwurf, nicht auf Anlageflächen und aerodynamisch wirksamen Flächen.
	Vibrogravieren, Schlagpunkte	**Geeignet:** Wird für hochbeanspruchte Bauteile empfohlen, jedoch nicht höchstbeanspruchten bzw. lebensdauerbestimmenden Zonen. Vor dem Härten anbringen. Auch an Teilen mit Hochtemperaturlack (anorganisch Al-gefüllt) möglich. **Ungeeignet:** Zu harte Werkstoffe (>45 HRC), dünnwandige (<1,25 mm) Teile **Bedenken:** Kerbwirkung (Schwingfestigkeitsabfall). Aufwurf, nicht auf Anlageflächen und Flächen in Strömungen (Strömungsstörung).
	Laserverfahren -coloring	**Geeignet:** Für metallische Werkstoffe die Anlauffarben bilden. Wanddicke>2,5 mm sonst Verzugsgefahr. Für Oberflächen mit einer Rauigkeit < 0,012 mm. **Bedenken:** Festigkeitsabfall durch Anlasseffekt an gehärteten Stählen, Sensibilisierung (IK) von CrNi-Stählen. Zugeigenspannungen (SpRK, Schwingfestigkeitsabfall).
	Laserverfahren -etching	**Geeignet:** Für metallische Werkstoffe. Tiefenwirkung ca. 0,025 mm. Nicht für höchstbeanspruchte Bauteilbereiche. Heißteile bis ca. 1100 °C. Querschnittsdicke > 2,5 mm wegen Verzugsgefahr. **Bedenken:** Bildung einer Wiedererstarrungszone (engl. Recast Layer) mit Mikrorissen und hohen Zugeigenspannungen, d.h. merklichem Schwingfestigkeitsabfall.
	Laserverfahren -engraving	**Geeignet:** Für metallische Werkstoffe. Tiefenwirkung ca. 0,025 mm. Nicht für höchstbeanspruchte Bauteilbereiche. Heißteile bis ca. 1100 °C. Querschnittsdicke > 2,5 mm wegen Verzugsgefahr. **Bedenken:** Obwohl nicht so schädigend wie Laseretching, trotzdem besteht bei manchen Werkstoffen die Gefahr von Mikrorissen mit Schwingfestigkeitsabfall.
Wichtig: Diese Tabelle enthält lediglich Hinweise. Grundsätzlich sind die aktuellen Vorschriften zu beachten		

Tabelle 17.4-2

Fertigung: Qualitätssicherung Kennzeichnung von Bauteilen

Anwendung	Kennzeichnungsverfahren	Eignung und Besonderheiten des Verfahrens
Kurzzeitige Kennzeichnung	Etikett, Abziehbild (Selbstklebend)	**Geeignet:** Für alle hochbeanspruchten Bauteile die keine Dauerkennzeichnung benötigen. Lackierte oder besonders beschichtete Oberflächen (z.B. Elastomere) **Ungeeignet:** Temperaturen oberhalb 270 °C **Bedenken:** Klebstoffrückstände beim Abziehen können bei Betriebstemperaturen reagieren oder abdeckend wirken (z.B. Eindringprüfung). Schädigung von porösen, spröden, niederfesten Beschichtungen (z.B. Spritzbeläge)
	Anhänger (Metall, Pappe)	**Geeignet:** Für elastische Materialien wie Gummi. Kleine Bauteile ohne Platz für eine Kennzeichnung. Bauteile die keine Kennzeichnung tragen dürfen. **Ungeeignet:** Bei Beschädigungs- oder Entfernungsrisiko des Anhängers. **Bedenken:** FOD-Möglichkeit durch abgelösten Anhänger.
	Farbe, Farbstift, Tintenstrahler	**Geeignet:** Für Fertigungsdurchlauf, Prüfstempel, Zusätzliche Kennzeichnung von Ausschuss, Teile die aus Festigkeitsgründen keine andere Kennzeichnung zulassen. **Bedenken:** Bei ungeeigneten Farben mögliche Reaktionen mit dem Bauteilwerkstoff (z.B. bei einer Wärmebehandlung), oder Beeinflussung von beschichtenden Fertigungsprozessen (Reaktion, Diffusion, Haftfestigkeit)
	Gummistempel	**Geeignet:** Dokumentation von Prüfungen (Prüfstempel). Gussrohteile, lackierte oder beschichtete Bauteile.
	Kennzeichnung auf Behältern, Verpackung	**Geeignet:** Für Erzeugnisse die in Behältern gelagert und transportiert werden, wie Massenware und/oder Schüttware. Für elastische Materialien wie Gummi. Kleine Bauteile ohne Platz für eine Kennzeichnung. **Bedenken:** Verwechslungsgefahr beim Umfüllen oder entnommenen Teilen.
Wichtig: Diese Tabelle enthält lediglich Hinweise. Grundsätzlich sind die aktuellen Vorschriften zu beachten		

Tabelle 17.4-3:

Tabelle 17.4-2 *und* ***Tabelle 17.4-3:*** *Jedes* ***Markierungsverfahren*** *hat seinen besonderen Einsatz, der sich an den* ***Vor- und Nachteilen*** *sowie eventuellen Risiken (Bild 17.4-3) orientiert. In beiden Tabellen wurden diese Merkmale für gängige Markierungsverfahren für einen Überblick zusammengestellt.*

© Axel Ros als Schulung

Fertigung: Qualitätssicherung Kennzeichnung von Bauteilen

Bild 17.4-4 *(Lit. 17.4-2 und 17.4-3): In der Triebwerkstechnik wird ein Markierungsverfahren auf Bauteilen (engl.* ***Direct Part Marking = DPM****) mit der sog.* ***2D-Data-Matrix*** *seit ca. 2000 eingeführt. Dazu gehört auch ein maschineller Lesevorgang (engl.* ***Direct Part Mark Identification = DPMI****). Das Verfahren kommt den Forderungen des High-Tech-Bereichs besonders entgegen.*

- Kleiner Platzbedarf,
- Großer Dateninhalt,
- Hohe Lesesicherheit im Bereich von 6 x Standardabweichung (6σ, d.h. ca 3 Fehler in einer Million Auslesungen).
- Einfach, schnell und billig anzubringen.
- Unempfindlich gegen Umgebungseinflüsse.

Diese Forderungen werden mit einer sog. ***Zellenmatrix****, einer schachbrettartigen Struktur erreicht (engl.* ***Cell Matrix****, Rahmen oben links). Die Zahl der Zellen, d.h. die Größe der Cell Matrix kann den Erfordernissen angepasst werden und ist spezifiziert. Der Dateninhalt ist im sog.* ***Datenbereich*** *(engl.* ***Data Region****) enthalten. Die einzelnen* ***Felder (Zellen, Cells)*** *werden entsprechend dem Code markiert, was auf unterschiedliche Weise geschehen kann (Rahmen oben links). Der* ***Code (Matrix Code)*** *enthält in der* ***oberen und rechten Zellreihe*** *Anweisungen zu Korrekturmethoden und Fehlerkontrolle (****Clock Track****). Damit wird eine Decodierung und Fehlerkontrolle selbst bei 60% Beschädigung möglich. Um die Cell Matrix für die Auslesung auszurichten, ist eine* ***Lageerkennung*** *integriert. Diese besteht aus einem durchgehend markierten einzellig breiten Winkel. Er wird von der linken und unteren Reihe (engl.* ***Finder „L“ Pattern****) gebildet.*

Um ausreichend sichere Lesbarkeit zu gewährleisten, ist die ***Zellgröße der mittleren Bauteilrauigkeit Ra anzupassen*** *(Diagramm unten links).*

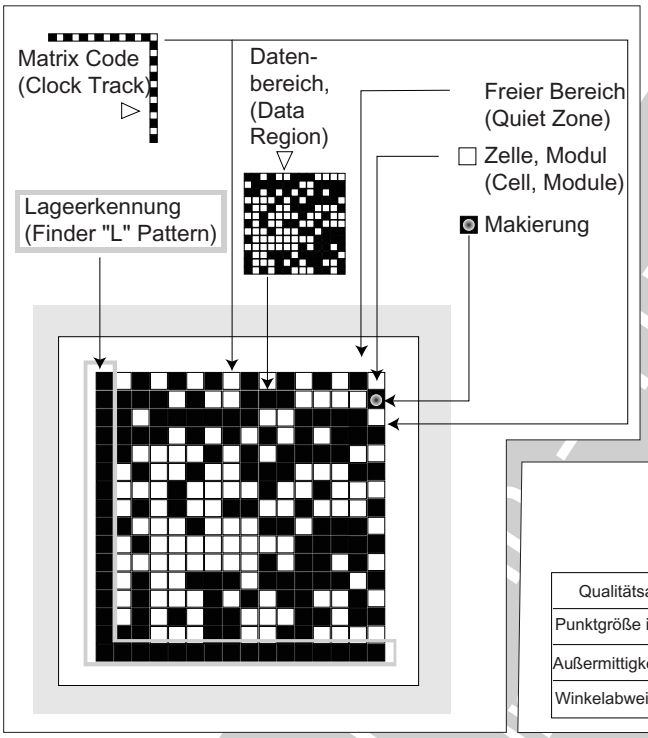
Die Postitionierungsgenauigkeit und Form der Markierungen in den Zellen sowie ein möglicher Verzug der Matrix muss einem ***Mindeststandard*** *entsprechen (Rahmen oben rechts).*

Für den Triebwerksbau sind gewisse bauteilspezifische Standardverfahren zur Herstellung der Markierungen akzeptiert (Rahmen unten rechts). Vorteile und Probleme der Markierungsverfahren werden in Bild 17.4-3, Tabelle 17.4-2 und Tabelle 17.4-3 behandelt.

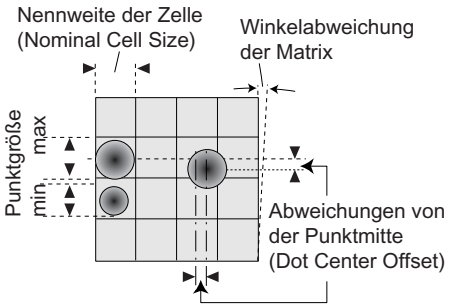
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Qualitätssicherung Kennzeichnung von Bauteilen

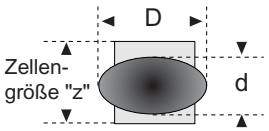
Prinzip und Besonderheiten der direkten Bauteilmarkierung mit der 2D-Data-Matrix Methode.



Qualitätsanforderungen an eine 2D-Data-Matrix

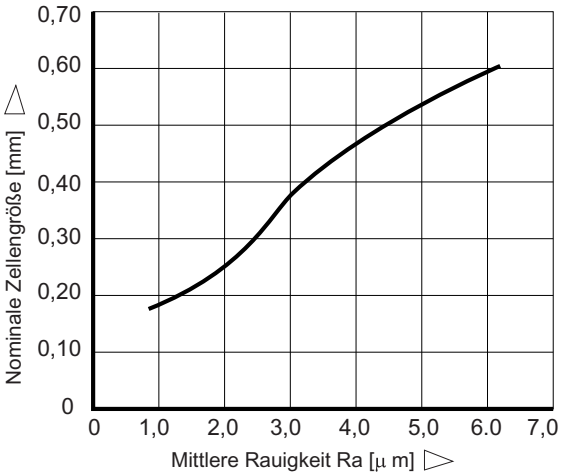


Ovalität |D-d| < 20 % der Zellengröße



Qualitätsanforderungen	hervorragend	akzeptabel
Punktgröße in % von "z"	70 - 90 %	60 -100%
Außermittigkeit des Punktzentrums in % von "z"	0 - 10 %	10 - 20%
Winkelabweichung der Matrix	+- 3,5°	+- 7°

Erforderliche Zellengröße für eine gute Auswertbarkeit in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit.



Verfahren zur Herstellung einer 2D-Data-Matrix

Verfahren \ Bauteile	Rotorteile	Gehäuse	Blechteile	Rotorschaufeln	Leitschaufeln
Einschlagpunkte (Dot Peening)	○	○	◍	○	○
Laser		○	○	●	○
Elektrochemisches Ätzen		○	○	○	○
Tintenstrahler (Ink Jet)	◌	○	○	◌	◌
gedruckt Aufkleber (Sticker)	◌	◌	◌	◌	◌

○ Von allen Triebwerks-herstellern akzeptiert
◌ Nur kurzzeitig geeignet
◍ Anwendung hängt von der Wandstärke ab
● Von allen Triebwerks-herstellern abgelehnt

Bild 17.4-4

Literatur zu Kapitel 17.4

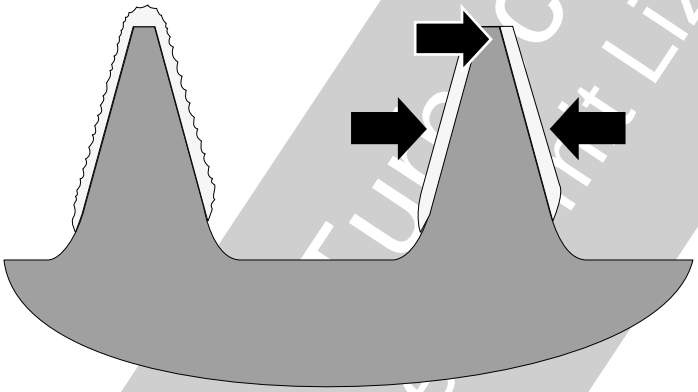
17.4-1 D.L.Roxby, C.M.Sharp, M.H.McCay, „Laser Marking in Aerospace Industry“, www.sabreen.com/laser_marking_aerospace.htm. 2005, Seite 1.8.

17.4-2 G.Lebkuechner, „2D-Data-Matrix Guideline for Direct Part Marking of Aero Engine Parts“, MTU Aero Engines, 06.19.2001 2005, Seite 1-38.

17.4-3 „Implementing Direct Part Mark Identification: 10 Important Considerations“, www.id-nteggration.com/docs/specs/Cognex_DPM_Information_Paper.pdf. 2005, Seite 1-12.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

17.5 Nacharbeit



© Aykermann Turbinenconsult
Abschulungsunterlage mit Lizenz

Im Triebwerksbau handelt es sich häufig um sehr kostenintensive Bauteile. Kosten eines Fertigteils können durchaus in der Größenordnung eines Urlaubs (Turbinenschaufeln) bis zu einem Oberklassewagen (Austrittsgehäuse, Rotoren) liegen. Zusätzlich benötigen solche komplexen Bauteile sehr lange Durchlaufzeiten im Bereich von Monaten bis Jahren. Kommt es zu Lieferverzögerungen, können zusätzliche hohe Gebühren anfallen. Da liegt es nahe, Bauteile mit Abweichungen nach Möglichkeit mit einer Nacharbeit zu verwenden.

Unter Nacharbeit wird im Folgenden ein Bearbeitungsvorgang im Fertigungsablauf verstanden, der Bauteile mit Abweichungen spezifikationskonform bzw. auslieferungsfähig macht. Keine Nacharbeit sind in diesem Sinn Prozessschritte wie Entgraten im vorgeschriebenen Fertigungsablauf.

Eine Nacharbeit entfernt die Abweichung, gegebenenfalls die Fehlstelle mit geeigneten Mitteln, die für den jeweiligen Fall von den zuständigen Fachabteilungen zu erarbeiten sind. Eine Nacharbeit kann einen komplexen Ablauf erfordern (Bild 17.5-1). In besonderen Fällen, wenn das Bauteil obwohl nach Expertenmeinung zulässig, vom üblichen Serienstandard abweicht (z.B. untergeordnete örtliche Maßänderungen), können Zulassungen durch Behörden und Kunden notwendig werden.

Es gibt Fälle, bei denen lediglich ein ungewöhnliches optisches Erscheinungsbild zu korrigieren ist (z.B. Verfärbungen) , das jedoch offensichtlich nicht das Betriebsverhalten des Bauteils beeinflusst. In anderen Fällen, wie Funkeneinwirkung (Bild 18.6-2) kann die Bauteilsicherheit von dieser Beeinflussung betroffen sein. Eine Nacharbeit ist hier für die Bauteilsicherheit zwingend notwendig.

Auch auf den ersten Blick scheinbar unproblematische Nacharbeiten können sich unerwartet auf das Betriebsverhalten bzw. die Funktion der Bauteile auswirken (Bild 17.5-3).

Fertigung: Qualitätssicherung Nacharbeit

Das Minimieren von Ausschuss durch Nacharbeit bei akzeptablem technischen Risiko erfordert ein geeignetes Vorgehen. *)

üblicher zeitlicher Ablauf

- Rückschlüsse auf die Abweichung (notwendig hierfür sind):
  - Ermittlung der Art der Abweichung
  - Feststellung der Abweichungsursache
  - Ermittlung der Größe (Tiefe, Ausdehnung, Band 1, Bild 2.2.2.4-2 und Bild 2.2.2.4-3)

  } Problemanalyse (Band 1, Kapitel 2.2.2)

- Abschätzung der Risiken (Band 1, Bild 2.2.1-2: SA, EA, APP):
  - Zahl der betroffenen Teile
  - Sicherheitsrelevanz der betroffenen Teile, potenziell beeinflusste Betriebseigenschaften: Folgende Informationsquellen und Fragestellungen können hilfreich sein:
    - Kenntnis des Schadensablaufs und der Einflüsse.
    - Sind relevante Betriebsschäden an den betroffenen Bauteilen im Bereich der Abweichung bekannt?
    - Was sagen Wartungshandbücher über bauteilspezifische Schwachstellen im Bereich der Abweichungen?
    - Was ist bei Reparaturen an den Bauteilen bei vergleichbaren Betriebsschäden zulässig?
    - Liegen die Abweichungen in bekannterweise hochbeanspruchten, lebensdauerbestimmenden Bauteilzonen?
  - Aufwand: Zeiträume, Kosten für eventuelle Folgeschäden und Abhilfen

- Konzipierung einer eventuellen Nacharbeit (zu klären sind):
  - Stehen die potenziell betroffenen Bauteile zur Verfügung?
  - Logistik, eventueller Ersatz für Zeitüberbrückung.
  - Mögliche Beeinflussung des Betriebsverhaltens
  - Umfang und Aufwand, Zeitrahmen, Ablauf
  - Gibt es für vergleichbare Betriebsschädigungen an diesen Bauteilen zugelassene und bewährte Reparaturverfahren?
  - Zu erwartende Akzeptanz des Kunden, Lizenzgebers, der Behörden

- Zulassung der Nacharbeit:
  - Festigkeit, Konstruktion, Werkstofftechnik, Qualitätssicherung.
  - Externe Entscheidungsträger: Behörden, Auftraggeber wie OEM's oder Dienststellen.
  - Gegebenenfalls versuchstechnische Nachweise.

- Vorbeugende Aktivitäten (Bild 17.1-3 bis Bild 17.1-10):
  - An Betreiber (Airworthiness Directive AD): Inspektionsmaßnahmen
  - Nacharbeiten, Reparaturen
  - Erarbeiten vorbeugender Maßnahmen (Bild 17.1-10, FMEA Band 1)).
  - Einarbeiten von vorbeugenden Maßnahmen in Spezifikationen (z.B. zerstörungsfreie Prüfung, Fertigungsverfahren) und Arbeitsunterlagen.

*) **Wichtig:** Kein Anspruch auf Vollständigkeit und Allgemeingültigkeit!

Bild 17.5-1

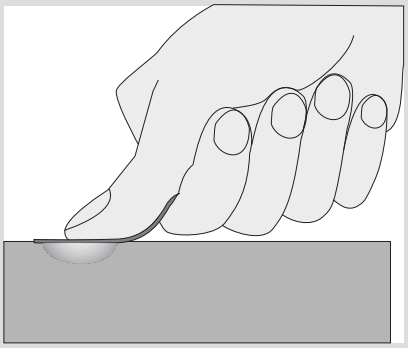
© Axel Rossmann - Turbocomputer als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Qualitätssicherung Nacharbeit

Bild 17.5-1: *Nacharbeit kann eine durchaus anspruchsvolle Aufgabe sein. Je nach Abweichung sind eine Vielzahl Schritte erforderlich. Bei den angeführten handelt es sich um eine fallspezifische Auswahl, die den zuständigen Fachabteilungen zu überlassen ist. Bereits in problem- und verfahrensspezifischen Kapiteln wurden spezifische Vorgehensweisen beschrieben:*
- Bild 18.3-18: Oberflächenveränderungen im Zusammenhang mit ***Verunreinigungen****.*
- Bild 18.6-14: Schädigungen durch ***Funkeneinwirkung****.*
- Bild 18.7-11: ***Mikrorissbildung****.*
Grundsätzlich gilt: Der ***spontane Versuch einer mechanischen Oberflächennacharbeit****, obwohl menschlich verständlich, hat zu unterbleiben. Das ist erst mit der Zustimmung eines zuständigen Fachmanns möglich, der die fragliche Stelle in unbeeinflusstem Zustand begutachtet hat. Gewöhnlich wird mit Hilfe eines Schleifpapiers oder einem Poliermittel versucht, Rückschlüsse auf die Bedenklichkeit (Tiefe) zu ziehen. Damit werden wichtige Hinweise wie Anlauffarben oder mikroskopische Schädigungen (z.B. Anschmelzung,Diffusion, Ätzangriff) zur Ermittlung der Ursache und Gefährlichkeit vernichtet (Lit. 17.5-1). Dies erschwert einen Bewertungsprozess und die Entscheidung für eine Verwendung.*
Selbst wenn es anscheinend ohne merkliche Veränderungen am Bauteil gelungen ist die Abweichung zu entfernen, besteht die Gefahr einer unzulässigen Schädigung. Beispielsweise wenn Gefügeveränderungen mit Festigkeitsabfall oder Zugeigenspannungen verblieben sind. Das ist der Fall, wenn Metalltropfen oder Schleiffunken auf einer Oberfläche haften. Unter scheinbar harmlosen „Anbackungen“ können sich größere Schädigungszonen verbergen (Bild 18.6-2 und Bild 18.6-3). Diese lassen sich mit metallografischen Mitteln am Bauteil quasi zerstörungsfrei erkennen und auf Nacharbeitsfähigkeit hin untersuchen (Band 1Bild 2.2.2.4-4).
Wichtige Schritte im Rahmen einer Nacharbeit:

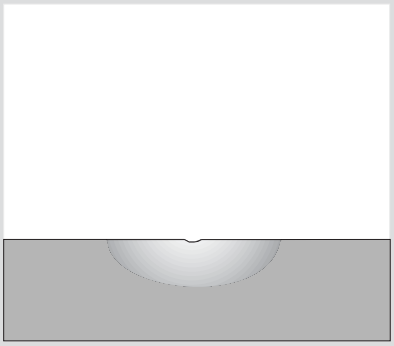
Voraussetzungen: *Wird eine Abweichung erkannt, besteht auf Grund möglicher persönlicher Konsequenzen sowie aus Kosten- und Zeitdruck keine Motivation diese weiterzumelden. Es ist also eine Motivation notwendig. Im Vordergrund muss die* ***objektive Problemlösung stehen und nicht persönliche Konsequenzen***

Merksatz:



Jeder spontane Versuch einer Oberflächenbehandlung kann die Feststellung der Ursache und damit eine zulassungsgeeignete Nacharbeit zumindest behindern!

Merksatz:



Die schädigende Wirkung einer Fehlstelle kann deutlich größer und tiefgehender sein als es der Augenschein erwarten lässt. Das ist bei einer Nacharbeit zu berücksichtigen!

(Bild 13.5-2). Eine weitere Voraussetzung ist ein möglichst einfaches, bekanntes, festgeschriebenes „Meldesystem". Hierzu gehört der Ablauf und die zuständigen Entscheidungsträger.

Rückschlüsse auf Abweichungen: *Voraussetzung ist die* ***Identifikation der Schadensart*** *und die* ***Ermittlung der Schadensursache****. Dafür bietet sich eine Problemanalyse an (Band 1 Kapitel 2.2.2). In diesem Rahmen ist die geometrische Ausdehnung einer potenziellen Schädigung von besonderer Bedeutung. Wichtige Hilfsmittel sind die Metallografie (Band 1, Bild 2.2.2.4-2) und REM-Untersuchungen (Band 1, Bild 2.2.2.4-3) die zumindest in einer ersten Phase zerstörungsfrei (Abdrücke, Untersuchung der Oberfläche vor Ort, Band 1, Bild 2.2.2-4) erfolgen können.*

Abschätzung der Risiken: *Auch hier bietet sich eine systematische Vorgehensweise mit geeigneten Analysen an (Bild 17.1-11). Selbstverständlich in* ***Zusammenarbeit mit den zuständigen bzw. betroffenen Fachabteilungen****. Vorrangig stellt sich die Frage nach der* ***Bauteilsicherheit****. Hierfür können Recherchen in Handbüchern und Spezifikationen zu Wartung, Reparatur äußerst hilfreich sein. Sie können auch erste Anhaltspunkte für mögliche Nacharbeiten geben.*

Konzipierung der Nacharbeit: *Auch dies ist eine Aufgabe der verantwortlichen Fachabteilungen. Kriterien wie eine mögliche Beeinflussung des Betriebsverhaltens, Zeitrahmen, Aufwand und Akzeptanz (Kunden, Behörden usw.) sind abzuschätzen.*

Zulassung der Nacharbeit: *In den meisten Fällen, besonders wenn eine Sicherheitsrelevanz erkennbar ist, muss die Zustimmung der Entscheidungsträger eingeholt werden. Hierfür ist die ausreichende Klärung der Schadensursache und des Ablaufs sehr hilfreich. Weiter sollte der Umfang möglicherweise bereits ausgelieferter Teile und der Verbleib bekannt sein (siehe auch Bild 11.3-1). Es kann notwendig werden, die Unbedenklichkeit einer Nacharbeit mit versuchstechnischen Nachweisen zu untermauern.*

„Lessons learned" - Vorbeugende Aktivitäten: *Zuerst ist zu fragen, ob ausgelieferte Bauteile sich im Betrieb befinden. Für diese sind geeignete Prüf- und Reparaturmaßnahmen vorzusehen und mit den zuständigen Behörden entsprechend den anzuwendenden Vorschriften abzustimmen.*
Zu den Abhilfen gehört neben einer eventuellen Nacharbeit die Verhinderung weiterer Bauteile mit Abweichungen. Das heißt, dass gegebenfalls der Fertigungsprozess stabilisiert werden muss und/oder zusätzliche absichernde Prüfungen einzuführen sind. Ein wirksames Werkzeug, Schwachstellen im Fertigungsablauf zu erkennen, ist die FMEA (Band 1,Bild 2-1).

© Axel Rossmann - Turbogonsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Qualitätssicherung Nacharbeit

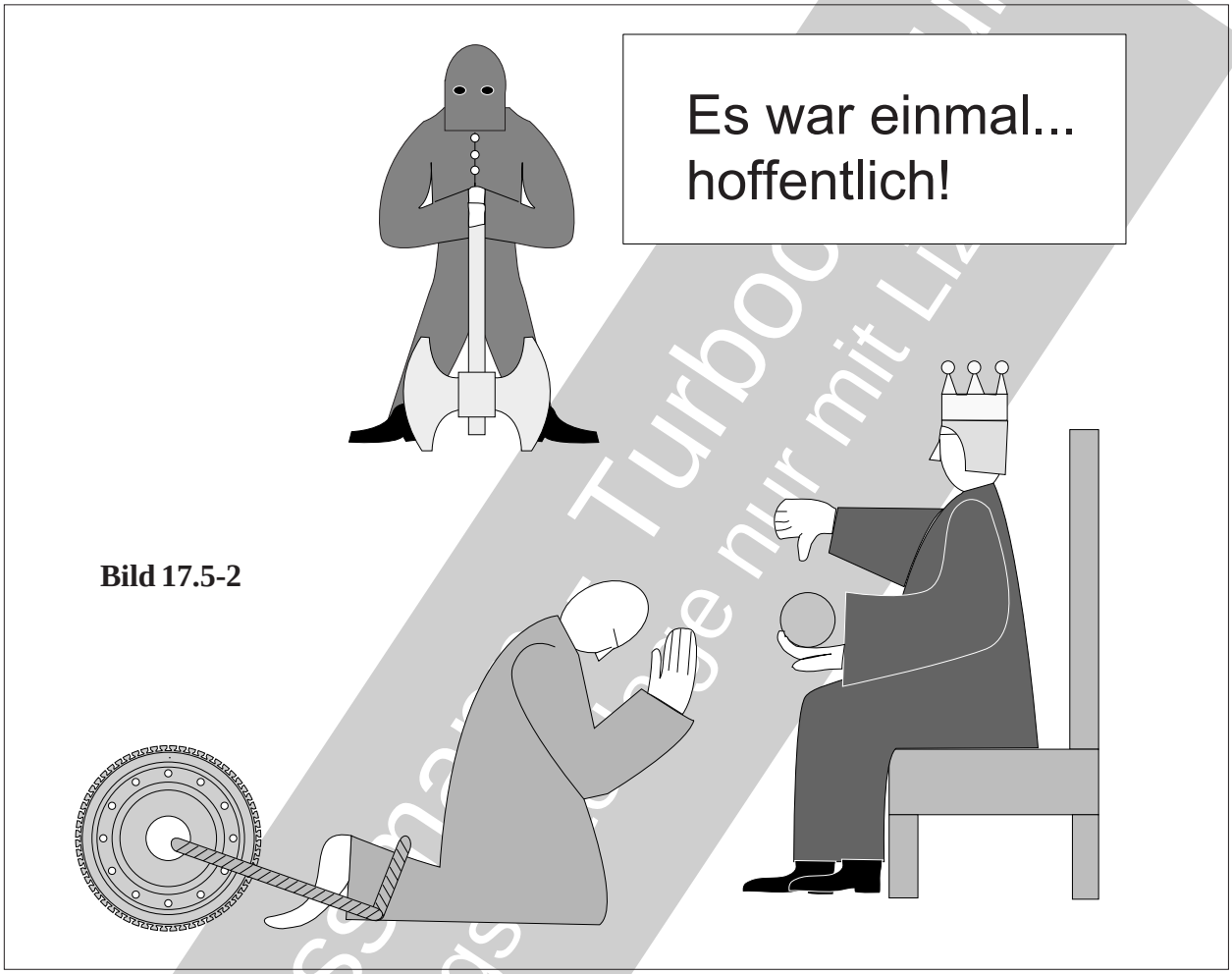


Bild 17.5-2

Bild 17.5-2 *(Lit. 17.5-1): Psychologen wissen: „**Positive Motivation**“ ist erfolgreicher als „**negative Motivation**“.*
*„**Negative Motivation**“ bedeutet, ein Handeln unter Strafandrohung zu erzwingen. Angst und Frustration spielen dabei eine wichtige Rolle. Eine solche repressive Vorgehensweise verhindert die unverzichtbare kreative Mitarbeit des Betroffenen zur Lösung eines Problems. Unter „positiver Motivation“ versteht man, Menschen mit Lob und Informationen zu einem Handeln anzuregen, dessen Sinn eingesehen und aktiv unterstützt wird. Daraus sollte sich die moderne Vorgehensweise eines Vorgesetzten orientieren, um Probleme zu lösen und zu vermeiden. Sie setzt auf Teamarbeit.*
Qualität ist also ein Produkt, das nicht zuletzt auf Teamgeist und damit auf Vertrauen beruht. Um Schäden und Ausschuss zu vermeiden, sollte ähnlich wie bei der Heilung von Krankheiten vorgegangen werden: Je früher man das Problem erkennt und die richtige Diagnose stellt, umso größer sind die Genesungschancen und umso geringer ist der Aufwand für Therapie bzw. Abhilfen. Die zweifelsfrei unangenehme Situation des frühen „Arztbesuchs“ ist also besonders wichtig. Wenn es sich dann herausstellen sollte, dass kein Problem vorliegt, können wir uns beglückwünschen. Vorwürfe wegen zu großer Sensibilität wären vollkommen fehl am Platz.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich die folgenden Empfehlungen:

• Die Vorgesetzten sind sich bewusst, dass ein objektives Verhalten und Vertrauen Voraussetzungen für die rechtzeitige Meldung von Qualitätsproblemen sind. Er erklärt z.B. den Mitarbeitern die Wichtigkeit ihrer Arbeit für die

© Axel Rossmann Turbocomputer
als Schulungsmaterialien nur mit Lizenz

Fertigung: Qualitätssicherung Nacharbeit

Qualität und das Betriebsverhalten der Bauteile.

• Die technische Lösung der Probleme und die Abhilfen stehen bei unserem Handeln immer im Vordergrund. Die Beteiligung der Mitarbeiter an der Abhilfe kann eine wichtige Motivation sein.

• Wer Fehler oder Abweichungen am Fertigungsprozess oder an Bauteilen meldet, sollte deshalb keine Nachteile haben. Der Vorgesetzte motiviert positiv.

• Im Zweifelsfall lieber einmal mehr den Finger heben.

• Wir lernen aus unseren Fehlern und Problemen. Abhilfen und Maßnahmen sind in geeigneten Vorschriften und Dokumenten zu berücksichtigen.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Qualitätssicherung Nacharbeit

Bild 17.5-2: *Es gibt Nacharbeiten die dazu dienen, scheinbar nebensächliche, fertigungsbedingte Abweichungen zu korrigieren, um das Bauteil spezifikationskonform zu machen. Selbst wenn die verantwortlichen Stellen, Behörden, der Lizenzgeber oder Kunde diesem Vorgehen zustimmt, kann es* ***problematische Fälle*** *geben. Diese können so „versteckt" sein, dass sie leicht übersehen werden. In solchen Fällen handelt es sich typischerweise um* ***Veränderungen im Betriebsverhalten des Bauteils****.*
Dieses Bild enthält dazu einige Beispiele.

Anstreifflächen *(„**1**") dienen gewöhnlich zur Minimierung eines Dichtungsspalts an Schaufelspitzen. Auf Rotorzwischenringen gegenüber Verdichterleitschaufeln ohne Innendeckband befindet sich üblicherweise eine thermisch gespritzte, harte, keramische Schicht (Al_2O_3). Aus aerodynamischen Gründen sollte die Schichtoberfläche möglichst glatt sein. Tribologische Forderungen sprechen jedoch für eine raue, schneidfähige Schicht. So kommt es während eines Anstreifvorgangs zwar zum Abrieb an den Schaufelspitzen, jedoch ohne die folgenden Risiken:*
- Gefährliche Wärmebildung an Schaufelspitze und Rotor.
- Beschleunigter Materialauftrag an der Schicht (Lit. 13.5-3) mit einer gefährlichen Verstärkung des Anstreifvorgangs.
- Mechanische Überlastung des Schaufelblattes. Diese kann sowohl statisch (Lit. 17.5-3) als auch dynamisch (Lit. 17.5-3) erfolgen.
Wird versehentlich eine erprobte, zugelassene und bewährte raue Schicht mit einer abweichenden Bearbeitung oder Nacharbeit geglättet, steigt das Risiko schwerer Schäden im Falle eines Anstreifvorgangs (Lit. 13.5-3).

Labyrinthspitzen *(„**2**") werden gewöhnlich mit einer harten, keramischen thermischen Spritzschicht als* ***Panzerung*** *versehen. Kommt es zur Spaltüberbrückung, wird die Gegenfläche, üblicherweise eine weichere Einlaufschicht, abgearbeitet. Die entstehende Reibungswärme soll zumindest an der Labyrinthspitze möglichst niedrig sein, um eine gefährliche, selbstverstärkende Aufheizung des Systems, besonders des rotierenden Labyrinthrings (Lit. 17.5-3) zu vermeiden. Je rauer bzw. schneidfähiger die Panzerung, umso weniger Wärme entsteht. Wenn eine Panzerung beispielsweise aus maßlichen Gründen nachgearbeitet (Diamantfeile) und dabei geglättet wird, kann sich ihr Anstreifverhalten gefährlich verschlechtern. Aus diesem Grund ist eine, wenn auch geringe,* ***Nacharbeit einer Anstreifschicht bzw. Panzerung problematisch****. Eine glatte Panzerung kann beim Anstreifen ungewöhnlich hohe Temperaturen mit Rissbildung, Gefügeveränderungen, Aufschmierungen und im Extremfall totalem* ***Versagen des Labyrinths*** *eintreten lassen.*
Zusätzlich schadensbegünstigend wirkt sich eine infolge der Nacharbeit örtlich ungewöhnlich dünne Panzerung aus. Sie verliert eine gewisse isolierende Wirkung, um eine Überhitzung des Trägerwerkstoffs zu verhindern.
Wurde am Umfang der Labyrinthspitzen die Panzerung entfernt, ist von einem deutlich ungünstigeren Anstreifverhalten auszugehen. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass im Betrieb verstärkt Oxidation von der Spitze entlang der Haftfläche eindringt. Mit hohen Wärmespannungen, ***Abplatzen der Panzerung*** *und weiteren Folgeschäden.*

Mit Hartstoffpartikeln belegte Schaufelspitzen *(„**3**"): Diese Technologie gehört an Rotorschaufeln im Hochdruckverdichter und der Hochdruckturbine zum Stand der Technik (Lit. 17.5-3). Eine Bearbeitung solcher Partikel, z.B. durch Überschleifen im Rotor, beeinträchtigt ihr Schneidverhalten und damit die Funktion des Einlaufs und der Spaltminimierung.*

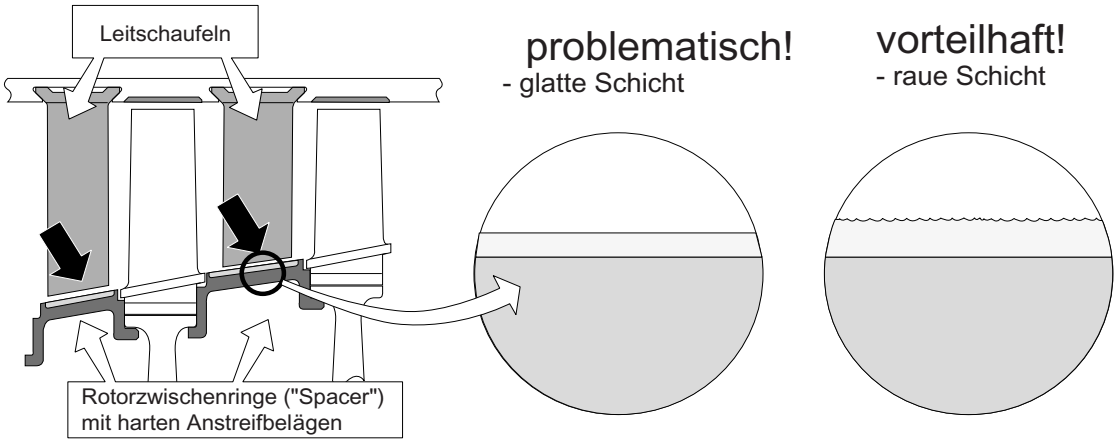
Nacharbeit verfestigter Oberflächen: *Um die Schwingfestigkeit zu erhöhen (Band 3, Bild 12.2.1.6-5) bzw. abzusichern und gegebenen-*

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Auch scheinbar minimale Nacharbeit an Oberflächen kann das Betriebsverhalten des Bauteils unzulässig beeinflussen.

Eine nicht geforderte Nacharbeit zur Glättung von Anstreifschichten kann das Anstreifverhalten eines Tribosystems unzuässig verändern und so zur gefährlichen Überhitzung der anstreifenden Bauteile führen. **Aus Sicht des Triboverhaltens** ist die folgende Einschätzung möglich:

1 Anstreifflächen auf Rotorzwischenringen



2 Panzerung von Labyrinthspitzen

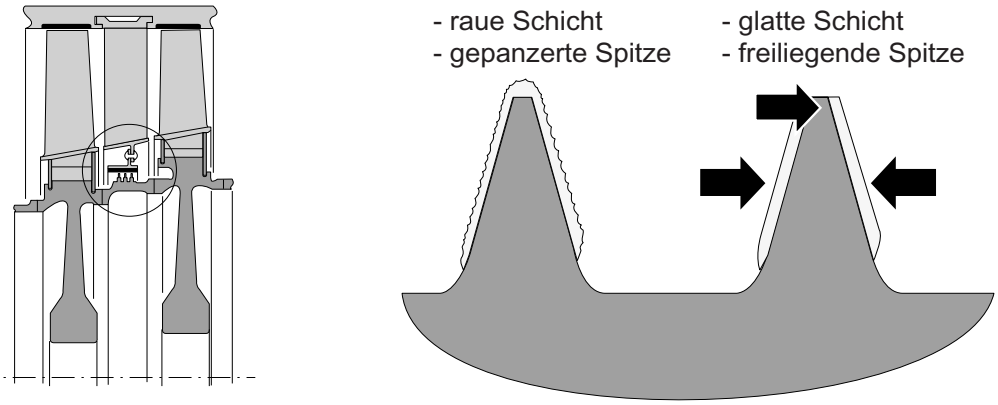


Bild 17.5-3

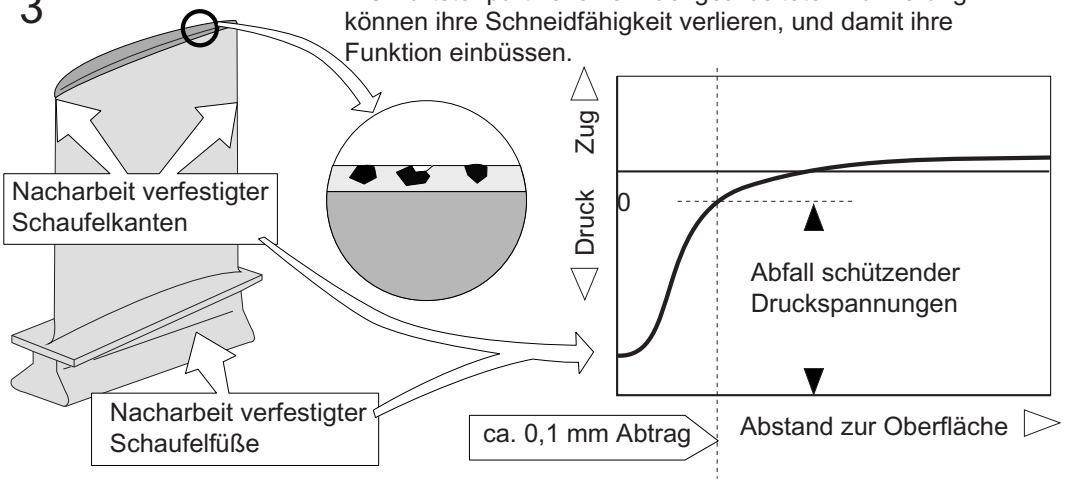
falls einen Frettingeinfluss zu minimieren (Lit. 17.5-3) werden Bauteile kugelgestrahlt. Günstige Druckeigenspannungen und eine Verfestigung lassen sich so in einer dünnen Oberflächenzone um 0,1 mm einbringen (Band 3, Bild 12.2.1.6-2). Auch die besondere Oberflächentopografie kugelgestrahlter Auflageflächen (z.B. an Schaufelfüßen) kann im Zusammenhang mit einem günstigen Frettingverhalten (Band 3, Bild 12.2.1.6-8) gesehen werden. Ein Abtrag im Rahmen einer Nacharbeit kann diese Vorteile abbauen und

Fortsetzung auf Seite 17.5-8

Fertigung: Qualitätssicherung Nacharbeit

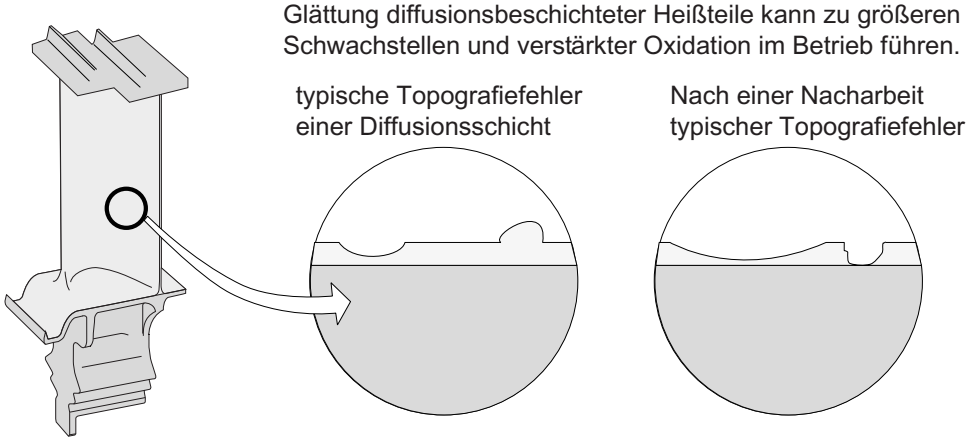
3

Die Hartstoffpartikel einer nachgearbeiteten Panzerung können ihre Schneidfähigkeit verlieren, und damit ihre Funktion einbüssen.



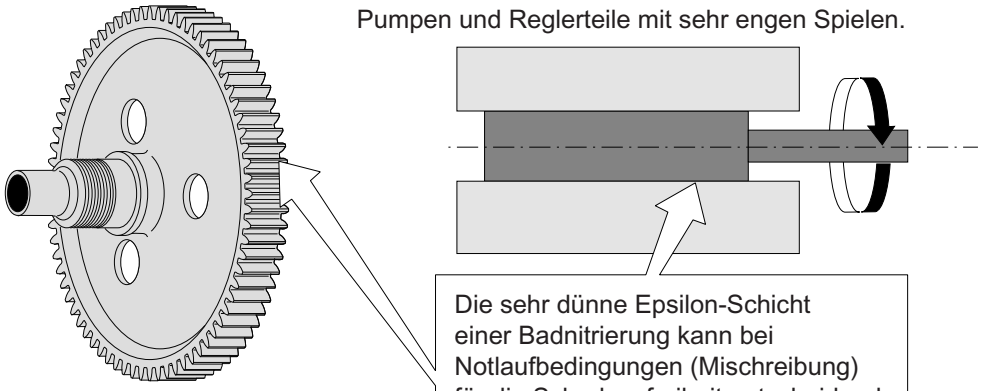
4

Glättung diffusionsbeschichteter Heißteile kann zu größeren Schwachstellen und verstärkter Oxidation im Betrieb führen.



5

Pumpen und Reglerteile mit sehr engen Spielen.



hochtourige Zahnräder mit geringer Flächenpressung aber sehr hohen Gleitgeschwindigkeiten an den Zahnflanken.

Die sehr dünne Epsilon-Schicht einer Badnitrierung kann bei Notlaufbedingungen (Mischreibung) für die Schadensfreiheit entscheidend sein. Wird diese z.B. aus Maßgründen abgetragen, können die Bauteile unbrauchbar sein.

Fortsetzung von Seite 17.5-6

damit das Betriebsverhalten gefährlich beeinflussen.

Glättung beschichteter Flächen („4"): *Anbackungen und Erhebungen („Warzen") an diffusionsbeschichteten Flächen, besonders wenn diese aerodynamisch wirksam sind oder es sich um anliegende Dichtflächen handelt, können die Funktion beeinträchtigen. Eine abtragende Nacharbeit kann zum Ausbruch und zur Mikrorissbildung spröder Beschichtungen führen. Damit ist deren Funktion, der Oxidations- oder Korrosionsschutz, beeinträchtigt und kann sich auf die Bauteillebensdauer auswirken.*

*Abtrag der „ε-**Schicht**" an badnitrierten (carbonitrierten) Bauteilen (**„5"**). Im Gegensatz zum Gasnitrieren gewährleistet diese sehr dünne Schicht wegen ihres nichtmetallischen Charakters Notlaufeigenschaften, die ein „Fressen" der Bauteile unter Mischreibung verhindern. Dies kann eine Voraussetzung für die Funktion von Reglerventilen sein, deren Kolben mit hoher Drehzahl in Kraftstoff rotieren.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 17.5

17.5-1 A.Rossmann, „Unser Beitrag zur Qualitätssicherung", 1998, Turboconsult.

17.5-2 Metals Handbook „Volume 11, Failure Analysis and Prevention", ASM 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 16-65.

17.5-3 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik", Band 2, 2000 Turboconsult., ISBN 3-00-008429-0, Bild 6.1-19, Bild 7.1.3-4, Bild 7.1.3-6, Bild 7.1.3-7, Bild 7.1.3-8, Bild 7.1.4-14 und Bild 7.2.2.-4.

Qualitätsmerkmale der Fertigung

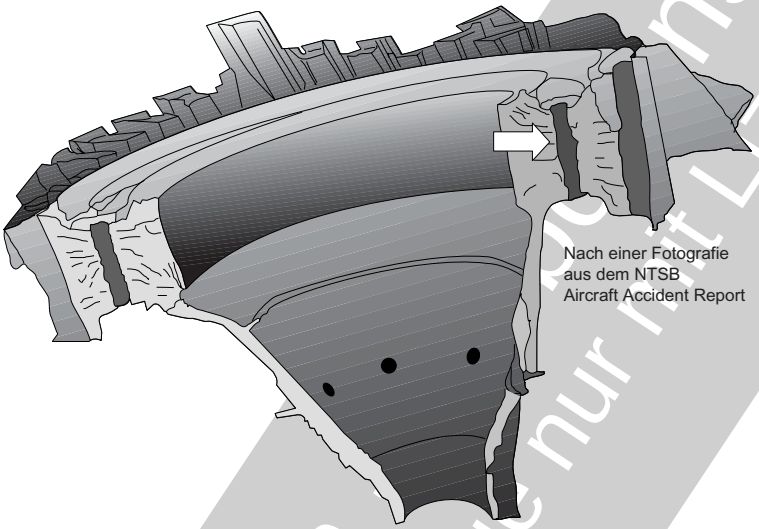
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Oberfläche Topografie, Rauigkeit

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18. Schadensrelevante fertigungsbedingte Effekte

Scheibenbruch als Folge eines Fertigungfehlers



Unter **schadensrelevanten Fertigungseinflüssen** werden im Folgenden Effekte verstanden, welche für das Betriebsverhalten spezifizierte Eigenschaften des Bauteils unzulässig beeinflussen. Der Begriff Fertigung wird auf alle Bearbeitungs- und Prüfvorgänge nach der Rohteil- bzw. Halbzeugfertigung beschränkt. Es kann sich um Probleme handeln, die bereits **während des Fertigungsprozesses auftreten und erkannt** werden. Die Schäden sind in diesen Fällen in erster Linie auf Mehrkosten in Form von Ausschuss oder Reparatur und Zeitaufwand zurückzuführen. Hinzu kommen gegebenenfalls weitere Aufwendungen wie Strafen für nicht eingehaltene Lieferverpflichtungen und nicht exakt anzugebende Kosten eines Prestigeverlusts.

Zusätzlich ist bei Fertigungsschäden und -problemen die **unerkannt an Bauteilen in Triebwerke gelangten**, der Aspekt der Flugsicherheit von großer Bedeutung. Damit können die Konsequenzen weitaus gravierender werden, als bei Schäden die bereits in der Fertigung erkannt wurden.

Voraussetzung für die Schadensminimierung ist, dass der Schadensmechanismus, die ursächlichen Einflüsse und die betroffenen Bauteile identifiziert bzw. eingegrenzt werden.

Der **Schadensmechanismus** lässt sich erfahrungsgemäß in der Praxis typischen **Schadensbildern** bzw. Effekten, **bauteilspezifischen Problemen** und **Fertigungsverfahren** zuordnen. Je nachdem zu welchem Zeitpunkt im Fertigungsablauf oder im Betrieb der Schaden auftritt bzw. erkannt wird, sind unterschiedliche Ansätze zur Identifizierung des Mechanismus hilfreich.

Erkennt man das Problem irgendwo **im Fertigungsablauf** und lässt es sich häufig nicht anhand des Ortes einem bestimmten Verfahren zuordnen (z.B. bei Rissbildung), wird man versuchen anhand des **Schadensbilds bzw. Effekts** das ursächliche Verfahren zu identifizieren, um möglichst schnell gezielt Abhilfe zu schaffen. Dafür wurden solche Effekte in diesem Kapitel zusammengestellt.

Ist ein **bestimmtes Verfahren in Verdacht**, wird man eher bei **verfahrensspezifischen Problemen** suchen, um den Schadensmechanismus zu identifizieren. Dafür wurde das Kapitel 12.2.1 in Band 3 zusammengestellt.

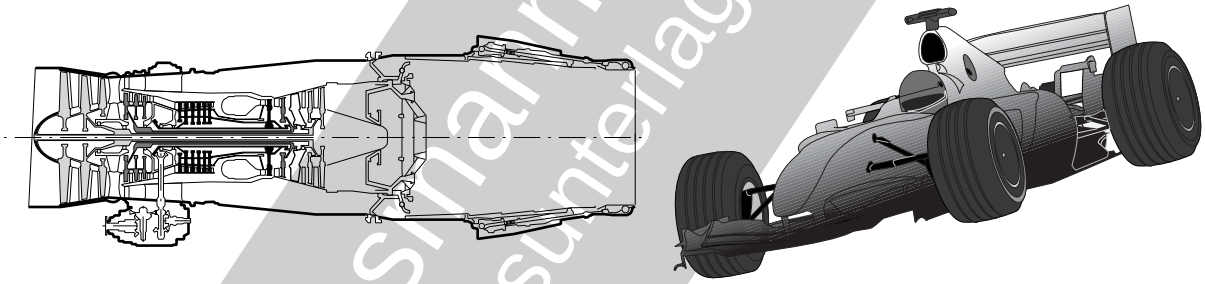
Handelt es sich um **Betriebsschäden**, wird man neben den Effekten besonders auf **bauteilspezifische Probleme** achten, um den Schadensmechanismus zu klären. Eine Hilfe für wichtige Komponenten, insbesondere von Turbomaschinen ist auf Seite 12.2-6 bis 12.2-12 des Band 3 zu finden.

© Axel Rossmann Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Oberfläche Topografie, Rauigkeit

Die Vielzahl **schadensrelevanter fertigungsbedingter Effekte** verlangte eine Beschränkung auf erfahrungsgemäß wichtige (Sicherheit) bzw. häufige (Kosten und Wahrscheinlichkeit). Nicht immer ist dem Praktiker sofort einsichtig, warum scheinbar „harmlose" Fertigungsprobleme zu umfangreichen, kostenintensiven Aktionen wie Ausschuss oder umfangreicher Nacharbeit führen. Ist dies verstanden, besteht die Chance, dass bereits im Vorfeld (Arbeitsvorbereitung) und während des Fertigungsprozesses gezielt und verstärkt auf Schadensverhütung Wert gelegt wird. Deshalb wird versucht, die oft nicht auf den ersten Blick erkennbaren Zusammenhänge aufzuzeigen. Dafür ist es notwendig, bauteilspezifische Funktionen und Betriebseinflüsse zu kennen und zu verstehen.

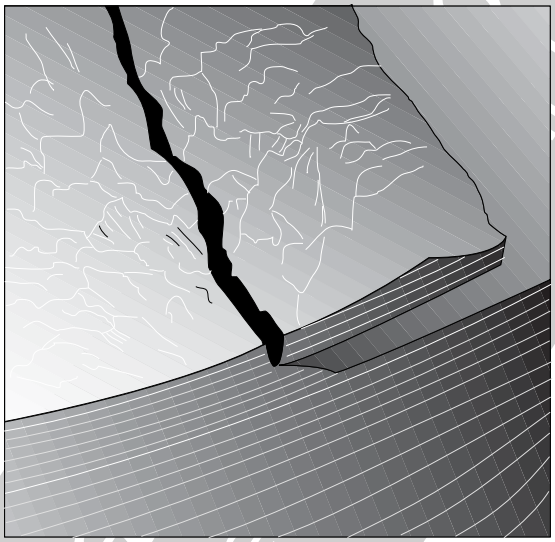
Wenn bewusst ist, dass Merkmale wie Grate oder Risse bei verschiedensten Verfahren, Verfahrenskombinationen und Einflüssen auftreten können, ist auch klar, dass ein Fehler durchaus nicht dem Verfahren wo er gefunden wurde ursächlich zuordenbar sein muss. Das macht die **Klärung von Fertigungsschäden und die Erarbeitung der Abhilfen besonders anspruchsvoll** (siehe hierzu Kapitel 17.1).



Die steigenden Anforderungen an die Belastung und Betriebseigenschaften der Bauteile, zusammen mit einem hohen Reifegrad, wird den Trend unterstützen, Verbesserungen des Betriebsverhaltens mit einer Kombination kleiner Schritte unter Nutzung von „**Synergie**"anzustreben. Triebwerke sind heute in einem Entwicklungsstadium das ähnlich wie bei Formel 1 Rennwagen zu sehen ist. Nur noch die ganzheitliche Optimierung auch kleinster Einflüsse verspricht Erfolge. Das wird deutlich wenn man sich bewusst macht, dass im Rennsport ein Tausendstel (1 Promille) durchschnittlicher Geschwindigkeitsvorteil bereits einen deutlichen technischen Vorsprung markiert. Die **Fertigung besteht aus einer Verkettung vieler Einzelprozesse,** die sich entsprechend dem Ablauf aufeinander auswirken. So wird es verständlich, wie stark heute auf Details geachtet werden muss die früher unbeachtet blieben. Topografie von Funktionsflächen wie Schaufelblättern, Auflagen von Schaufelfüßen und Anstreifflächen sind Beispiele in denen kleinste Verbesserungen genutzt werden müssen. Auslegung und Konstruktion der Bauteile sind mit der Fertigung in den Optimierungsprozess einzubeziehen. Dies gibt dem **Teamgedanken,** als Chance eines ganzheitlichen Prozesses, der alle relevanten Einflüsse berücksichtigt, eine überzeugende Rechtfertigung.

© Axel Bassmann - Tübbecke Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.1 Oberflächentopografie, Rauigkeit



Die dreidimensionale Oberflächengestalt wird als **Topografie** bezeichnet. Im vorliegenden Kapitel schließt die Topografie Merkmale mit Höhenunterschieden im Zehntelmillimeterbereich ein. In einer Schnittebene, d.h. zweidimensional, beziehen sich Maßangaben auf die **Rauigkeit** (Bild 18.1-1). Hier liegen die technisch relevanten Höhenunterschiede (Rautiefe) meist unter 0,1 mm. Feinbearbeitete Oberflächenunebenheiten befinden sich unter 0,001 mm. Viele im Folgenden angesprochene Probleme sollten deshalb dem Begriff Topografie zugeordnet werden. Der Begriff **Textur** wird gebraucht, wenn sich elementare Strukturen, vergleichbar den Dachziegeln, auf einer großen Fläche wiederholen. Die Oberflächentopografie bestimmt erheblich, manchmal auf erstaunliche und unerwartete Weise, Betriebseigenschaften der Bauteile (Bild 18.1-2). Dabei handelt es sich nicht nur um die Kerbwirkung von Riefen und deren Einfluss auf die Schwingfestigkeit (Bild 18.1-3 und Bild 18.1-4).

Die **Schwingfestigkeit** einer Oberfläche hängt von eventuellen Verfestigungen und Eigenspannungen der Riefe mit der größten Kerbwirkung (**tiefsten scharfen Riefe**) die quer zur Beanspruchungsrichtung verläuft, ab (Bild 18.1-5).

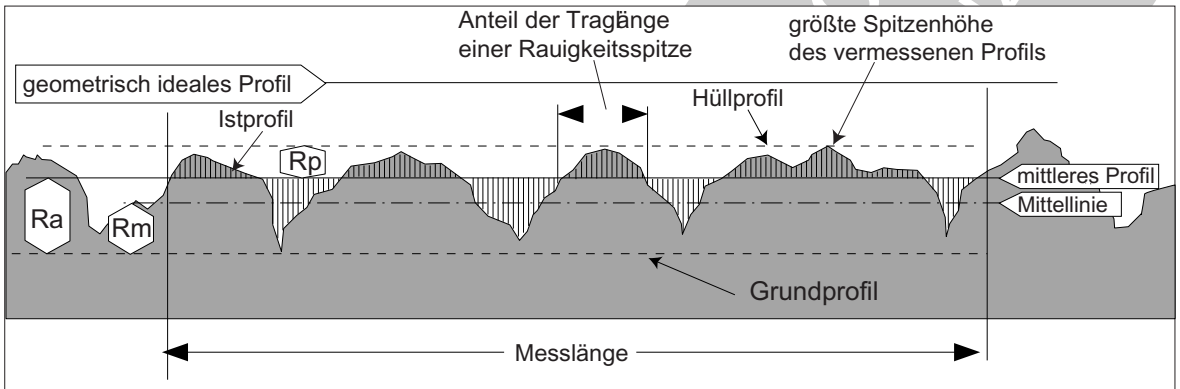
Die **aerodynamische „Qualität“** einer Oberfläche wird ebenfalls von der Orientierung der Rauigkeit, in diesem Fall quer zur Strömung, beeinflusst. In diesem Fall sind jedoch die **höchsten Spitzen** von entscheidender Bedeutung (Bild 18.1-8). In beiden Fällen ist also die **Rautiefe** „**R**“ (manchmal auch als „**k**“ bezeichnet) entscheidend und nicht die mittlere Rautiefe Ra bzw Rz.

Geht es dagegen um die **Tragfähigkeit von Kontaktflächen,** kann die **Topografie** entsprechend den **Traglängen der Spitzen** im Vordergrund stehen.

In vielen Fällen hat die **Orientierung der Rauigkeit** merklichen Einfluss auf wichtige Eigenschaften der Oberfläche. Hierzu zählen Dichtigkeit unter Relativbewegung (z.B.Gleitringdichtungen), der Lotfluss im Spalt (Band 3 Bild 12.2.1.4-4) und das tribologische Verhalten von Einlauf- und Anlaufsystemen (Band 2, Kapitel 6.10.3.1).

© Axel Kossmann consult
Lizenz

Die Oberflächentopografie eines Bauteils ist mit den üblichen Rauigkeitsangaben für wichtige Anwendungen in Gasturbinen nicht ausreichend beschrieben.



Rautiefe R = 2x Rm: ist der Abstand des Hüllprofils zum Grundprofil
Mittenrauwert Ra: ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Beträge der Abstände des Istprofils von der mittleren Linie der Messstrecke.
Gemittelte Rautiefe Rz: ist das arithmetische Mittel der Rautiefen (Hüllprofilabstand) von fünf aneinandergrenzenden Einzelmessstrecken.
Der Traganteil ist die Summe der Anteile der Traglängen der Rauigkeitsspitzen über der Messlänge bezogen auf die Messlänge.
Glättungstiefe Rp: ist der mittlere Abstand des Hüllprofils vom Istprofil bzw. des mittleren Profils vom Hüllprofil

Diese beiden Rauigkeitsprofile dürften sich trotz gleicher Rautiefe Rm in ihrem Betriebsverhalten sehr unterschiedlich verhalten (z.B. Tragverhalten, Verschleiß, Schwingfestigkeit, Reflexion). Darüber können Ra bzw. Rz und Rp eher etwas aussagen.

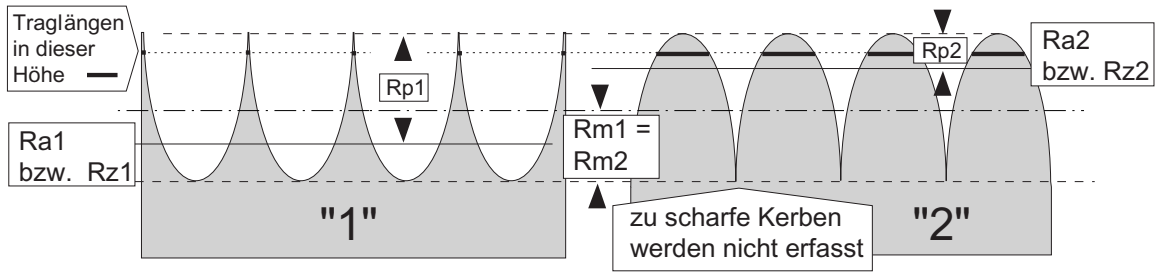


Bild 18.1-1

Bild 18.1-1 *(Lit. 18.1-5): Die* ***Rauigkeit*** *als ein wichtiges Merkmal einer Oberfläche wird in der Technik durch unterschiedlich* ***definierte Größen*** *beschrieben (Lit.18.1-6).*

Von der Art und den Parametern einer Rauigkeitsmessung hängt das Messergebnis entscheidend ab*. Grundsätzlich kann das gemessene Rauigkeitsprofil, abhängig von der endlichen Größe des Messtasters oder eines Messstrahls bzw. von dessen Wellenlänge,* ***nie das exakte Rauigkeitsprofil abbilden****. Dies gilt insbesondere wenn lediglich scharfe rissartige Riefen vorhanden sind (Skizze unten rechts). Damit lässt sich ein Vergleichsmaß, etwa zum Zwecke der Qualitätssicherung, angeben. Besonderheiten des Rauigkeitsprofils mit ihrem* ***Einfluss auf physikalische und chemische Vorgänge*** *sind jedoch mit Vorsicht zu betrach-*

ten. Die klassischen Rauigkeitsmessungen erfolgen „zweidimensional". Sie bestimmen die ***Rauigkeit auf einer Linie****. Je nachdem wie und wo die Messlinie am Bauteil liegt und ausgerichtet ist, können unterschiedliche Messwerte entstehen. Dies hat der Konstrukteur in seinen* ***Zeichnungsangaben*** *zu berücksichtigen. Sowohl die* ***Bauteilzone*** *in welcher der Nachweis zu erfolgen hat, als auch die* ***Messrichtung*** *und gegebenenfalls die* ***Art der Messung*** *sind von ihm festzulegen. Dies ist wichtig, weil sehr unterschiedlich empfindliche und aussagekräftige Messverfahren verfügbar sind (Lit 18.1-5).*

Die ***Rautiefe „R"*** *(früher auch als „****K****" bezeichnet) entspricht der doppelten „****Rm****" und beschreibt auf der definierten Messlänge lediglich den* ***Abstand der höchsten Spitze vom tiefsten Tal*** *(Hüllkurven des Profils). Sie sagt damit etwas zur maximal zu erwartenden Riefentiefe aus. Rissartige Kerben, abhängig von der Schärfe der Tasterspitze,werden, wie bereits erwähnt, nicht erfasst.* ***R sagt also nichts über die Form des Rauigkeitsprofils*** *aus und ist deshalb für Einflüsse die auf das Profil reagieren nicht brauchbar. R liegt in der Fertigungstechnik über 0,025 mm bei geschruppten, unter 0,01 mm bei geschliffenen und feinbearbeiteten, bis deutlich unter 0,001 mm für feinstgeschliffene, geläppte oder polierte Oberflächen.*

Rauigkeitsforderungen, wie sie als ***Zeichnungsangaben*** *unverzichtbar sind, müssen vom Konstrukteur auch unter dem Gesichtspunkt ausgewählt werden, dass sie* ***für das gewünschte Betriebsverhalten aussagefähig*** *sind und dies gewährleisten (Bild 18.1-2 und Bild 18.1-3).*

Um das Rauigkeitsprofil besser zu kennzeichnen wurde der ***Mittenrauwert „Ra"*** *eingeführt. Er kennzeichnet den Abstand des Grundprofils (innere Hüllkurve) von der Linie welche die* ***Flächenanteile des Profils mittelt****. Um die Messung repräsentativer zu machen, werden fünf Ra-Messungen in einen* ***Mittelwert „Rz"*** *zusammengefasst.* ***„Ra" charakterisiert Eigenschaften der Oberfläche wie Tragverhalten, Verschleiß und Reflexion besser als R*** *(Skizze unten).*

Alle genannten Rauigkeitsangaben scheitern bei sehr schmalen, rissartigen Kerben*, die weder vom Taster noch von einem Abtaststrahl erfasst werden können. Damit sind von solchen Rauigkeitsprofilen Aussagen zur Schwingfestigkeit (Bild 18.1-7) und damit zur Gefährlichkeit (Bild 18.1-8) nicht zu erwarten.*

Bild 18.1-2: Die Oberfläche eines Bauteils ist die „Schnittstelle" zur Umwelt*. Sie ist vielfältigen Einflüssen unterworfen. Wie sie auf das Betriebsverhalten wirken, hängt stark von der* ***Topografie*** *der Oberfläche ab.*

Für hochbeanspruchte Bauteile moderner Triebwerke geschieht das auf zweifache Weise, d.h. lebensdauer- und/oder funktionsbestimmend. Es kann deshalb notwendig werden, über die bisher üblichen Forderungen an belastungsspezifische Topografien hinaus zu gehen. Damit erhöht sich der Stellenwert der Oberflächengeometrie.

Die ***Schwingfestigkeit*** *wird von Kerben und/ oder Fretting (Band 1, Kapitel 5.4.4 und Kapitel 5.9.3; Band 3, Bild 12.2.1.6-8) beeinflusst. Etwa wenn sich* ***Riefen*** *als Schwachstelle auswirken und/oder Mikrobewegungen stattfinden. Eine Oberflächentopografie kann aber auch die einwirkenden* ***Belastungen*** *entscheidend beeinflussen.*

Ist beispielsweise die ***Rauigkeit eines Schaufelblatts*** *Grund für einen „rotating stall", bedeutet dies eine erhöhte dynamische Beanspruchung der Beschaufelung. Im Extremfall kann ein Pumpvorgang mit zumindest zeitweisem Triebwerksausfall eintreten.*

So stellen sich die folgenden Fragen: ***Wann sind die üblichen Rauigkeitsforderungen in Zeichnungsangaben nicht mehr ausreichend?*** *Welche Effekte in welchen Bauteilzonen sind zu berücksichtigen? Wann müssen „neue" Messverfahren zum Einsatz kommen, die eine Oberflächentopografie in ihrer 3-D Struktur*

© MTU Aero Engines AG, Turbosonsult
Ausschnittsunterlage für mtu-intranet

darstellen und sinnvoll auswerten können? Hochauflösende, berührungslose Sensoren (Strahlung, Felder) zur Oberflächenabtastung in Kombination einer computergestützten Auswertung bieten die Chance, Oberflächenstrukturen zu erfassen und zu spezifizieren.
Zwei Rauigkeitsmerkmale sind von besonderem Interesse: Orientierung und Form.

Die ***Orientierung der Topografie/Rauigkeit*** *wird als eine Vorzugsrichtung topografischer Merkmale verstanden. Üblicherweise sind es Riefen* ***spanabhebender Bearbeitungsverfahren*** *wie Drehen, Fräsen, Räumen und Schleifen. Ursache einer orientierten Rauigkeit kann auch die* ***Strömungsrichtung eines Bearbeitungsfluids*** *(z.B. ECM oder Druckfließläppen) oder die Richtung eines schräg einwirkenden* ***abrasiven Partikelstrahls sein****.*
Entstehen bei einem chemischen Prozess ***Strömungen des Bads*** *(umwälzen, thermisch), die* ***Blasen*** *(Reaktion, Dampf, Luft, Lit 18.1-2) mitführen, können sich entsprechende Spuren bilden.*
Auch ohne einen gerichteten Abtrag kann in der Topografie eine Vorzugsrichtung entstehen. Ein Beispiel ist der ***chemische Abtrag (Ätzen)****, wenn sich Korngrenzen und/oder Gefügebestandteile (z.B. Karbide) eines* ***gerichteten Gefüges*** *(z.B. „****Faserrichtung****“oder Einkristall) abzeichnen (Lit 18.1-2).*

Form der Topografie/Rauigkeit: *Auch die dreidimensionale Form ungerichteter Rauigkeit ist für das Betriebsverhalten von Bauteilen von Bedeutung. Möglicherweise nutzt man in einigen Fällen unbewusst besondere Oberflächenstrukturen. Die typischen* ***Kalotten einer kugelgestrahlten Oberfläche*** *(Lit.18-10, Band 3 Bild 12.2.1.6-8) können dafür als Beispiel dienen. Sie sind von Strahlparametern wie Kugelgröße, Strahlwinkel, und Bedeckungsgrad abhängig. Gewöhnlich werden die Parameter nach der gewünschten Strahlintensität ausgewählt. Damit werden auch Eigenspannungen und Verfestigung in der Oberfläche beeinflusst. Die* ***geometrische Funktion der Oberfläche wie Mikrotragbild und „Reservoirwirkung“*** *steht erfahrungsgemäß bestenfalls im Hintergrund. Tauchen, bedingt vom Messsystem, ungerichtete Rauigkeiten mit gefährlicher Kerbwirkung wie* ***Korngrenzenangriff, Lochfraß, scharfkantige Eindrücke*** *von abrasivem Strahlgut und Mikrograte (Lit.18-10) in einem Rauigkeitsschrieb nicht auf, macht das die eingeschränkte Aussage dieser Messungen zum Bauteilverhalten deutlich.*

Im Folgenden werden typische Beispiele zum ***Einfluss der Topografie auf die Bauteilbelastung*** *behandelt.*

Aerodynamisches Verhalten: *Der Widerstand einer umströmten Fläche, typischerweise eines Schaufelblattes, hängt deutlich von der Rauigkeit ab (Bild 18.1-10). Riefen in Strömungsrichtung wirken sich weniger aus als solche die mehr als +- 10° von dieser abweichen (Bild 18.1-10).*
*Zu hohe Rauigkeitsspitzen an der Beschaufelung beeinflussen den Wirkungsgrad und das Betriebsverhalten (****Pumpgrenze****) des Verdichters und damit des gesamten Triebwerks. Ist Rauigkeit ein ursächlicher Einfluss für einen Strömungsabriss, sind sowohl Betrieb des Triebwerks als auch die Integrität des individuellen Bauteils gefährdet.*
Die Rauigkeit der Neuteile kann das ***Festsetzen von Ablagerungen*** *(engl. „fouling“) begünstigen und auf diese Weise indirekt wirksam werden. Ähnlich indirekt kann die Neuteilrauigkeit auf die Dichtwirkung im Spitzenspalt oder auf das Erosionsverhalten wirken.*
Bei gekühlten Heißteilen wie Turbinenschaufeln beeinflusst die Rauigkeit den ***Wärmeübergang*** *und den Strömungswiderstand auf der Heißgasseite und auf der Kühlluftseite. Den Wärmefluss vom Heißgas in das Bauteil versucht man zu minimieren. Das erfordert eine möglichst glatte Oberfläche. Dagegen soll der Wärmeübergang auf der Kühlluftseite möglichst intensiv sein. Hier kann eine geeignet zum Kühlluftstrom gerichtete Rauigkeit (Lit. 18.1-2) vorteilhaft sein. Eine solche vorteilhafte Rauigkeit kann z.B. durch Gefügeeinfluss (z.B.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Oberfläche Topografie, Rauigkeit

Funktion und Belastung der Oberfläche eines Bauteils stehen in wechselseitigem Zusammenhang mit Topografie bzw. Rauigkeit.

Orientierung und Form der Rauigkeit beeinflusst

- Aerodynamisches Verhalten (Widerstand, Strömungsablösung, Wärmeübergang)
- Triboverhalten
  - Verhalten von Auflageflächen (Fretting)
  - Gleit- und Anstreifflächen, (Dichtwirkung, Reibkräfte, Reibwärme, Abrieb)
- Schwingermüdung (Schwingbelastung und Schwingfestigkeit)
- Erosionsverhalten, Kavitationsverhalten
- Strahlung (Absorption, Reflexion)
- Reaktivität: Korrosion, Oxidation
- Haftfestigkeit

Für Versuchszwecke hergestellte Topografie einer Haftfläche für TiC-Spritzschichten.

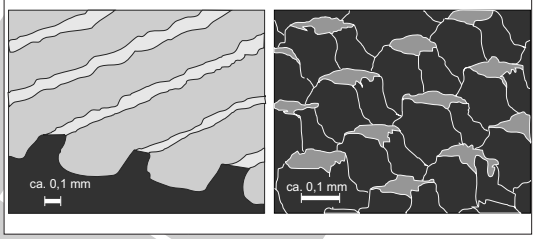
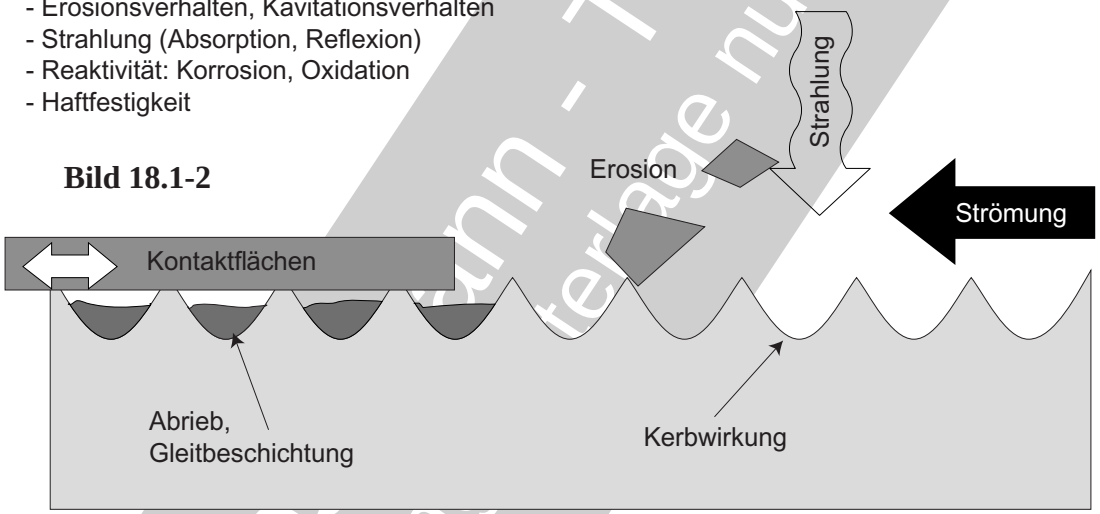
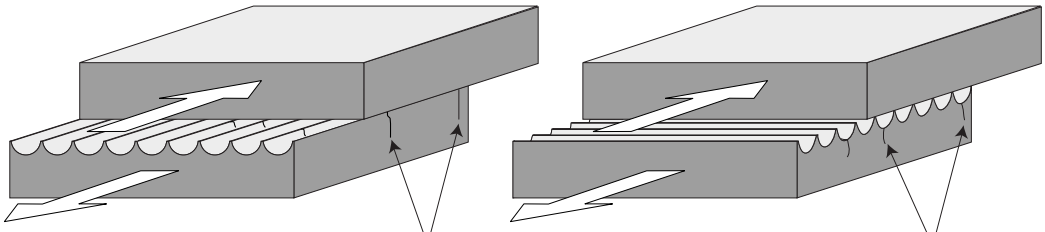


Bild 18.1-2



Die Orientierung der Rauigkeit von Kontaktflächen beeinflusst das Verhalten bei Schwingbelastung auf unterschiedliche Weise.



Rissbildung im Kontaktbereich.
Kontaktzone an den hochbeanspruchten Rauigkeitsspitzen.

Rissbildung im Riefengrund.
Jedoch Trennung von Kontaktzone und hochbeanspruchtem Kerbgrund.

ECM Bohrung in Einkristallen) und Verfahrensbesonderheiten (Gasblasen aus der chemischen Reaktion, Band 3, Bild 12.2.1.2-4) entstehen. Verändern sich Verfahrensparameter so, dass sich unbemerkt eine solche unbewusst benötigte raue Oberfläche nicht bildet, kann dies die Bauteillebensdauer deutlich verkürzen. Dieses Beispiel zeigt die ***Risiken einer Verfahrensumstellung****.*

Verhalten von Auflageflächen: *Hier handelt es sich in erster Linie um die* ***Kontaktflächen***

***der Schaufelfußauflagen**, Flanschflächen, Passflächen und Steckverbindungen. Insbesondere die Auflagen von Schaufeln und Scheiben aus Titanlegierungen sind bei den hohen Flächenpressungen und statischen sowie dynamischen Beanspruchungen zusätzlich von der **Schädigung durch Mikrobewegungen** (Fretting, Band 1 Kapitel 5.9.3) beeinflusst. Dabei kann die Schwingfestigkeit unbehandelter Oberflächen um bis zu 70 % abfallen. Darüber hinaus spielt für die kritische Belastung im Bereich der Kontaktzone die **vom Reibbeiwert abhängige sog. Anstrengung** (Kombination von Biegespannung und Schubspannung; Band 1, Bild 5.9.3-1) eine wichtige Rolle. Deshalb ist für solche **Kontaktflächen ein niedriger Reibbeiwert anzustreben**.*

*Heute werden **frettingbeanspruchte Kontaktflächen kugelgestrahlt**. Neben dem Verfestigungseffekt und schützenden Druckspannungen werden Vorteile dieser ungerichteten Topografie genutzt. Ein niedriger Reibbeiwert über längere Betriebszeiten wird mit dem Einbetten von Gleitmittel (z.B. Grafitlack) und der Aufnahme von Abrieb gewährleistet (Skizze oben). Die entlastende Wirkung der Mikroauflageflächen an den Rauigkeitsspitzen dürfte sich zusätzlich günstig auf die Schwingfestigkeit auswirken.*

Eine gerichtete Topografie der Kontaktflächen, etwa in Form von Querrillen (Skizzen unten) könnte mit der Trennung frettinggeschädigter Zonen vom hochbelasteten Kerbgrund vorteilhaft sein. Die Kerbwirkung der Rillen darf natürlich den positiven Effekt nicht übersteigen. Bisher wurde eine gezielte Untersuchung dieser Möglichkeit der Behandlung von Schaufelfüßen nicht bekannt.

*Rauigkeit hat auch einen Einfluss auf die **Dichtwirkung zwischen den Auflageflächen**. Für Flansche, die einen hohen Differenzdruck von Gasen (z.B. Gehäuseflansche oder Flansche im Öl- und Kraftstoffsystem) abdichten, kann das von Bedeutung sein. Eine „undichte“, radial gerichtete Rauigkeit kann zu Leckagen führen. Ein weiteres Problem kann von den typischerweise **in Umfangsrichtung gerichteten Bearbeitungsriefen in Bohrungen, Zentrieransätzen und Passdurchmessern** ausgehen. Wenn der Widerstand beim Zusammenschieben (Bild 18.5-2) unbemerkt zu hoch wird, begünstigt das eine **Fehlmontage. Mögliche Folgen sind** Unwuchten und Schwingungen. Tritt im Extremfall **Kaltverschweißung** (**Fressen**, engl. „**Galling**“, Bild 18.5-10) auf, ist mit einer gefährlichen Absenkung der Schwingfestigkeit zu rechnen.*

***Schwingermüdung:** Grundsätzlich sind Kerben in Form von Riefen und ungerichtete Beschädigungen (z.B. Anfressungen, Eindrücke) schwingfestigkeitsmindernd anzusehen (Bild 18.1-7). Deshalb ist es geraten, Fertigungsprozesse die Riefen erzeugen (Zerspanungsverfahren wie Schleifen, Schmirgeln, Drehen) entsprechend zu optimieren (Bild 18.1-6). Natürlich sind diese Einflüsse von anderen, wie Verfestigung und Eigenspannungen überlagert und nicht selten entschärft. Leider kann man sich auf solche, eher zufällige Effekte nicht verlassen. Die indirekte Erhöhung der Schwingbelastung eines Bauteils als Folge einer ungünstigen Oberflächentopografie wurde bereits bei der Behandlung des aerodynamischen Verhaltens oder den Reibvorgängen der Auflageflächen angesprochen.*

***Gleit- und Anstreifflächen:** Meist handelt es sich um Dichtflächen. An Tribosystemen, etwa dem Spitzenspalt von **Schaufeln oder Labyrinthen** ist die Rauigkeit des Neuteils nur so lange von Bedeutung, bis der **Anstreifvorgang** die Fläche veränderte. Zur Optimierung des Anstreifverhaltens beschichteter Oberflächen sind Topografien möglich, welche eine bessere Zerspanung der Gegenfläche und/oder geringere Reibungskräfte und Wärmeentstehung erwarten lassen (Lit. 18.1-7). In jedem Fall sollte eine zerspanend wirkende Oberfläche scharfe schnittfähige Kanten (Band 3, Bild 12.2.1.4-*

© Avel Rossmann - Turbo consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

2) und ausreichend Volumen für die Aufnahme des Abriebs bzw. der Späne aufweisen.
Funktionsbestimmende Rauigkeitsforderungen bestehen für ***Gleitflächen*** *wie sie sich z.B. in einer* ***Leitschaufelverstellung*** *befinden. Hier ist spielfreie leichtgängige Führung und Dichtwirkung unter Langzeitumwelteinflüssen gefordert.*
Gleitringdichtungen *dürften bei dem zu erwartenden geringen Verschleiß die fertigungsbedingte Rauigkeit über längere Betriebszeit beibehalten. An* ***Dichtringen aus Elastomeren*** *wird die* ***Profilierung der Dichtflächen*** *zur Minimierung des Leckstroms genutzt. Selbst eine* ***Förderwirkung*** *gegen das Druckgefälle lässt sich nutzen. Umgekehrt erhöhen ungünstig verlaufende Riefen auf der Welle den Abrieb der Dichtlippe und so den Leckstrom. Die Rauigkeit der Kontaktflächen beeinflusst auch* ***Reibkräfte, Reibwärme und Abrieb*** *und damit Notlaufeigenschaften und Lebensdauer.*

Erosionsverhalten: *Gas- und Flüssigkeitsströme, die Partikel oder Gasblasen mit sich führen, wirken erosiv. Eine gerichtet strukturierte Oberfläche kann sich, abhängig vom Anströmwinkel und der Rauheit, unterschiedlich erosionsempfindlich zeigen. Gewöhnlich sind glatte Flächen unempfindlicher.*

Strahlung: *Das Verhalten einer Bauteiloberfläche gegenüber* ***Strahlung (Reflexion, Absorption)*** *ist, wie aus der Anschauung bekannt, von der ungerichteten Rauigkeit in Art und Größe abhängig. Darüber hinaus ist der Winkel in dem die Strahlung auf die Oberfläche fällt von Bedeutung. Dieser Effekt wird von einer gerichteten Strukturierung verstärkt.*
Die Rauigkeit einer angestrahlten Oberfläche ist von Bedeutung, wenn die Aufheizung eines Bauteils merklich über Wärmestrahlung erfolgt. Typische Beispiele sind ***Brennkammerinnenwände und Turbineneintrittsleitschaufeln*** *unter der Strahlung der Flamme.*

Reaktivität: *Chemische Prozesse wie* ***Korrosion und Oxidation*** *werden von der Reaktivität der Neuteiloberfläche bestimmt. Neben der „aktivierten“ metallischen Oberfläche spielt deren Größe eine wichtige Rolle. Besondere Strukturen wie eine Vielzahl feiner Stege und Spitzen (z.B. Mikrograte auf Schleifflächen, Lit. 18.1-10) und/oder die Struktur von Ätzflächen vergrößern die wirksame Oberfläche gegenüber der makrogeometrischen Oberfläche erheblich. Korrosiv wirkende Medien und Verunreinigungen können sich in der „aufgelösten“ Topografie besser festsetzen bzw. sind mit Reinigungsverfahren schlechter zu entfernen. Das wirkt sich auf das „****Foulingverhalten****“ umströmter Flächen (Öl, Luft) aus.*

Haftfestigkeit *(Bild 18.8-4.1) von Schichten und Lacken steht verständlicherweise mit der Topografie der bindenden Oberfläche in Zusammenhang. Diese beeinflusst sowohl eine mechanische Verklammerung als auch chemische Effekte. Thermische Spritzschichten in Form von* ***Thermobarrieren*** *(Wärmedämmschichten) unterliegen im Betrieb hohen Wärmespannungen als Folge der unterschiedlichen Wärmedehnung der keramischen Schicht und des metallischen Substrats. Die* ***Haftfläche*** *muss deshalb für eine gute mechanische Verklammerung ausreichend aufgeraut und strukturiert sein.*
Für eine optimale Haftfestigkeit von thermischen Spritzschichten wurden besondere ***definierte Oberflächenstrukturen*** *erprobt (Skizzen oben rechts, Lit 18.1-8). Eine Serienanwendung wurde jedoch bisher nicht bekannt. Die Haftfestigkeit von Lacken und Beschichtungen auf Kunstharz- und Elastomerbasis beruht mehr auf* ***chemischen Bindungskräften****. Hier steht die reaktive Oberfläche im Vordergrund.*

Zerstörungsfreie Prüfungen *(ZfP): Eine erhöhte Rauigkeit kann die* ***Empfindlichkeit zerstörungsfreier Prüfungen*** *wie* ***Ultraschallprüfung*** *und* ***Wirbelstromprüfung*** *verschlechtern. Bei der Ultraschallprüfung tritt ein höheres Niveau von Störungen auf dem Bild-*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

schirm („Gras“) auf. Das verhindert ein Auffinden kleiner Fehler. Die Wirbelstromprüfung reagiert extrem empfindlich auf Rauigkeitsunterschiede und zeigt diese auch als vermeintliche Fehlstellen an oder überdeckt tatsächlich vorhandene Fehlstellen.
Auch die ***Thermografieprüfung*** *kann mit einem rauigkeitsbedingten* ***veränderten Reflexionsverhalten*** *beeinflusst werden und zu Fehldeutungen führen.*
Fertigungsverfahren*: Ein Beispiel ist der* ***Lotfluss*** *in Spalten (Band 3 Bild 12.2.1.4-4)****. Eine*** *Querorientierung der Rauigkeit, z.B. Bearbeiktungsriefen, kann so zu unzulässigen* ***Bindefehlern*** *führen.*

Bild 18.1-3: *Die* ***Neuteilrauigkeit*** *beeinflusst das Betriebsverhalten der Bauteile (siehe auch Bild 18.1-2). Dabei unterliegen oft* ***verschiedene Zonen eines Bauteils unterschiedlichen Betriebseinflüssen.*** *Dem können* ***angepasste Topografien bzw. Rauigkeiten*** *gerecht werden.*

Verdichterschaufeln: *Die* ***Blattspitze*** *ist* ***Anstreifbelastungen*** *ausgesetzt und hat eine optimale* ***Dichtwirkung*** *beizubehalten. Hier dürfte die Neuteilrauigkeit nur während den ersten Anstreifvorgängen wirksam sein.*
Das Blatt ist insbesondere auf der Druckseite ***Erosion*** *ausgesetzt. In diesem Fall ist damit zu rechnen, dass die Neuteilrauigkeit nach einiger Betriebszeit an Bedeutung verliert. Auf der Saugseite wird beste* ***aerodynamische Qualität****, d.h. niedrige Rauigkeit gefordert. In Strömungsrichtung verlaufende Riefen wirken sich weniger nachteilig aus (Bild 18.1-8). Das lässt sich für die zerspanende Bearbeitung in einer günstigen Bearbeitungsrichtung (Fräsrichtung) nutzen.*
Die ***hochfrequente Schwingbelastung*** *steigt vorzugsweise zur Fußplattform (Grundbiegeschwingung) an. Deshalb sind in dieser Zone Axialriefen zu vermeiden.*
Auflageflächen des Schaufelfußes *sind* ***Fretting, hohen Zug- und Schubspannungen und hoher Flächenpressung*** *ausgesetzt. Neben einer möglichst hohen Schwingfestigkeit (geringe Schädigung) ist ein, für ein Betriebsintervall, möglichst niedriger Reibbeiwert anzustreben. Kantenträger sind zu vermeiden, was besondere Forderungen an die Maßhaltigkeit (Bild 18.9-4) stellt.*

Wälzlager: *Um die von den Überrollvorgängen bestimmte Ermüdungslebensdauer zu garantieren, ist auf hohe Glätte der Laufflächen zu achten.*

Brennkammer: *Die Flamme umschließende Wand ist hohen zyklischen Wärmespannungen und Temperaturen unter oxidierenden Bedingungen ausgesetzt. Aufheizung erfolgt zu einem erheblichen Teil über die* ***Wärmestrahlung der Flamme*** *(Lit. 18.1-7). Die Kühlung ist vom* ***Wärmeübergang auf den Kühlluftschleier*** *abhängig. Daher spielen Rauigkeitseigenschaften für die Wärmeabfuhr der Kühlluft und/oder für Reflexion bzw. Absorption eine Rolle. Entsprechend der typischen Erosion keramischer Wärmedämmschichten oder der Oxidation unbeschichteter Metallflächen ist der Rauigkeitseinfluss des Neuteils jedoch zeitlich begrenzt.*
An den ***Steckverbindungen*** *der Brennkammer spielt* ***Frettingverschleiß*** *unter intensiven Oxidationsbedingungen bei relativ niedriger Flächenpressung eine Rolle. Von einer Beeinflussung dieses Verschleißvorgangs durch die Rauigkeit ist auszugehen.*

Turbinenbeschaufelung: *Die Spitze der Rotorschaufeln muss Anstreifaufgaben unter Beibehaltung hoher Dichtwirkung übernehmen. Dazu wird eine Panzerung mit Hartpartikeln angewendet (Band 3, Bild 12.2.1.4-2). Die Topografie des Neuzustands muss für diese Anforderungen optimiert sein, auch wenn sie beim ersten Anstreifen verschleißt.*

© Klein, Rosemann - Turnoscript
das Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: Oberfläche Topografie, Rauigkeit

Die Betriebsbeanspruchung bestimmter Bauteilzonen stellt spezielle Anforderungen an Oberflächenprofil und Rauigkeit. Das ist vom Konstrukteur und der Fertigung zu berücksichtigen.

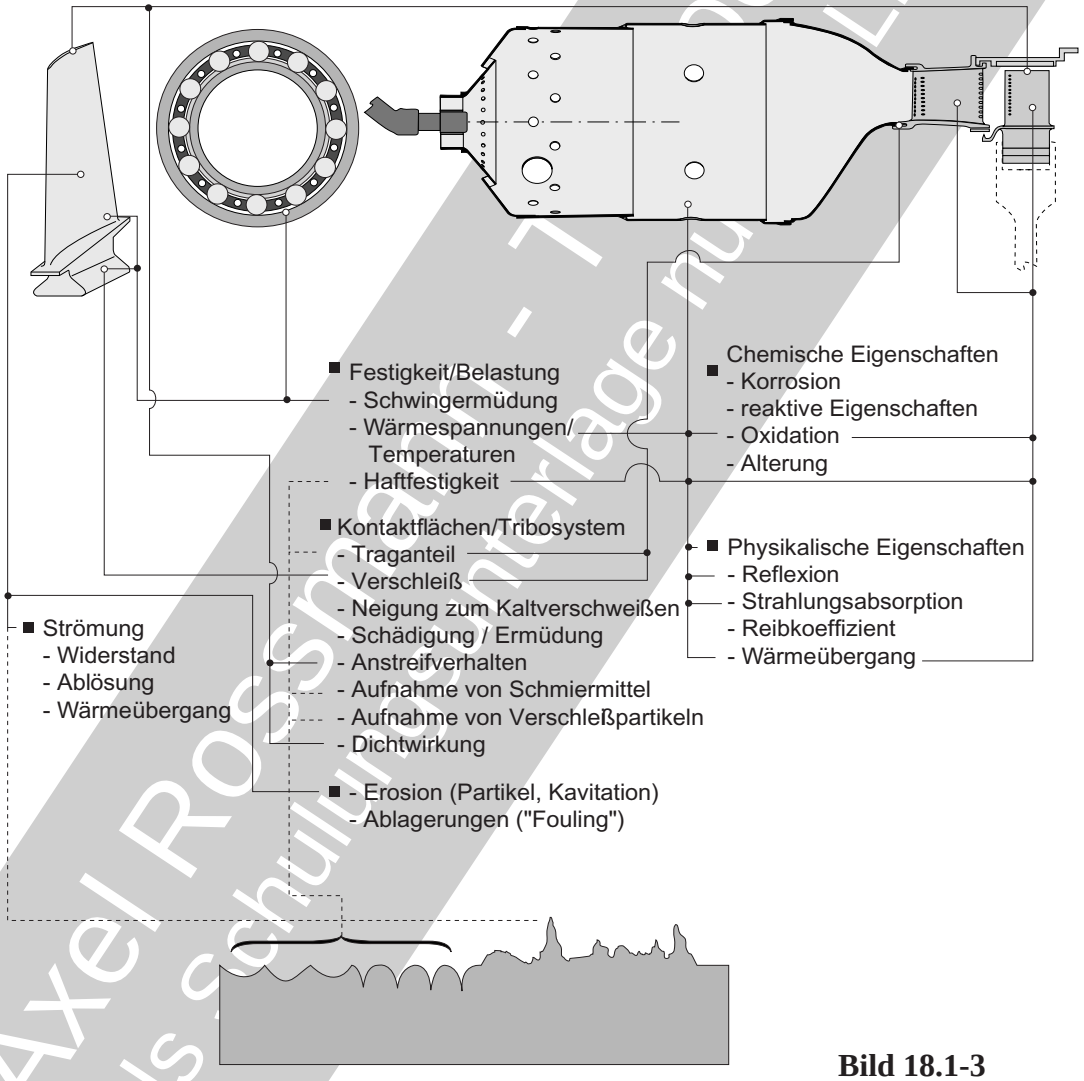


Bild 18.1-3

Das Schaufelblatt soll möglichst wenig Wärme aus dem Gasstrom aufnehmen und besonders die Strahlungsbelastung der ersten Leitschaufelstufe ist zu minimieren. Die Oberfläche der Kühlluftbohrungen im Bauteil und zur Schaufeloberfläche (Kühlluftschleier) ist für eine maximale Kühlwirkung zu optimieren. Das erfordert einen Kompromiss zwischen ***Wärmeübertragung in die Kühlluft*** *bei einem akzeptablen Strömungswiderstand. Gleichzeitig ist ein möglichst guter Oxidationsschutz zu gewährleisten.*

Die Füße der Rotorschaufeln*, insbesondere im Auflagebereich müssen den hohen* ***zyklischen Belastungen und der Frettingbeanspruchung*** *gerecht werden. Die Steckverbindungen der Leitschaufeln an Übergängen zu Brennkammer, Gehäuse und den Dichtblechen stehen ebenfalls unter Frettingverschleiß und sind von den Rauigkeiten beeinflusst.*

© Axel Rossmann - Tec... Lt
als Schulungsunterlage nur...

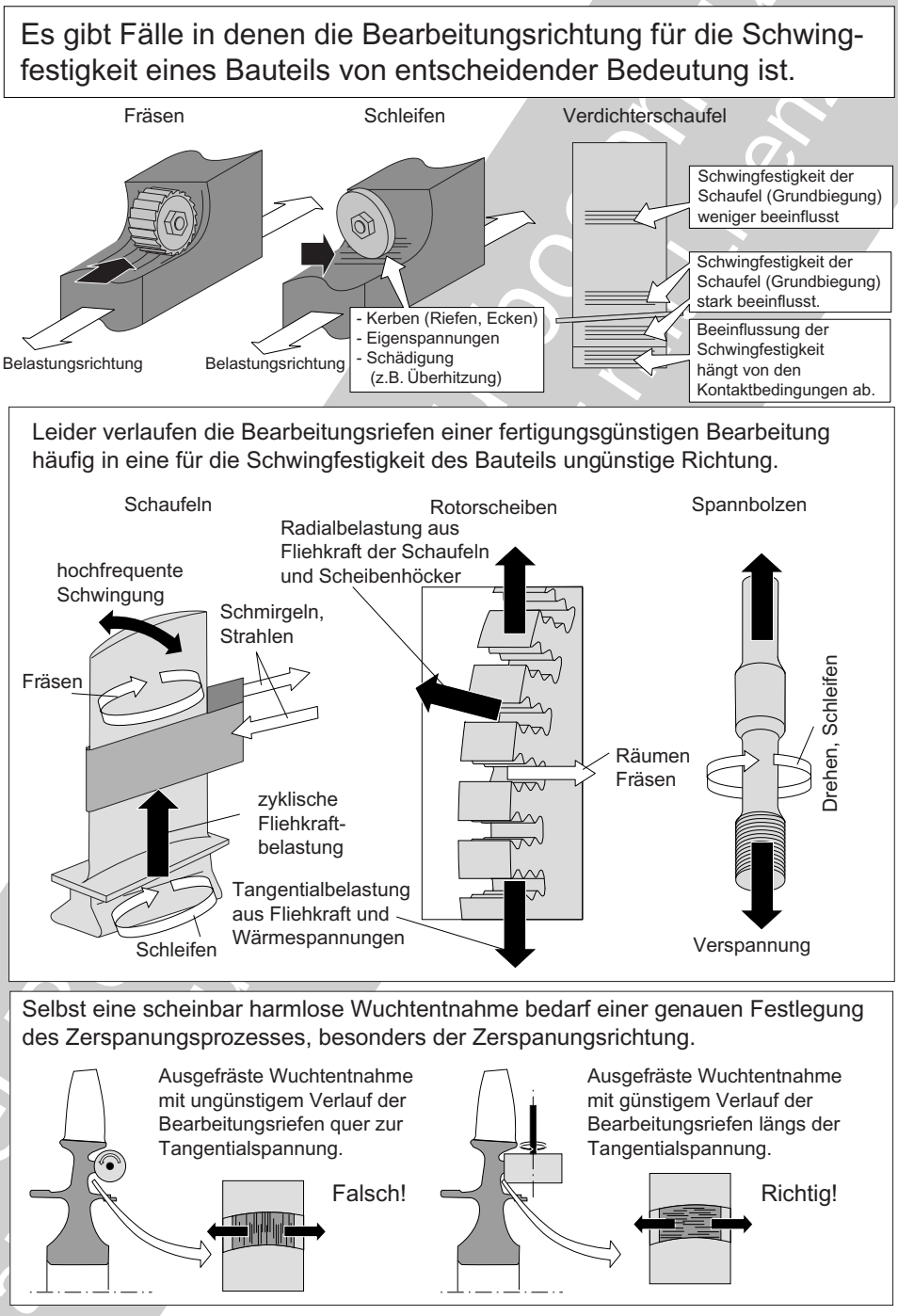


Bild 18.1-4

Bild 18.1-4: *Die* ***Bearbeitungsrichtung*** *kann die Schwingfestigkeit an der Oberfläche eines Bauteils auf mehrfache Weise beeinflussen:*
- Entfestigung (Abtrag einer verfestigten Zone)
- Zugeigenspannungen
- Bearbeitungskerben
Dabei spielt verfahrensabhängig das Werkzeug (Geometrie, Steifigkeit, Schneidstoff), die Bearbeitungsrichtung und die Intensität (Vorschub, Spantiefe, Schnittgeschwindigkeit) eine Rolle.
Die folgende Betrachtung soll sich auf Parameter der ***Topografie*** *beschränken.*
Gerichtete Riefen, wie sie in ***Zerspanungsrichtung*** *entstehen, beeinflussen die Schwingfestigkeit am stärksten, wenn sie quer zur Beanspruchung verlaufen. Dies ist z.B. bei* ***Verdichterschaufeln*** *für zyklische Fliehkräfte (LCF)*

© Axel Kramer, Ingenieurbüro Cottbus

und die Grundbiegeschwingung (LCF) die axiale Richtung. Bei Schwingformen höherer Ordnung wie die „Lyramode" der Blattkanten (Band 1, Bild 5.4.3.3-2 und 5.4.3.3-10, Lit. 18.1-17) sind auch radial verlaufende Riefen der Ausgang von Schwingrissen. Besonders hoch sind der Blattübergang in die Fußplattform, der Schaft zum Fuß und das Fußprofil (Schwalbenschwanz) dynamisch beansprucht. Die Schwingfestigkeit in und um die Auflageflächen kann durch Reibverschleiß (Fretting) zusätzlich vermindert werden. Dieser Effekt ist auch von der Topografie beeinflusst.

Bei Rotorscheiben liegt im Oberflächenbereich eine ausgeprägte zweidimensionale Spannungsverteilung vor. Tangential- und Radialspannungen sind durchmesserabhängig. Im Bereich der Nabenbohrung sind gewöhnlich die Tangentialspannungen besonders hoch, die Radialspannungen Null. Daher sind in diesem Bereich axial verlaufende Riefen gefährlich. Glücklicherweise sind sie von den üblichen Zerspanungsverfahren (Drehen) eher nicht zu erwarten. Nach außen nimmt die Radialspannung zu, sodass Umfangsriefen (siehe auch Band 3, Bild 12.2.1.1.1-3, Bild 12.2.1.1.1-6 und Bild 12.2.1.1.2-3.2) an Bedeutung gewinnen. Am Kranz entsteht die Radialspannung im Bereich der Aufnahmenuten durch die Fliehkraft der Scheibennocken und Schaufeln.

Leider bietet sich für typische Bearbeitungsverfahren eine Zerspanungsrichtung an, die Riefen quer zur Hauptbeanspruchung erzeugt (Skizzen unten).

*Das Runden von **Schaufelkanten** durch abrasives Strahlen oder Schmirgeln lässt Riefen quer zur bevorzugten Schwingbelastung entstehen. Dies kann auch für das Fräsen des Blattes gelten. Fräsen oder Schleifen des **Schaufelfußes** führt im dargestellten Fall zu Axialriefen quer zur Belastung durch Blattschwingungen (HCF-Bereich) und durch zyklische Fliehkraftänderung (LCF-Bereich).*

*Tannenbaum- oder Schwalbenschwanz-Scheibenhöcker werden gewöhnlich geräumt, in seltenen Fällen gefräst. Hier liegt eine axiale Zerspanungsrichtung vor, die quer zu den zyklischen Tangentialspannungen aus Fliehkraft und Wärmedehnungen liegt. Die Spannungen werden durch die Kerbwirkung der Nutgeometrie erhöht. In der Scheibenmembrane verlaufen die **Riefen aus der üblichen Drehbearbeitung** quer zu den Radialspannungen.*

*Rotoren von Turbinen und Verdichtern, insbesondere älterer Triebwerkstypen und Gasturbinen kleiner Leistung, werden durch mehrere über den Umfang verteilte, oder einen zentralen **Zuganker** (**Spannbolzen**) verspannt. Diese Spannbolzen sind durch die zyklische Vorspannung (Wärmedehnungen zwischen Rotor und Spannbolzen) und möglicherweise durch Biegeschwingungen des Rotors und/oder eines zentrischen Spannbolzens (Lit. 18.1-17) hoch zugschwellbelastet. Diese Beanspruchung wirkt quer zu Dreh- oder Schleifriefen am hochbelasteten Schaft (Bild 18.1-7).*

*Im untersten Rahmen ist ein Beispiel dargestellt, das zeigt, dass auch scheinbar untergeordnete Bearbeitungsvorgänge genau zu spezifizieren sind. Im Wuchtbund eines Turbinenrads herrschen in erster Linie Tangentialspannungen. Bei der **Wuchtentnahme** (Fräsen, Schleifen) bietet sich die links skizzierte Situation an. Diese erzeugt jedoch ungünstig radial verlaufende Bearbeitungsriefen. Daher ist eine Bearbeitungsrichtung, entsprechend der rechten Skizze, vorzuschreiben, die nur Bearbeitungsspuren in tangentialer Richtung entstehen lässt.*

Merksatz:

Die **Zerspanungsrichtung** in hochbeanspruchten Bauteilzonen muss die Belastung berücksichtigen und ist mit dem Konstrukteur **festzulegen**. Von ihr darf **nicht** ohne Genehmigung **abgewichen** werden.

© AxoProSim - TurbomaschinenConsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Die Bruchmechanik ermöglicht die Abschätzung des potenziellen Einfluss der Oberflächentopografie bzw. Rauigkeit auf die Schwingfestigkeit des Bauteils. Der Werkstoff und die Höhe der Betriebsbeanspruchung spielen dabei eine wichtige Rolle.

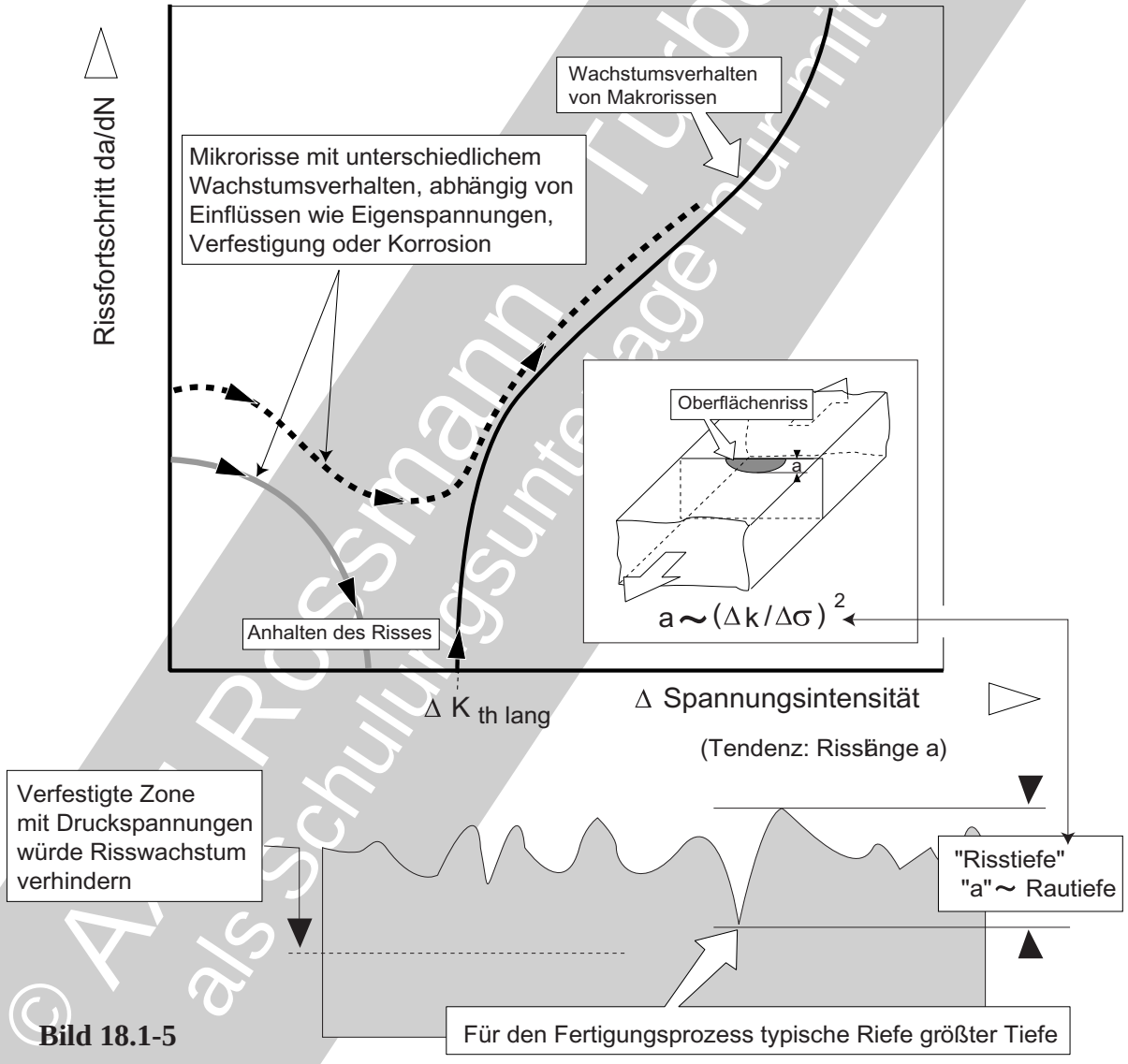


Bild 18.1-5

Bild 18.1-5: *Die* ***Spannungskonzentration*** *lässt sich mit einer Belastung vergleichen, während die* ***Risszähigkeit*** *(mit der gleichen Dimension) einer Werkstoffeigenschaft wie der Bruchspannung entspricht. Im* ***Paris-Diagramm*** *ist der* ***Rissfortschritt über der sogenannten Spannungskonzentration „k“ als Schwingausschlag*** *„Δk“ für eine zyklische Beanspruchung aufgetragen. „k“ gibt die Belastung an der Rissspitze bei einer äußeren Spannung an. Ist die Tiefe des Risses oder einer scharfen Kerbe ausreichend klein bzw. die Spannung niedrig genug, erfolgt kein Risswachstum. Der Grenzwert „Δk_{th}“ (engl.*

*„**Threshold**“) wird nicht überschritten. In Sonderfällen, zu denen z.B. Titanwerkstoffe neigen, können auch sehr kleine Risse und Kerben unterhalb des Threshold wachstumsfähig sein. Sieht man von Effekten wie Verfestigung und Eigenspannungen ab, lässt sich bruchmechanisch die Tiefe „a“ einer anrissgefährlichen **Riefe** bzw. die Rautiefe „R“ für eine bekannte dynamische Beanspruchung „$\Delta\sigma$“ abschätzen. Dabei muss die Risszähigkeit „Δ k“ als Werkstoffeigenschaft bekannt sein (Band 1, Bild 4.3-4).*

***Bild 18.1-6:** Fertigungsverfahren erzeugen die **Oberflächentopografie,** werden aber von der bereits vorhandenen Topografie beeinflusst. Diese Auswirkungen sollen an einigen typischen Beispielen dargestellt werden:*

***Löten:** Eine größere **Rauigkeit** vergrößert zwar die vom Lot **benetzte Oberfläche**, von einem positiven Einfluss auf die Festigkeit ist aber nicht auszugehen (Band 3, Bild 12.2.1.4-3, Lit 18.1-11). Die **Orientierung der Rauigkeit** bei Bearbeitungsriefen beeinflusst den **Lotfluss** in den Spalt. Deshalb sind **ausgeprägte Querriefen zum erwünschten Lotfluss zu vermeiden** (Band 3, Bild 12.2.1.4-4, Lit. 18.1-12). Auch kalottenförmige Topografien (Lit 18.1-13) **kugelgestrahlter Oberflächen** können offenbar den Lotfluss behindern. Vorteilhaft können sich dagegen **Bearbeitungsriefen in Richtung des gewünschten Lotflusses** auswirken. Es ist möglich, eine solche gewünschte Topografie gezielt mit einem geeigneten Verfahren (prägend) einzubringen. Der Einfluss der Rauigkeit auf die Lötung dürfte sich bei engen Spalten und viskosen Lotschmelzen besonders bemerkbar machen. Hochtemperaturlote auf Ni-Basis für Heißteile lassen eine besondere Empfindlichkeit erwarten. Um den Grundwerkstoff möglichst wenig zu schädigen(Diffusion, Gefügeveränderung) werden die hohen **Löttemperaturen** möglichst im unteren Anwendungsbereich gewählt. Das hat eine höhere **Viskosität der Lotschmelze** mit entsprechend behinderter Spaltfüllung zur Folge. **Je länger der Spalt** und damit der Lotfluss, umso größer werden die Effekte und der Einfluss der Rauigkeit wenn **Diffusionsvorgänge zwischen Schmelze und Grundwerkstoff** die Viskosität zusätzlich erhöhen.*

***Thermisches Spritzen:** Um die gewünscht hohe **Haftfestigkeit** metallischer oder keramischer Schichten mit Hilfe einer **formschlüssigen Verklammerung** (Band 3, Bild 12.2.1.8.2-3.2) zu gewährleisten, ist eine optimierte Topografie der Oberfläche anzustreben. Meist lässt sich das mit der Festlegung des Bearbeitungsverfahrens und der Rauigkeit erreichen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass **allein die Rauigkeitsforderung eine gewünschte Topografie wie offene Porosität und ausreichende „Zerklüftung“ nicht gewährleistet** (Bild 18.1-1). Deshalb kann nicht ohne ausreichende absichernde Nachweise, das die Oberflächenstruktur der Haftfläche gewährleistende Verfahren, z.B. aus Verfügbarkeits- oder Kostengründen, geändert werden. Für die Grundwerkstoffoberfläche ist **abrasives Strahlen** üblich. Folgt dann eine Haftschicht, muss auch diese eine ausreichende Topografie für die Bindung mit der „Funktionsschicht“ erhalten.*

***Verfahren im Vakuum** (Elektronenstrahlschweißen = EB, Diffusionsschweißen, Warmbehandlung): Beim EB- und Diffusionsschweißen werden gewöhnlich zu verschweißende Planflächen zusammengedrückt. Weisen diese Flächen **Schleif- oder Drehriefen in der üblichen Umfangsrichtung** auf, können Verunreinigungen oder Ätz- und Reinigungsmittelrückstände, aber auch Luft, eingeschlossen werden (Band 3, Bild 12.2.1.3.3-4). Ist so ein ausreichendes Abdampfen bzw. **Ausgasen im Vakuum nicht mehr gewährleistet,** können diese Gase beim Schweißvorgang frei werden und Fehlstellen wie Oxidation und Porosität begünstigen. In der Rauigkeit „gefangene“ Gase und Verunreinigungen können auch das Evakuieren bei **Wärmebehandlungen** er-*

© Vogel Business Media - Tutorconsult
Das Seminarunterlagen-Optimierer

schweren. Abhängig von der Aufheizgeschwindigkeit kommt es dann zu unerwünschter Reaktion (Oxidation) an den Oberflächen.

Reinigen und Spülen: *Die Wirksamkeit dieser Verfahren ist auch von der Rauigkeit der Oberflächen abhängig. Verunreinigungen die sich in „Kavernen" festgesetzt haben sind verständlicherweise schlecht zu entfernen. Selbst wenn die Reinigung gelingt, wird doch die* ***Verschleppung von Bädern und Verunreinigungen*** *unterstützt. Gegebenenfalls kann sich ein Film von Verunreinigungen an der Badoberfläche sammeln und weitere Teile „infizieren" (Bild 17.3.1-8). Eine unbefriedigende Reinigung kann sich auch auf folgende Prüfverfahren auswirken. Hierzu gehört die Empfindlichkeit der Eindringprüfung und die Auswertbarkeit von Makroätzungen an Schmiedeteilen.*

Zerstörungsfreie Prüfungen *(Lit 18.1-2): Die Topografie mit der Rauigkeit einer Oberfläche können die Empfindlichkeit mancher zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) entscheidend beeinflussen. Große Rauigkeit ist für die Ankopplung von* ***Ultraschallsensoren*** *ungünstig. Damit wird besonders die Auffindbarkeit oberflächennaher Fehler beeinträchtigt.*
Große Rauigkeiten und Verschmutzung haltende Topografien (Mikrograte, Bild 17.3.1-4; Anfressungen, von Gefügebestandteilen, offene Porosität) führen zu ***Hintergrundfluoreszenz*** *bei der Eindringprüfung. Zusätzlich wird die Erkennbarkeit feiner* ***Risse von parallel verlaufenden Riefen*** *deutlich erschwert. Solche ungünstigen Oberflächen entstehen auch bei typischerweise intensivem* ***abrasiven Strahlen*** *von Feingussoberflächen nach dem Gießprozess und dem Entfernen der Formschalen. Hier wirkt sich erschwerend das Zuhämmern und Verstopfen von Fehlstellen (Porosität, Mikrorisse) mit Strahlgut aus. Die* ***Wirbelstromprüfung*** *reagiert äußerst empfindlich auf geringste oberflächennahe Inhomogenitäten und Rauigkeiten die Fehlstellen überdecken. Man erkennt, dass* ***hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit*** *und Auffindsicherheit der genannten Prüfverfahren (Bild 17.3.1-2 und Bild 17.3.1-3) eine* ***entsprechend geringe Rauigkeit*** *erfordern.*

Galvanische Prozesse: *Die Güte abgeschiedener Metallschichten, in erster Linie Cr- und Ni-Schichten, ist auch vom* ***Rauigkeitsprofil*** *(bessere Abscheidung an Spitzen) und der Rautiefe abhängig (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-5). Größere Fehlstellen wie Ätzgrübchen und Mikrograte können die Beschichtung positiv (z.B. Haftfestigkeit) oder negativ (z.B. Dickenschwankungen, Struktur) beeinflussen. Die* ***Reaktivität*** *einer großen Oberfläche kann sich zu Beginn auf die Abscheidungsgeschwindigkeit und dann auf die Schichteigenschaften (z.B. Eigenspannungen, Rissbildung), besonders Glanz/Glätte auswirken. Damit könnte auch das Ergebnis einer Nachbearbeitung wie Schleifen beeinflusst werden (Rissbildung).*

Verformungsverfahren*: Verfahren wie* ***Tiefziehen*** *und* ***Drücken****, bei denen das Material spanlos über einen Kontakt mit dem Werkzeug örtlich stark plastisch verformt wird, können auf Oberflächenrauigkeit auf zweifache Weise reagieren:*
-Kerben wie Riefen und Ätzgrübchen, insbesondere quer zur Hauptverformungsrichtung, können zu ***Anrissen (****Rissfelder)* ***bis zum Bruch des Teils*** *führen.*
- Die Rauigkeit kann höhere Reibungskräfte beim Umformen erfordern und so den ***Werkstoff in Form der sog. Anstrengung überlasten*** *(Rissbildung)****.*** *Auch die Blechstärke kann unerwünscht variieren und das spätere Bauteilverhalten gefährlich verschlechtern (z.B. Schwingungen, Bild 18.9-2) .*

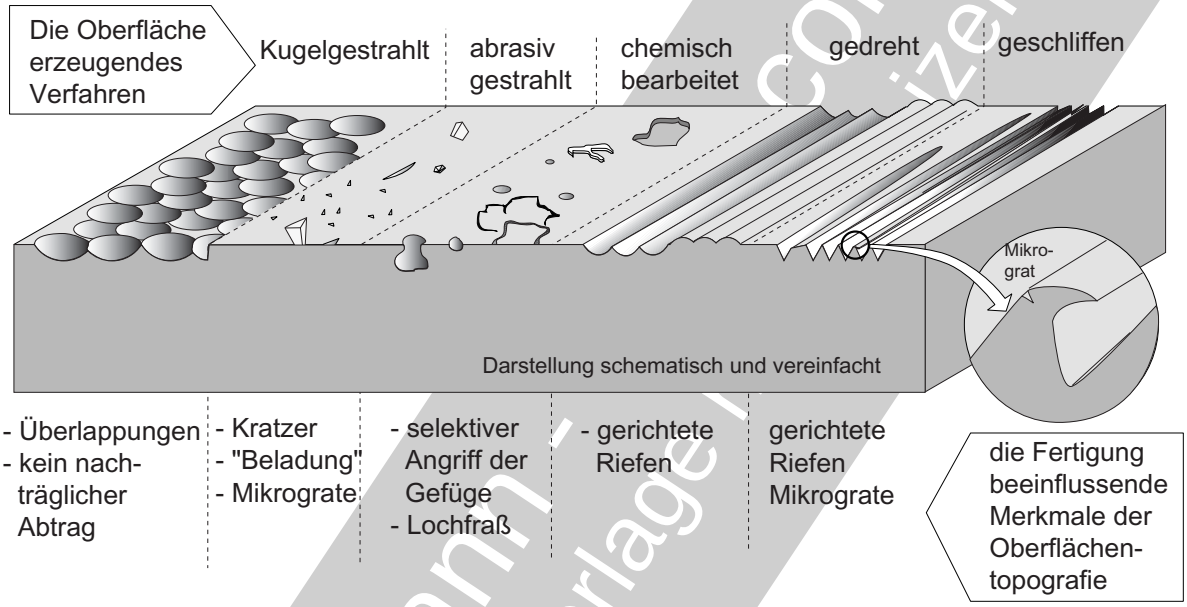
Chemische Verfahren: *Hierzu gehören* ***Ätzverfahren*** *und das* ***Brünieren****. Die beim Ätzen entstehende Topografie kann, abhängig von Werkstoff, Badzustand und Prozessparametern*

Fortsetzung auf Seite 18.1-18

© AGBossmann - Tribocontact
Lizenzunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Oberfläche Topografie, Rauigkeit

Oberflächentopografie und Fertigungsverfahren beeinflussen sich wechselseitig.



Verfahren, Fertigungsprozess	Auswirkungen einer ungünstigen Oberflächentopografie
Löten	Lotfluss/Spaltfüllung, Festigkeit
Thermisches Spritzen	Ablösung von Schichten
Verfahren im Vakuum: EB, Warmbehandlung, Diffusionsschweißen	Evakuierung des Spalts erschwert , Schweißfehler, und Oxidation
Reinigung, Spülen	Erschwert, Verbleib von Badresten, ungleichmäßige Wirkung
Zerstörungsfreie Prüfung: Eindringprüfung, Wirbelstrom	Erschwert durch schlechtere Empfindlichkeit wegen Hintergrundfluoreszenz und Fehlanzeigen
Galvanische Prozesse: Metallbeschichtung	Ungünstige Schichtstruktur, Ablösung, Prozessparameter
Verformungsverfahren: Tiefziehen, Drücken	Rissbildung, unerwünschter Verformungs- und Querschnittsverlauf
Chemische Verfahren, z.B. Ätzverfahren und Brünieren	Rissbildung an Kerben/Riefen (SpRK) Auswertbarkeit von Gefügen bei Makroätzungen
Mechanische Glättungsverfahren	Erschwert
Diffusionsbeschichtung	Schichtaufbau: Fehler, ungleichmäßige Dicke. Beschichtungsparameter
Zerspanung	Haftung bzw. Wirkung von Schneidflüssigkeit

(kein Anspruch auf Vollständigkeit)

Bild 18.1-6

© Axel Rossmann - als Schulungsunterlage konsultiert

Fertigung: Oberfläche Topografie, Rauigkeit

Fortsetzung von Seite 18.1-16

sehr unterschiedlich sein. Typische Merkmale sind ***Ätzgrübchen, Korngrenzenangriff oder Kornflächenangriff*** *(Band 3, Bild 12.2.1.7-6, Lit. 18.1-10). Die so erzeugte Rauigkeit beeinflusst z.B. die* ***Eindringprüfung*** *und die* ***Auswertbarkeit von Makroätzungen*** *um Seigerungen zu finden (****Seigerungsätzen****).*
Das Brünieren wird im Triebwerksbau an Stählen von ***Getriebezahnrädern*** *und Wellen angewandt (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-11). Bei ausreichend hohen Zugspannungen an der Bauteiloberfläche kann es im Bereich kleiner Kerben wie Bearbeitungsriefen zur* ***Rissbildung*** *(SpRK) kommen.*

Mechanische Glättungsverfahren: *Diese werden verständlicherweise mit steigender Rauigkeit erschwert.*

Diffusionsbeschichtungen: *Rauigkeiten und darin eventuell festsitzende Verunreinigungen können den Diffusionsvorgang beeinträchtigen und Schichtfehler auslösen.*

Diffusionsschweißen: *Dieses Verfahren kann auf eine zu hohe Rauigkeit äußerst empfindlich reagieren. Ein zu niedriger Anpressdruck kann lediglich an den Rauigkeitspitzen eine Bindung ermöglichen. So entstehen kaum auffindbare* ***Klebestellen*** *(Band 3, Bild 12.2.1.3.3-3 und Bild 12.2.1.3.3-9).*

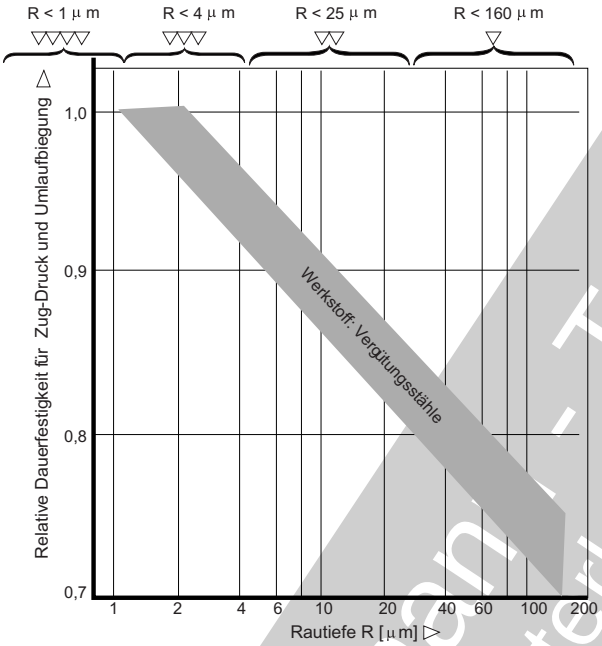
Zerspanung: *Bearbeitungsriefen können sich auf viele nachfolgende Fertigungsschritte auswirken und wurden bereits in den zugehörigen Abschnitten angesprochen.*
Ein Rauigkeitseffekt der den Zerspanungsprozess selbst beeinflussen kann ist die ***Anhaftung von Kühlschmiermittel*** *auf der zu zerspanenden Oberfläche. Dies kann z.B. den Werkzeugverschleiß und die Schnittkräfte mindern, was sich wiederum auf die Topografie der neuen Bearbeitungsfläche auswirkt.*

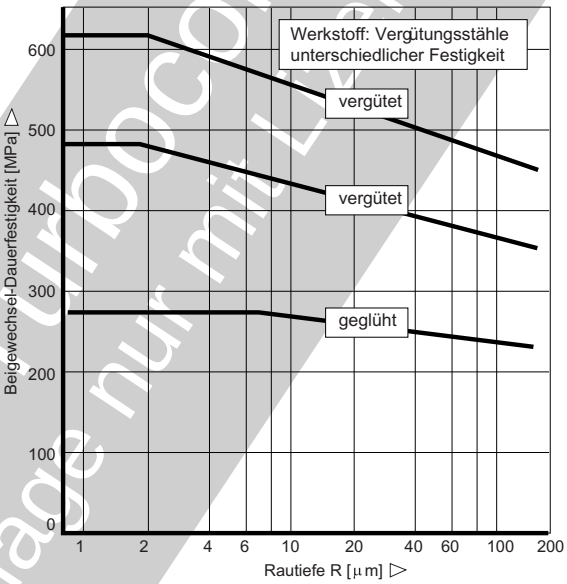
Bild 18.1-7 *(Lit 18.1-16): Dieser älteren Literatur lassen sich interessante Folgerungen über die* ***Auswirkung der Rauigkeit auf die Schwingfestigkeit*** *metallischer Werkstoffe entnehmen, obwohl die Untersuchungen in erster Linie an Stählen durchgeführt wurden.*
Bei der Rautiefe blieb die geometrische Form der einzelnen Riefen unberücksichtigt. Es ist jedoch anzunehmen, dass auch Prozessparameter wie Vorschubgeschwindigkeit und Drehmeißelgeometrie einen Einfluss auf die Schwingfestigkeit haben (Bild 18.1-8).
In den oberen Diagrammen ist deutlich zu erkennen, dass der ***Abfall der Schwingfestigkeit mit der Rauigkeit bzw. der fertigungsbedingten Oberflächenqualität zusammen hängt*** *(Diagramm oben links). Dieser Abfall entsprechend einer e-Funktion erfolgt aber erst ab einer „****Grenzrautiefe****“ (Diagramm oben rechts). Sie ist offenbar unabhängig von der Beanspruchungsart (Biegewechsel, Zug-Druck, Zug-Schwell).*
Aus heutiger Sicht lässt sich die Grenzrautiefe bruchmechanisch erklären. Sie ist im Zusammenhang mit dem Grenzwert der Spannungsintensität (K_{th}) zu sehen (Bild 18.1-5). Unterhalb dieses werkstoffspezifischen Wertes, der einer Schwingbelastung bei einer bestimmten Fehlergröße entspricht, ist nur in Sonderfällen mit einem Risswachstum zu rechnen. Die Grenzrautiefe ist wie K_{th} werkstoffabhängig. Es wird vermutet, dass die Grenzrautiefe von der Korngröße beeinflusst ist. Dies weist auf einen Zusammenhang mit dem heute bekannten Wachstum kleiner Risse unterhalb von K_{th} hin.
Der Einfluss der Rauigkeit auf die Dauerfestigkeit *ist offenbar von der Spannungsverteilung und dem* ***Spannungsgefälle ins Bauteilinnere*** *unabhängig. Das ist damit zu erklären, dass sich die Rauigkeit auf eine sehr dünne Oberflächenschicht beschränkt. Auch die Bauteilgröße dürfte daher kaum einen Einfluss auf die Auswirkung der Rauigkeit haben. Ein merklicher Einfluss ist dann zu erwarten, wenn die Rissfortschrittsphase dominiert.*

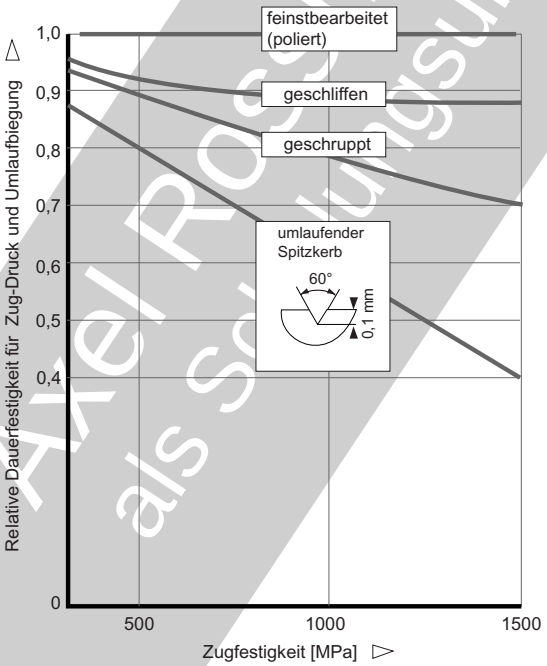
Fortsetzung auf Seite 18.1-20

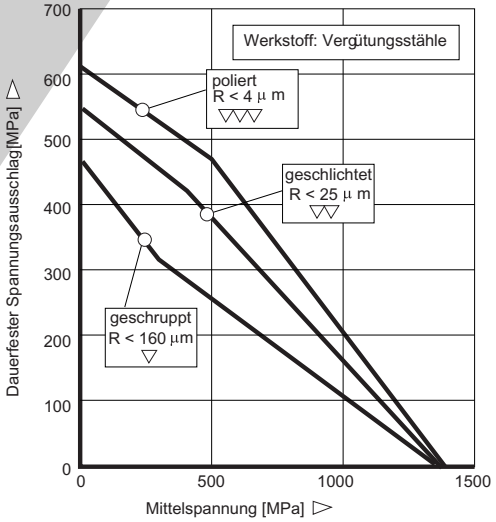
© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss der Rauigkeit auf die Schwingfestigkeit









Einfluss des Nitrierens auf die Schwingfestigkeit

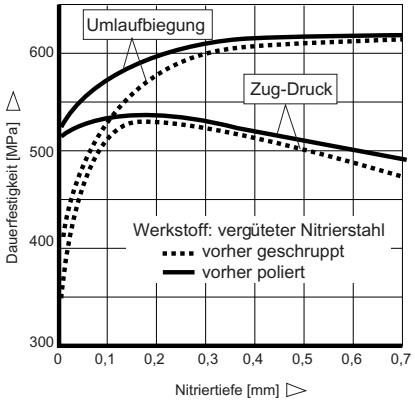


Bild 18.1-7

© Axel Rossmann - Turbocad
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Oberfläche Topografie, Rauigkeit

Fortsetzung von Seite 18.1-18

Der verfahrensbedingte Einfluss der Oberflächenqualität (poliert, geschliffen, geschruppt) auf die Dauerfestigkeit verhält sich, wie aus Diagramm unten rechts zu entnehmen, entsprechend der Rautiefe. Dies gilt auch für einzelne Riefen. Es ist jedoch anzumerken, dass ***Riefen die zusätzliche merkliche Zugeigenspannungen*** *einbringen (z.B. Schleifen) sich sehr viel schädigender auf die Schwingfestigkeit auswirken können als der geschruppte Zustand vergleichbarer Rautiefe.*

Die Wirkung der Rauigkeit auf die Schwingfestigkeit wird von Vorspannung bzw. Mittelspannung beeinflusst (Diagramm Mitte rechts). Die raue Oberfläche führt bei niedrigen ***Mittelspannungen*** *zu schnellerem Schwingfestigkeitsabfall als* ***feinere Oberflächen****. Dieser Einfluss nimmt jedoch bei höheren Mittelspannungen ab.*

Ist die ***Schwingfestigkeit einer Schicht höher als die des Grundmaterials****, kommt das der Schwingfestigkeit des Systems zugute. Das Diagramm rechts unten zeigt, dass solche Schichten auch den Einfluss der Rauigkeit auf die Schwingfestigkeit verringern können. Voraussetzung ist eine ausreichend große Schichtdicke. Nitrierschichtdicken die dünner als 0,1 mm sind, steigern die Schwingfestigkeit gegenüber dem unbeschichteten Zustand einer geschruppten Oberfläche deutlich weniger als die von einer polierten Oberfläche. Die Schwingbrüche begannen an allen Proben unterhalb der Schicht (Bild 18.4-9.2). Sie stehen also in keinem Zusammenhang mit der Rauigkeit. Bei Nitrierschichten ausreichender Dicke (oberhalb 0,2 mm) kann also gegebenenfalls auf eine Feinbearbeitung verzichtet werden.*

Bild 18.1-8: *Dieser* ***LCF-Schwingbruch entstand an einem Spannbolzen*** *für die axiale Verspannung eines Rotors. Der Werkstoff ist eine Ni-Basis Schmiedelegierung. Man erkennt deutlich die* ***Anrisse in den umlaufenden Drehriefen*** *(Bild oben links). Das Bild oben rechts zeigt einen metallografischen Schliff*

© Kissmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

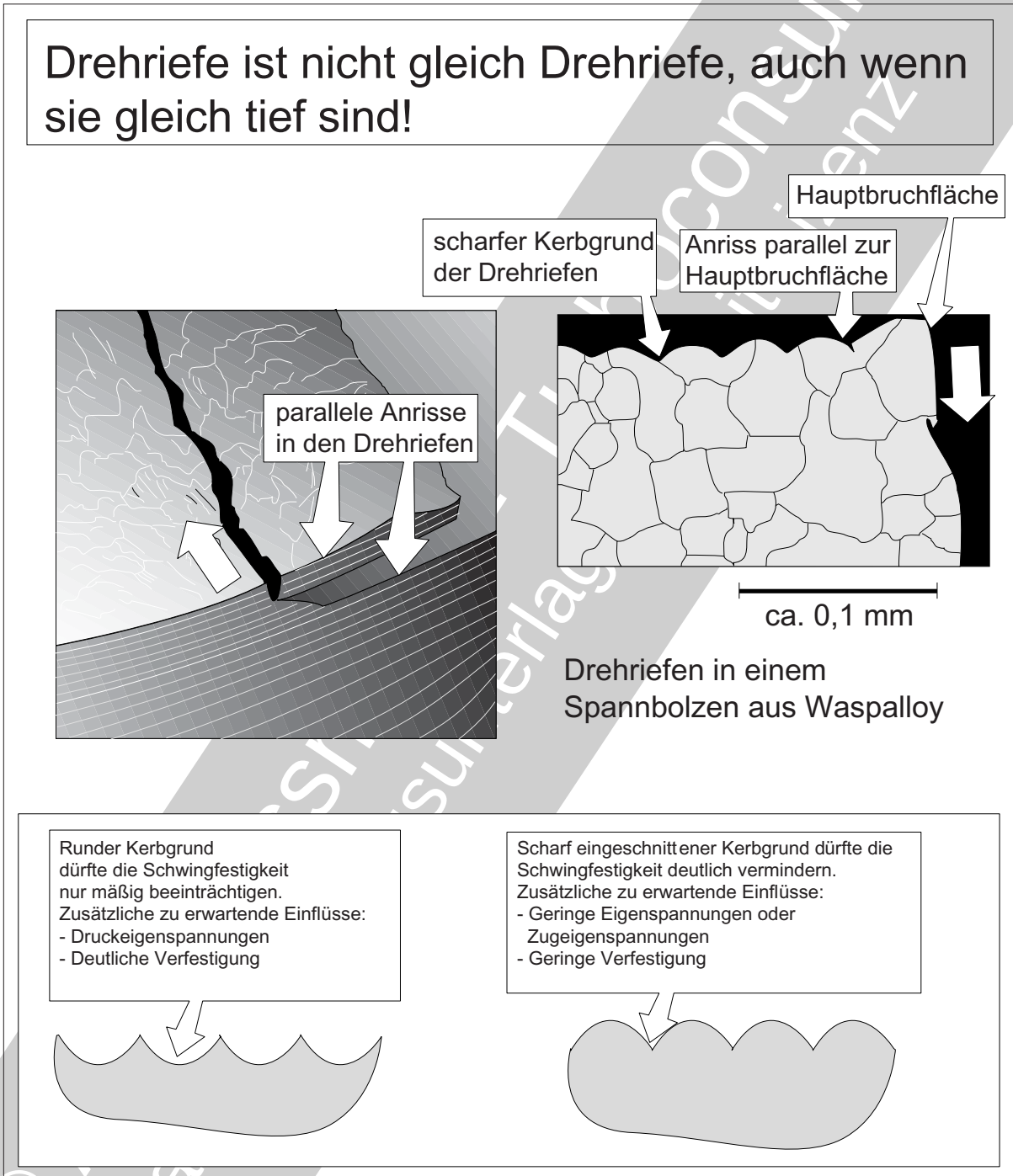


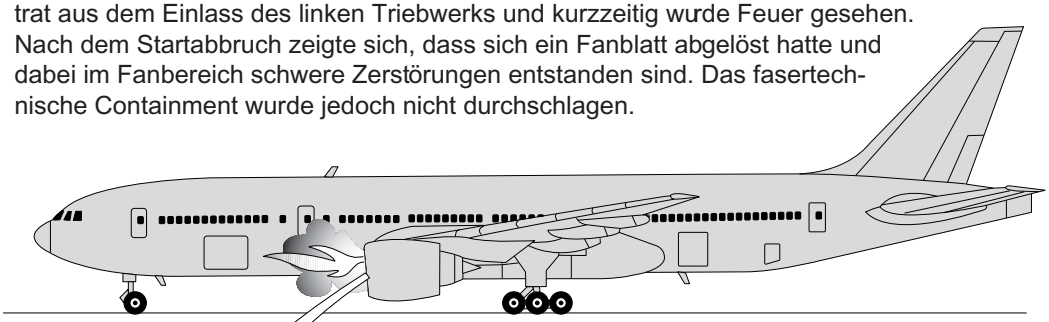
Bild 18.1-8

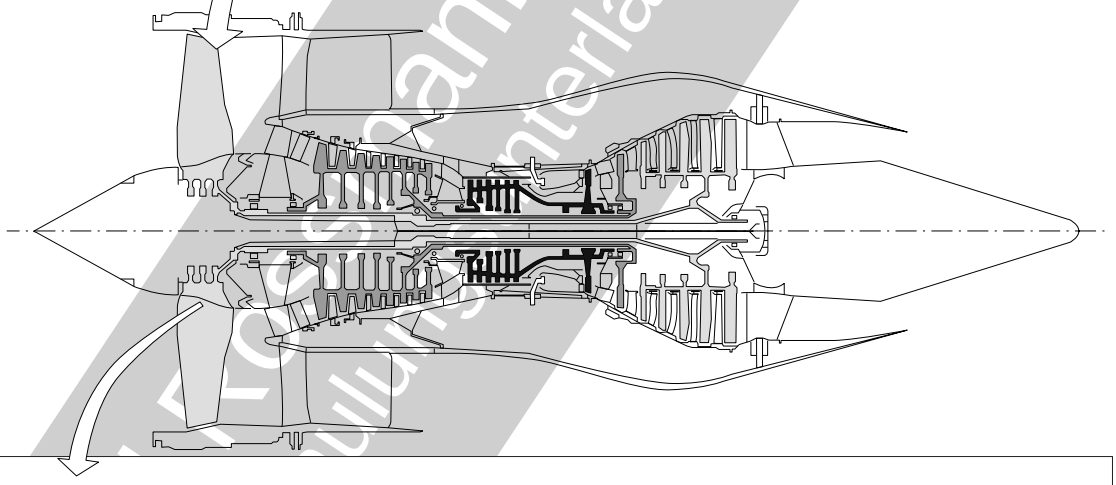
quer zu den Drehriefen. Der scharfkantige Riefengrund ist an mehreren Stellen angerissen. Die Skizzen unten zeigen schematisch die unterschiedlich schädigende Wirkung verschiedener Riefenformen (Bild 18.1-1).

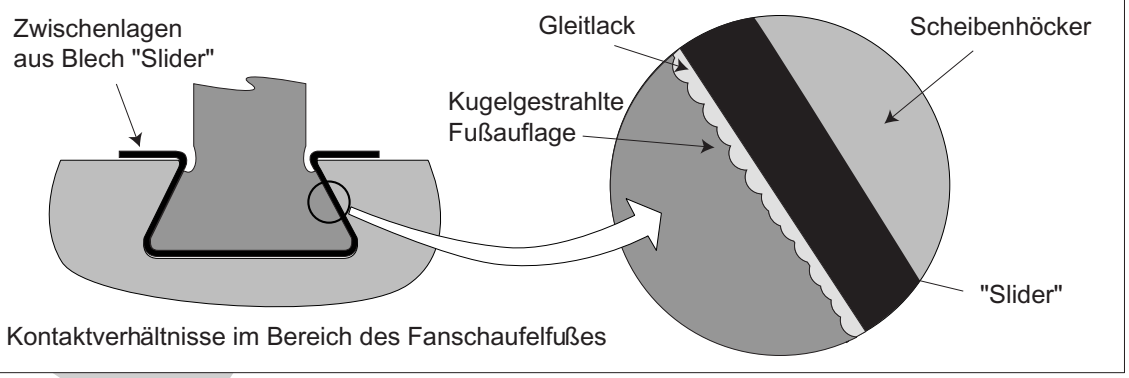
Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich auch ***Verfestigung*** *und* ***Eigenspannungen*** *der beiden Riefenformen im Riefengrund deutlich unterscheiden dürften. Im Fall des runden Riefengrunds ist eher mit schützenden Druckeigenspannungen und Verfestigung zu rechnen. Dagegen lässt der scharfe Riefengrund eher zusätzlich zur Kerbwirkung die Schwingfestigkeit mindernde Zugeigenspannungen erwarten. Auch die Verfestigung dürfte in diesem Fall geringer sein.*

Je höher die Belastungen, umso mehr entscheiden die Eigenschaften von Auflageflächen über die Betriebstauglichkeit.

Während des Anrollens hörte die Besatzung einen lauten Knall. Eine Stichflamme trat aus dem Einlass des linken Triebwerks und kurzzeitig wurde Feuer gesehen. Nach dem Startabbruch zeigte sich, dass sich ein Fanblatt abgelöst hatte und dabei im Fanbereich schwere Zerstörungen entstanden sind. Das fasertechnische Containment wurde jedoch nicht durchschlagen.







Kontaktverhältnisse im Bereich des Fanschaufelfußes

Bild 18.1-9

*B**ild 18.1-9** (Lit. 18.1-15): Welchen wichtigen Einfluss eine optimale **Oberflächenstruktur** und **-behandlung** und damit auch die Topografie auf die Belastbarkeit und Sicherheit eines Bauteils haben kann, zeigt die **Fußverbindung einer Verdichterschaufel** zur Scheibe.*

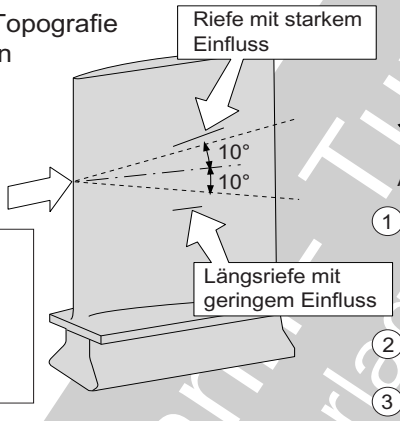
***Rissbildung in den Auflageflächen** von Verdichterschaufelfüßen, insbesondere aus hochfesten **Titanlegierungen** ist ein bekanntes Problem (Band 1, Bild 5.9.3-6). Im dargestellten Fall eines großen Fantriebwerks (mittlere Skizze) brach eine Fanschaufel im Fuß und in mehreren anderen Fällen wurden angerissene Schaufelfüße gefunden. Ursache war das **Versagen des Gleitlacks zwischen den Auflageflächen**. Neben hohen Schub- und Biegespannungen erfährt die Fußoberfläche durch Reibbewegungen einen den Werkstoff (insbesondere Titanlegierungen) schädigenden Verschleiß (**Fretting**) mit einem gravierenden Abfall der Schwingfestigkeit (Band 3, Bild 12.2.1.6-8).*

*Die **Schubspannungen in der Oberfläche des Schaufelfußes und damit die rissbildende Belastung (Anstrengung) sind umso kleiner je niedriger die Reibbeiwerte** sind. Es kommt somit auf eine, über die gesamte Betriebszeit wirksame Gleitbeschichtung an. Der Gleitlack wird in der **Kalottenstruktur einer kugelgestrahlten Oberfläche gehalten** (Detail unten rechts). Zusätzlich können in den Kalotten **Abriebprodukte aufgenommen** werden. Darüber hinaus induziert der Kugelstrahlprozess günstige, die Zug-Betriebsspannungen vermindernde **Druckeigenspannungen** und erhöht mit einer **Verfestigung** die Schwingfestigkeit. Weiter wird vermutet, dass die besondere Oberflächenstruktur einen günstigen Einfluss auf die **Spannungsverteilung im Mikrobereich** hat (Bild 18.1-2). Die frettinggefährdeten Auflagepunkte an den Spitzen werden von den Betriebsspannungen entlastet. Der höher belastete Kalottengrund bleibt ungeschädigt. In manchen Fällen nutzt man zusätzlich eine schützende **lose Blechzwischenlage,** die erfahrungsgemäß die Frettingschädigung weiter minimiert (Skizze unten links).*

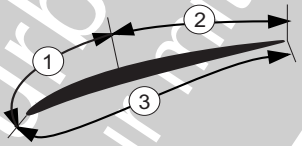
© Axel Rossmann - Turboconsult
Weitergabe nur mit Lizenz

Der Fertigungsprozess umströmter Bauteile wie Schaufeln ist von Forderungen der Aerodynamik entscheidend beeinflusst.

Anforderungen an die Topografie von Verdichterschaufeln



Rauigkeiten die steiler als 10° zur Strömungsrichtung verlaufen, machen sich bereits ähnlich bemerkbar wie solche quer zur Strömungsrichtung.



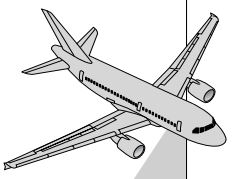
Auswirkung der Rauigkeitslage am Profil

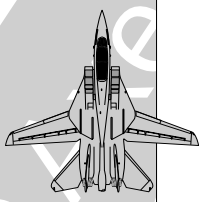
① starke Strömungsbeeinflussung möglich:
- Umschlag der Strömungsform von laminar auf turbulent
- *starker* Einfluss auf den Reibungsverlust

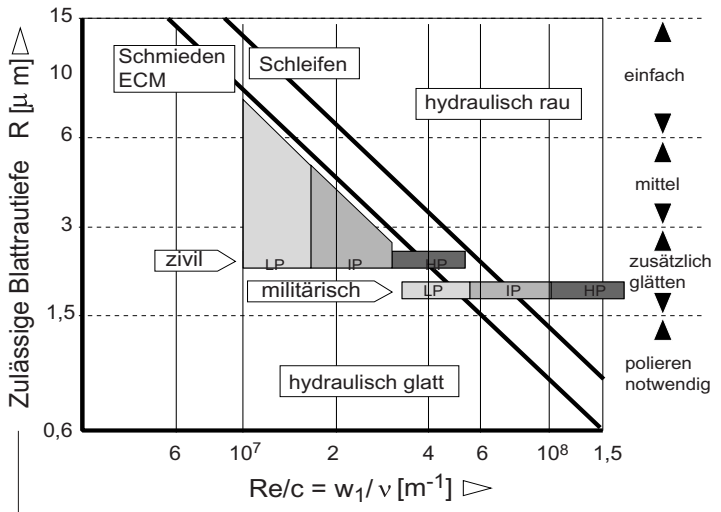
② geringe Beeinflussung der Reibungsverluste

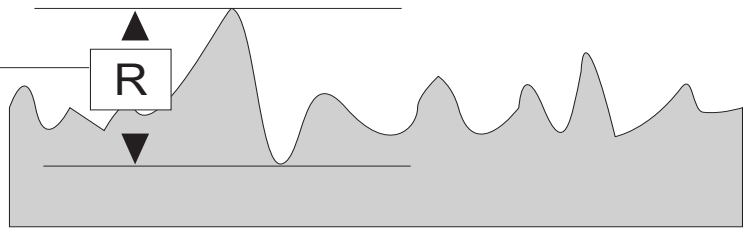
③ geringe Beeinflussung der Reibungsverluste

Für das aerodynamische Verhalten zulässige Blattrauigkeit von Verdichterschaufeln bei unterschiedlicher Anwendung.









Der Strömungswiderstand wird nur von Rauigkeits-spitzen beeinflusst, welche die laminare Grenzschicht durchdringen. Damit ist die Rautiefe "R" charakteristisch.

Bild 18.1-10

© Ahlf Turbo Consult
Alle Rechte vorbehalten

Bild 18.1-10 *(Lit 12.2.2.1-14): Die* ***aerodynamischen Anforderungen*** *an ein* ***Schaufelblatt sind über dem Profil unterschiedlich*** *(Skizze oben). In der Zone 1 ist beste Qualität notwendig, um erhöhte Reibungsverluste und Strömungsablösung zu vermeiden.* ***Riefen*** *die mehr als* ***10° schräg zur Strömungsrichtung*** *verlaufen beeinflussen die Strömung ähnlich stark wie Querriefen. Umgekehrt lässt sich sagen, dass Riefen in Strömungsrichtung eher tolerierbar sind. Es ist jedoch auf die Absenkung der Schwingfestigkeit zu achten.*
Das Diagramm lässt zulässige Rauigkeiten für Triebwerke bei typischen Anwendungen in ***Kampfflugzeugen und zivilen Verkehrsmaschinen*** *erkennen. Die benötigten Rauigkeiten werden, wegen der nach hinten im Verdichter immer dünneren laminaren Grenzschicht (Skizze unten, Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur und Druck), kleiner.*
Man erkennt, dass abhängig von unterschiedlichen ***Flugmissionen*** *die militärische Anwendung bereits im Niederdruckverdichter (LP) ebenso gute Rauigkeiten verlangt wie im „zivilen“ Hochdruckverdichter.* ***Verdichterschaufeln für zivile Tiebwerke können also wegen der niedrigen Fluggeschwindigkeit in geringen Höhen etwas größere Rauigkeit aufweisen wie vergleichbare Schaufeln aus militärischen Triebwerken****. Fanschaufeln lassen die größten Neuteilrauigkeiten zu.*

Literatur zu Kapitel 18.1

18.1-1 „ASM Handbook“, Volume 4 („Heat treating“), Volume 5 („Surface Cleaning, Finishing, and Coating“), Volume 6 („Welding, Brazing, and Soldering“), Volume 7 („Powder Metallurgy“), Volume 14 (Forming and Forging“), Volume 15 („Casting“), Volume 16 („Machining“).

18.1-2 Peter Adam, „Fertigungsverfahren von Turbotriebwerken“ Birkhäuser Verlag,, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 90 und Seite 129-212.

18.1-3 M. Field, J.F. Kahles, „Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke ‘Surface Integrity’“, Zeitschrift „Fertigung“ 5,72, Seite 145-156.

18.1-4 Aircraft Accident Report, NTSB/AAR-98/01 (PB98-910401, DC A96MA068), „Uncontained Engine Failure Delta Air Lines Flight 1288“, Unfall July 6,1996, Bericht von 1998, Seite 1-129. (3273)

18.1-5 F. Klocke, „Measuring and Testing in Production“, „Manufacturing Technology I, Lecture 2“, WZL, RWTH Aachen.

18.1-6 „Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau I“ , Zwölfte Auflage, 1961, Springer-Verlag, Seite 525 und 526.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.1-7 Gerd Lütjering, J.C. Williams, „Titanium“, Springer Verlag Berlin, 2003, ISBN 3-540-42990-5, Seite 197 bis 223.

18.1-8 T.E. Strangman, „Ceramic lined turbine shroud and method of its manufacture“, Patentschrift EP 0256700B1, 1987.

18.1-9 F.Bordeaux, R.G.Saint-Jacques, C.Moreau, S.Dallaire, J.Lu, „Thermal Shock Resistance of TiC Coatings Plasma-Sprayed on Macroroughened Substrates“, Proceedings of the „Fourth National Spray Conference“, Pittsburgh, PA, USA, 4-10 May 1991, Seite 127 bis 134.

18.1-10 I.Engel, H. Klingele, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, Herausgegeben vom Gerling Institut für Schadensforschung und Schadensverhütung GmbH Köln, ISBN 3-9800043-0-9, 1974, Seite 37,38, 66 und 202.

18.1-11 J. Colbus, W. Hauch, „Beitrag zum Verhalten von Lötverbindungen aus Hochtemperaturloten auf Edelmetallbasis an hochwarmfesten Werkstoffen bei Zeitstands-Belastungen bis 1000 Stunden und Temperaturen bis zu 800 Grad C“, Zeitschrift „Metall“ , 23. Jahrgang, Oktober 1969, Heft 10, Seite 994 -1002.

18.1-12 W.Wuich, „Rationalisieren des Hartlötens durch Verwendung von Formteilen“, Zeitschrift „Metall“ , 24. Jahrgang,April 1970, Heft 4, Seite 371-374.

18.1-13 „Das Löten, Überblick und Anwendungsstand“, „Mitteilungen der BEFA“ , Nr. 11, 14.Jahrgang, 1963, Seite 1-16.

18.1-14 A.Schäffler, „Experimental and Analytical Investigation of the Effects of Reynolds Number and Blade Surface Roughness on Multstage Axial Flow Compressors“, ASME Paper No. 79-GT-2 der „Gas Turbine Conference“, San Diego, California, March 12-15, 1979, Seite 1-8.

18.1-15 ATSB, „Examination of a Failed Fan Blade, Rolls-Royce RB222 Trent 892 turbofan engine, Boeing 777-300,A6-EMM“, Technical Analysis Report No: 8/01, Occurrence No: 200100445, Reference: BE/200100004, Oct. 31.Jan. 2001, Seite 1-21.

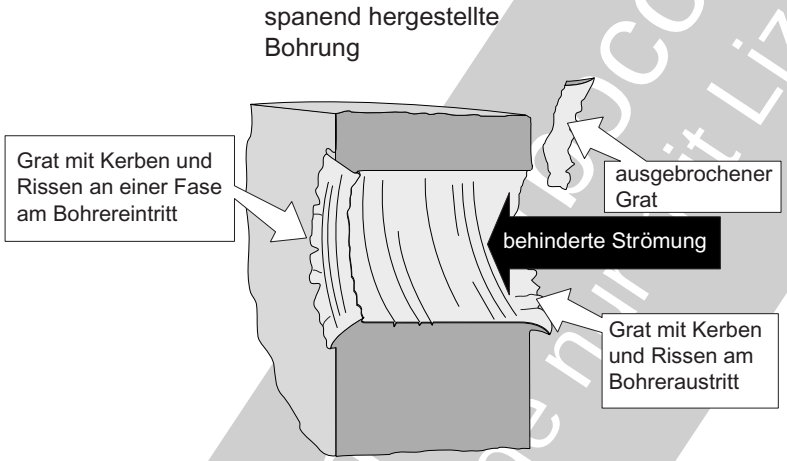
18.1-16 E.Siebel, M.Gaier, „Untersuchungen über den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile“, Zeitschrift „VDI-Z“. 1956, Nr. 30, 21. Oktober, Seite 1715-1723.

18.1-17 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.2.1, Kapitel 12.6.3.1 und Kapitel 12.6.3.3.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.2 Grate und scharfe Kanten

Grate müssen entfernt oder vermieden werden.



Folgeschäden durch Grate:

- Kerben und Risse in Graten können zu Ermüdungsrisswachstum und Bauteilversagen führen.
- Ausgebrochene Gratpartikel können Luft-, Öl- und Kraftstoffführungen blockieren sowie Lagerlaufbahnen, Dichtflächen und Zahnräder beschädigen.
- Die Anlage und das Fügen von Bauteilen wird erschwert. Fügeflächen könnnen beschädigt werden.
- Behinderung der Durchströmung infolge starker Strahleinschnürung.

Unter einem **Grat (engl. Burr)** wird ein unerwünschter, dünner Steg verstanden, der materialschlüssig mit einer Fläche, insbesondere einer Kante verbunden ist. Nicht nur **unverrundete bzw. nicht angefaste, spanend bearbeitete scharfe Kanten** können Grate aufweisen. Grate können auch auf Flächen an Riefen und als Rattermarken entstehen. Selbst wenn Kanten keinen Grat aufweisen, besteht doch die erhöhte Wahrscheinlichkeit von Schwachstellen. Kleine Ausbrüche, Rissbildung und Beschädigungen sind Graten ähnliche Fehlstellen (Bild 12.2.2.2-2). Fertigungsschritte wie Kugelstrahlen oder Bürsten können an scharfen Kanten besonders leicht Grate bilden. Grundsätzlich unterliegen **Kanten bei der Bearbeitung einer intensiveren Aufheizung** als weiter innen liegende Bearbeitungsflächen. Solche örtlichen Aufheizungen können Zugeigenspannungen induzieren (Bild 18.6-3 und Band 3, Bild 12.2.1.1-2) und so die nutzbare Schwingfestigkeit herabsetzen (Bild 18.2-1).

Grate sind ein nahezu allgegenwärtiges Problem der Fertigung. Obwohl sich Grate meist bei der Zerspanung bilden, gibt es darüber hinaus viele Entstehungsmöglichkeiten (Bild 18.2-4). In manchen Fällen ermöglicht das **Aussehen eines Grates Rückschlüsse auf ursächliche Einflüsse** und lässt somit eine gezielte Abhilfe, z.B. durch Optimierung der Prozessparameter, Hilfsstoffe und/oder der Werkzeuge zu. (Bild 18.2-5).

Häufig beruht die subjektive Motivation zur Entfernung von Graten in der **Arbeitssicherheit,** die eine **Minimierung des Verletzungsrisikos** fordert. Die definierte, zeichnungsgerechte Entfernung von Graten hat jedoch einen **wichtigen technischen Hintergrund**. Negative Auswirkungen erstrecken sich sowohl auf nachfolgende **Fertigungsprozesse als auch auf die späteren Betriebs-**

© Axel Rossmann Bioconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

eigenschaften des Bauteils (Bild 18.2-6). Ein Grat kann in mehrfacher Hinsicht eine Schwachstelle darstellen (Bild oben). Er kann **als Kerbe die Schwingfestigkeit so absenken**, dass es zum frühzeitigen Versagen des Bauteils kommt (Bild 18.2-3). Auch die **Funktion eines Bauteils** kann von Graten unzulässig beeinflusst werden. Grate, die das Betriebsverhalten des Bauteils oder anderer Bauteile gefährlich beeinflussen, können auf vielfältige Weise entstehen (Bild 18.2-3).

Die Entfernung von Graten, das „**Entgraten**“ an Bauteilen die in Festigkeit und/oder Funktion im Grenzbereich belastet sind, ist eine besonders verantwortungsvolle Aufgabe. Sie bedarf der gleichen Sorgfalt und Reproduzierbarkeit wie andere sog. definierte Fertigungsprozesse (Bild 18.2-6).

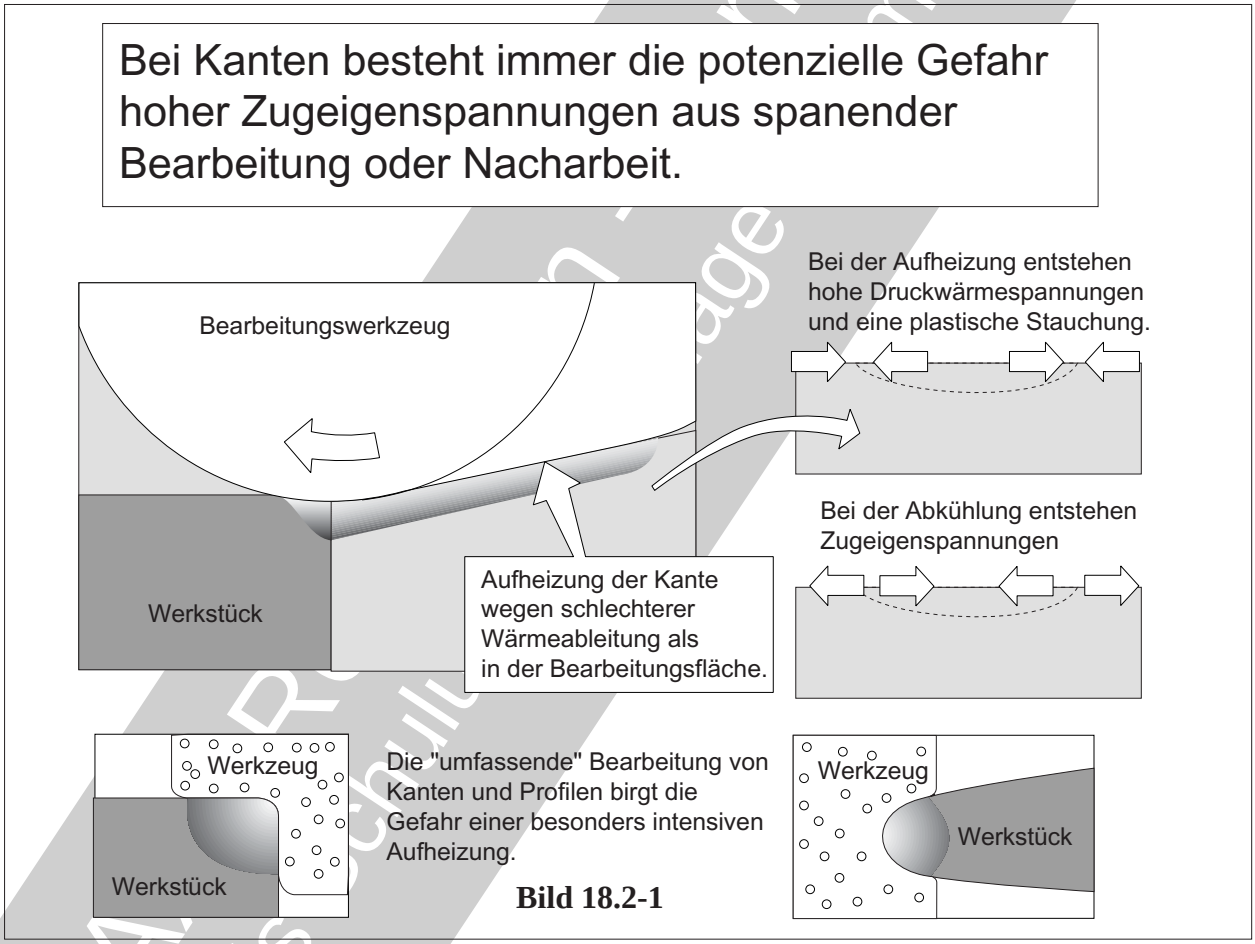


Bild 18.2-1

Bild 18.2-1: *Das ungünstige Verhältnis von aufgeheizter Bearbeitungsfläche zum wärmeableitenden Volumen begünstigt an den* ***Kanten*** *hohe Druckwärmespannungen. Übersteigen diese die Fließgrenze, kommt es zur plastischen Stauchung. Beim nachfolgenden Abkühlen entstehen Zugeigenspannungen welche als Mittelspannungserhöhung die Schwingfestigkeit mindert (Bild 18.4-4).*

Eine zusätzliche Schädigungsmöglichkeit ist ein ***Festigkeitsabfall durch Gefügeveränderungen*** *wie Lösungsglühen aushärtbarer Legierungen.*

Derartige Bearbeitungsverfahren sind nicht nur Fräsen, Räumen und Schleifen. Besonders wichtig ist die ***Kantenrundung mit handgeführtem Werkzeug****. Wenn die gesamte Kante vom Werkzeug umfasst wird, z.B. um ein Kantenprofil zu erzeugen, ist mit einer Verstärkung des schädigenden Effekts zu rechnen.*

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

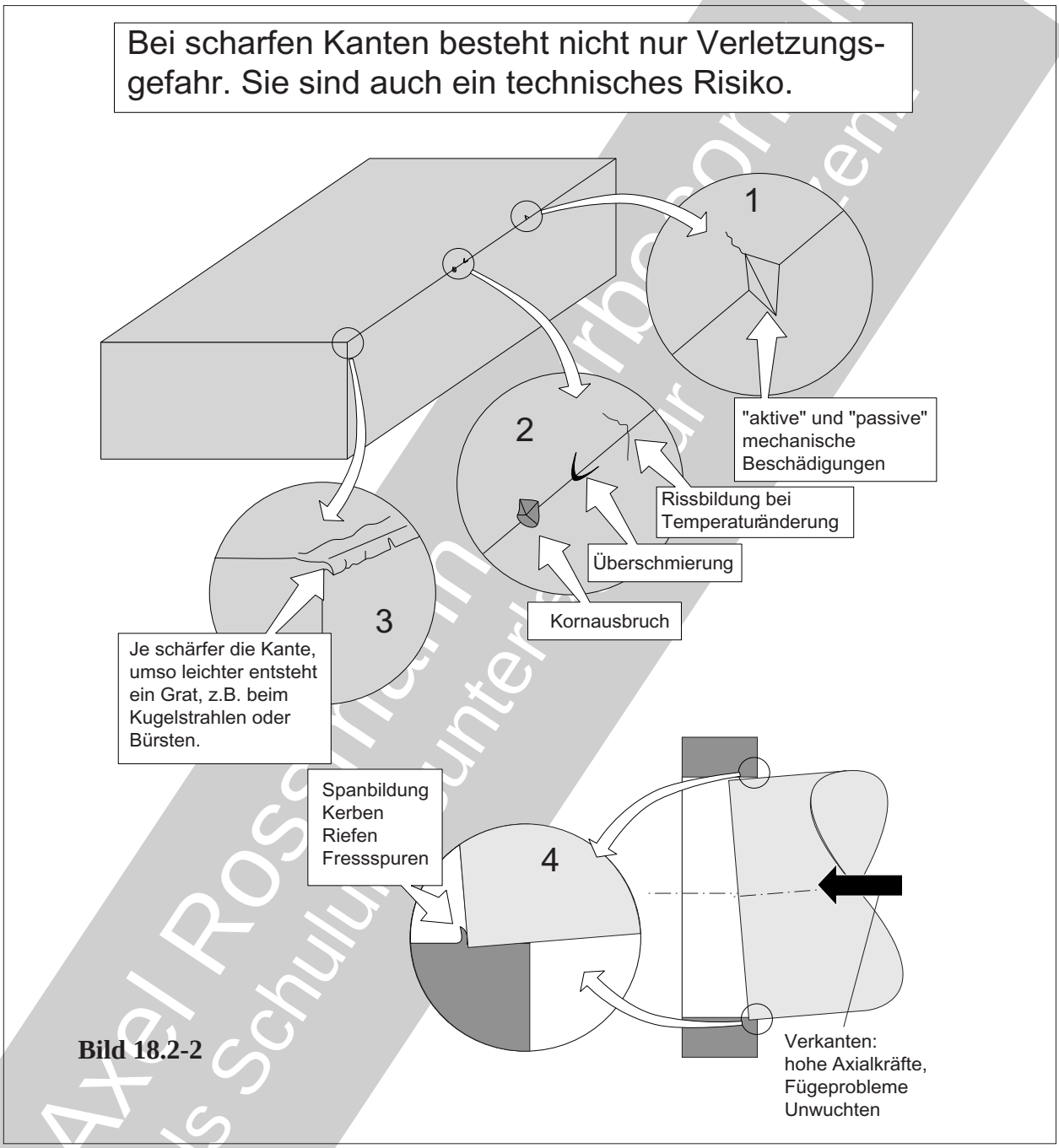


Bild 18.2-2

Bild 18.2-2: *Wird das* ***Fasen*** *oder* ***Verrunden*** *versäumt, begünstigen scharfe Kanten potenzielle Fehlstellen.*
Scharfe Kanten sind für „passive“ mechanische Beschädigungen beim „Handling“ empfindlich (Detail 1, Bild 14-5). Solche Kerben sind für Schwingrisse prädestiniert. Andererseits können scharfe Kanten auch andere Bauteile „aktiv“ beschädigen, indem sie dort Riefen und Kerben eindrücken.

Bearbeitungsvorgänge der ***Kante können Fehlstellen*** *wie Überlappungen und Kornausbrüche erzeugen (Detail 2). Besonders spröde und harte Werkstoffe sind empfindlich. Die schnellere Aufheizung oder Abkühlung der Kante kann Warmrissbildung (Bild 18.7-6 und Band 3, Bild 11.1-8) begünstigen.*
Scharfe Kanten sind für eine plastische Verformung und Gratbildung bei nachfolgenden Fertigungsschritten wie Kugelstrahlen, abrasiv

© Axel Rossmann Verbesserungsmaßnahmen als Schulungsunterlagen für Lehrer

Strahlen oder Bürsten besonders empfindlich (Detail 3).
Scharfe Kanten behindern Montage und Fügungen. Sie können insbesondere an Passdurchmessern zum ***Verkanten*** *beitragen und in der Folge eine Beschädigung der Fügeflächen erzeugen (Detail 4). Die Folge sind* ***Montageprobleme****. Kommt es zu* ***Setzungen am Rotor beim Hochfahren,*** *ist mit* ***plötzlichen Unwuchten und gefährlichen Anstreifvorgängen*** *zu rechnen. Entstehen z.B. durch* ***Fügeprobleme ungleichmäßige Lötspalte oder Schweißspalte*** *(EB-Schweißen, Diffusionsschweißen) können* ***Bindefehler*** *entstehen.*

Bild 18.2-3: Grate *begünstigen auf sehr unterschiedliche Weise eine Rissbildung. So entsteht die Gefahr der Schwingermüdung mit einem sicherheitsrelevanten Bauteilversagen (HCF, LCF, Beispiel 18.2-1) und umfangreichen Folgeschäden.*

Spannungserhöhung: *Weil Grate an Kanten häufig an der Außenkontur des Bauteils liegen, sind sie mit einem großen Randfaserabstand bei Biegung besonders hoch belastet (Skizze oben).*
Spannungserhöhend können Grate bei ***Temperaturänderungen*** *wirken. Die zum Volumen relativ* ***große Oberfläche*** *eines Grates nimmt in der Aufheizphase über Strahlung und Konvektion viel Wärme auf. Der* ***dünne Querschnitt*** *kann diese Wärme nur ungenügend in das massive Bauteil ableiten. Im aufgeheizten Grat entstehen Druckspannungen auf Grund einer behinderten Wärmedehnung. In der Abkühlphase ist der Grat schneller und es entstehen in ihm Zugspannungen. Diese sind umso höher wenn beim Aufheizen plastisches Stauchen eintrat. So bilden sich beim Abkühlen hohe* ***Zugeigenspannungen****. Damit sind Grate potenziell besonders hoch* ***thermoermüdungsbeansprucht****.*

Verwirbelt eine Gasströmung am Grat, ist der ***Wärmeübergang besonders gut****. Damit werden Wärmespannungen verstärkt und Thermoermüdung (TF) im Betrieb unterstützt.*
Die ***Kerbwirkung von Graten*** *ist nicht auf den ersten Blick einsichtig. Betrachtet man einen Grat genauer, etwa unter dem Binokular, erkennt man meist eine Zerklüftung.* ***Kleine Risse und Kerben erhöhen die Betriebsspannungen*** *und führen bereits bei Auslegungsbeanspruchung zu* ***Schwinganrissen*** *(Detail).*

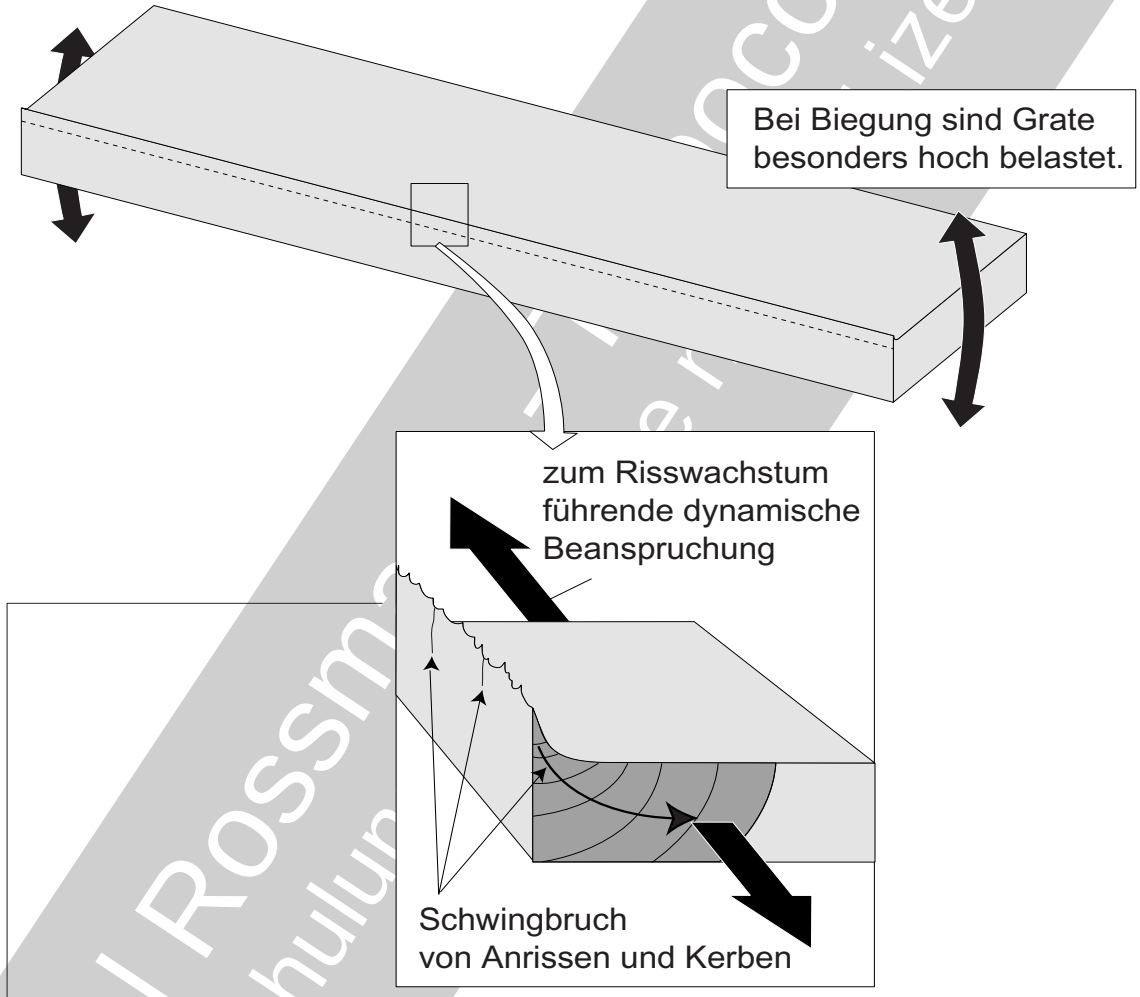
Versprödung: *Grate entstehen unter starker plastischer Verformung. Erfolgt diese Verformung bei niedrigen Temperaturen, kommt es zur Kaltverfestigung und damit zu Zähigkeitsverlust (Versprödung, Abfall der Bruchzähigkeit), was die Schwingrisse und/oder Gewaltrisse begünstigt.*
Entstehen im Grat hohe Zugeigenspannungen, wird in nachfolgenden Fertigungsprozessen die ***Aufnahme von Wasserstoff*** *empfindlicher Werkstoffe und damit eine Versprödung unterstützt (Band 3, Bild 12.2.1.7-14).*
Mit einer Versprödung ist auch zu rechnen, wenn sich der Grat ***bei hohen Temperaturen*** *bildet. Eine solche Situation lassen Trenn- und Schleifvorgänge sowie Hochgeschwindigkeitszerpanung erwarten. Die im Vergleich zum Volumen große Oberfläche eines dünnwandigen heißen Grats kann besonders intensiv Sauerstoff aufnehmen und es entstehen spröde Oxide. Besonders Titanlegierungen sind für eine solche Versprödung anfällig.*

Zugeigenspannungen: *In Graten entstehen plastische Verformungen mit hohen Zugeigenspannungen. Das führt zu verstärkter* ***Aufnahme von Wasserstoff*** *und erhöht bei empfindlichen Werkstoffen und spezifischen Medien die Gefahr einer* ***Spannungsrisskorrosion*** *(SpRK, Bild 18.2-6). Diese Rissbildung muss nicht im Fertigungsprozess auftreten, sie kann auch während der Lagerung und im Betrieb entstehen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Ein Grat ist eine typische Anrissstelle für Schwingrisse und Korrosionsrisse.



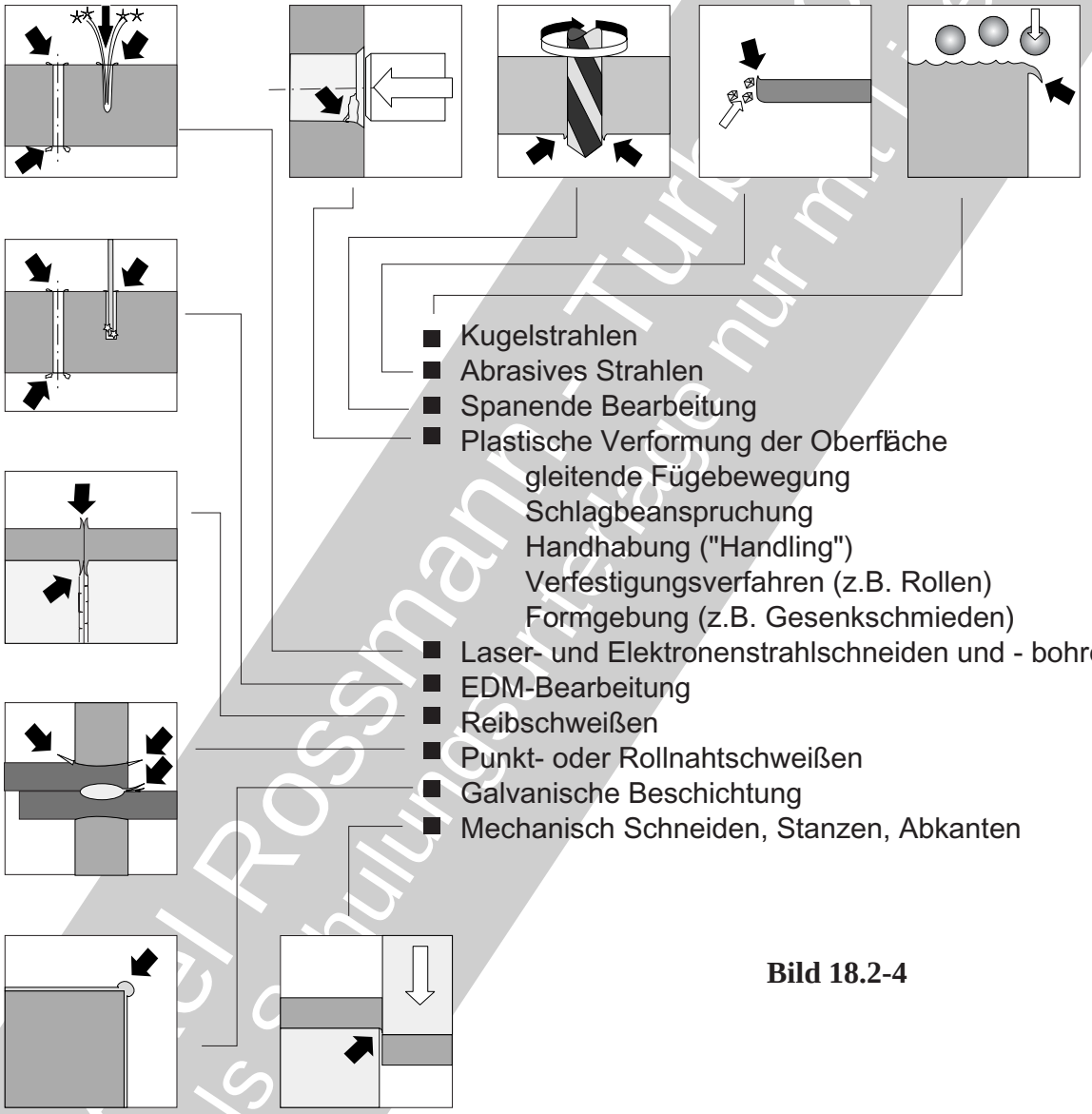
Potenzielle festigkeitsmindernde Einflüsse an einem Grat:
- Kerben
- Risse
- Hohe Beanspruchung bei Biegung
- Versprödung
  - Oxidation
  - Kaltverfestigung
  - Wasserstoffaufnahme
- Zugeigenspannungen
- Spannungsrisskorrosion
- Hohe Wärmespannungen bei Temperaturänderung/ Thermoermüdung

Bild 18.2-3

© Axel Rossmann Proconsult als Schulungsmaterial mit Lizenz

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Grate, welche die Betriebsfestigkeit gefährden, entstehen auf sehr unterschiedliche Weise.



- Kugelstrahlen
- Abrasives Strahlen
- Spanende Bearbeitung
- Plastische Verformung der Oberfläche
  - gleitende Fügebewegung
  - Schlagbeanspruchung
  - Handhabung ("Handling")
  - Verfestigungsverfahren (z.B. Rollen)
  - Formgebung (z.B. Gesenkschmieden)
- Laser- und Elektronenstrahlschneiden und - bohren
- EDM-Bearbeitung
- Reibschweißen
- Punkt- oder Rollnahtschweißen
- Galvanische Beschichtung
- Mechanisch Schneiden, Stanzen, Abkanten

Bild 18.2-4

© Axel Rossmann - Turbo Pascal
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Bild 18.2-4: *Grate (engl. Burr) sind unerwünschte, dünne Stege die materialschlüssig mit einer Fläche, vorzugsweise einer Kante verbunden sind. Sie lassen sich auf vielfältige Weise erzeugen. Voraussetzung um vorbeugend Grate mit der Auswahl geeigneter Verfahren und Prozessparameter (z.B. in der Arbeitsvorbereitung) zu vermeiden, ist die Kenntnis wo und wann Grate entstehen. Zunächst werden Grate lediglich mit Schneidvorgängen in Zusammenhang gebracht. Eine tiefere Beschäftigung mit diesem Thema lässt jedoch schnell erkennen, dass Grate, die das Betriebsverhalten der Bauteile unzulässig beeinflussten, während vieler anderer Fertigungsschritte auftreten.*

Spanende Bearbeitung: *Eine spanende Bearbeitung erzeugt gewöhnlich Grate am Auslauf der Bearbeitungsfläche (Bild 18.2-3). Aber auch am Anfang der Bearbeitungsfläche kann bereits ein, wenn auch kleiner, Grat aufgeworfen werden.*

Mechanisches Schneiden, Stanzen, Abkanten: *In Abhängigkeit von der Richtung des Schnitts bilden sich an den Trennflächen Grate.*

Kugelstrahlen und abrasives Strahlen: *Besonders eine schräge, bei Kanten nach außen gerichtete Beaufschlagung verschmiert Material zu einem Grat (Band 3, Bild 12.2.1.6-13). Kugelstrahlen erzeugt eine typische Gratform die wegen ihres Querschnitts als „**Elephant Tail**“ bezeichnet wird (Bild 12.2.1.6-15). Solche Grate können die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen wie Rotorscheiben unzulässig vermindern.*

Plastische Verformung der Oberfläche durch Handhabung und Transport, Fügebewegungen und Schlagbeanspruchung: *Werden Kanten von Vorrichtungen schief angesetzt, können Grate aufgeworfen werden. Geraten diese Grate zwischen die Gleitflächen, ist Riefenbildung zum Fressen wahrscheinlich. Solche Schädigungen vermindern die Schwingfestigkeit auf Grund der Kerbwirkung erfahrungsgemäß erheblich. Zusätzlich werden Füge- und Demontagekräfte sehr hoch. Ähnliche Gratbildung kann auch bei unvorsichtiger Handhabung der Teile auftreten. Grate entstehen bei Formgebungsverfahren wie Gesenkschmieden oder Gewinderollen als Folge einer plastischen Verformung.*

Thermisches Schneiden (Plasma, Autogen, Laser, Elektronenstrahl): *Die Schmelze aus dem Schnittspalt wird zum Austritt des Strahls transportiert und erstarrt dort als Grat und/ oder Schmelzperlen (Bild 18.6-12).*

Schweißen: *Beim **Reibschweißen** wird ein ausgeprägter Grat aus dem Schweißspalt gepresst (Band 3, Bild 12.2.1.3.4-3 und 12.2.1.3.4-5). Dieser wird, soweit möglich, spanend entfernt. In unzugänglichen Hohlräumen wie Hohlwellen verbleibt der Grat. Auch beim **Punkt- und Rollnahtschweißen** („**seam weld**“) kann sich ein Grat bilden, welcher die Schwingfestigkeit mindert (Lit 18.2-2). Ungünstige Schweißparameter (zu hoher Schweißstrom) oder eine Naht die sehr nah an der Blechkante verläuft, können die Schmelze hier zum Austritt bringen (Band 3, Bild 12.2.1.32-1.2). Ein solcher Grat bildet sich entlang der Blechoberfläche und ist schwer entfernbar. Schweißungen an Hohlkörpern wie aus zwei Blechen gefügte Schaufelprofile mit innen laufenden Graten sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Es sei denn, solche Grate können als Schwachstellen akzeptiert werden. Dann sind sie in der Auslegung zu berücksichtigen.*

Galvanische Beschichtungen: *An Kanten baut sich gratartig Material auf, weil hier das stärkere elektrische Feld zu einer schnelleren Abscheidung führt (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-5).*

© Axel Rossmann - TU München
Lizenz nur für Unterlagen

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Die Entstehung und Ausbildung von Graten am Bohrungsaustritt ist von vielen Bohrparametern beeinflusst. Sie sagt umgekehrt etwas über die Parameter aus.

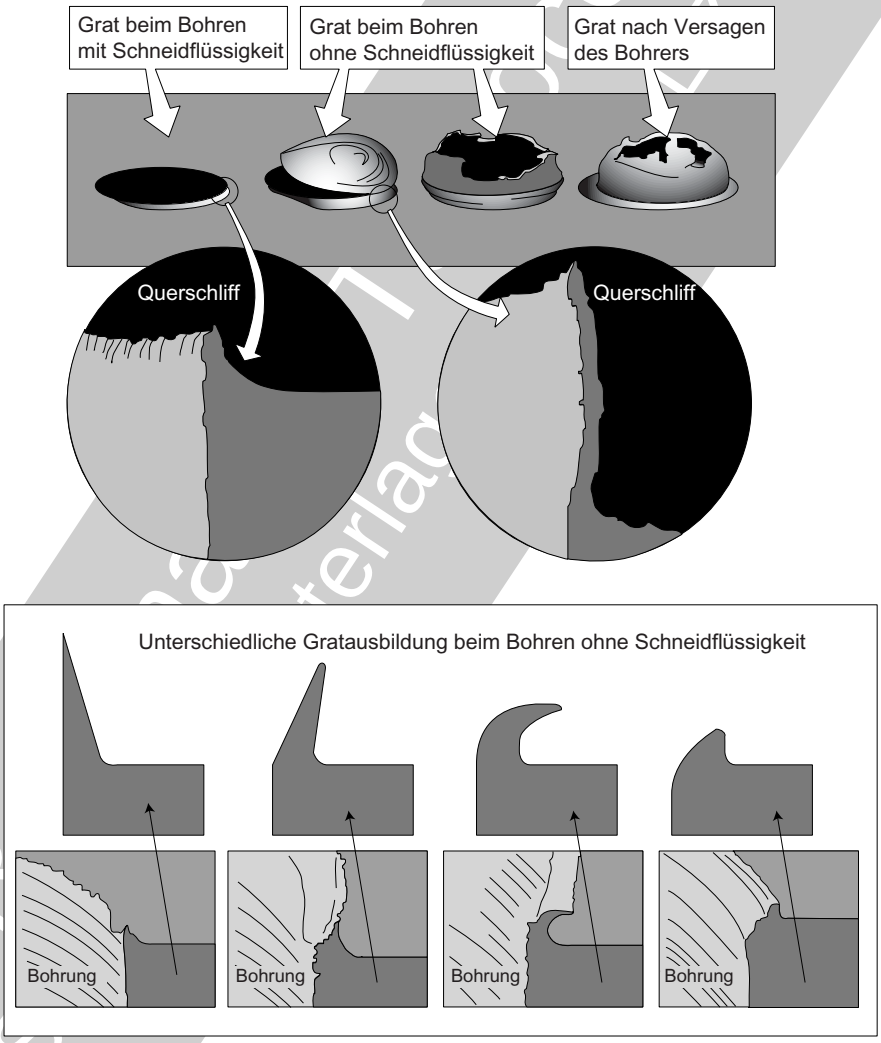
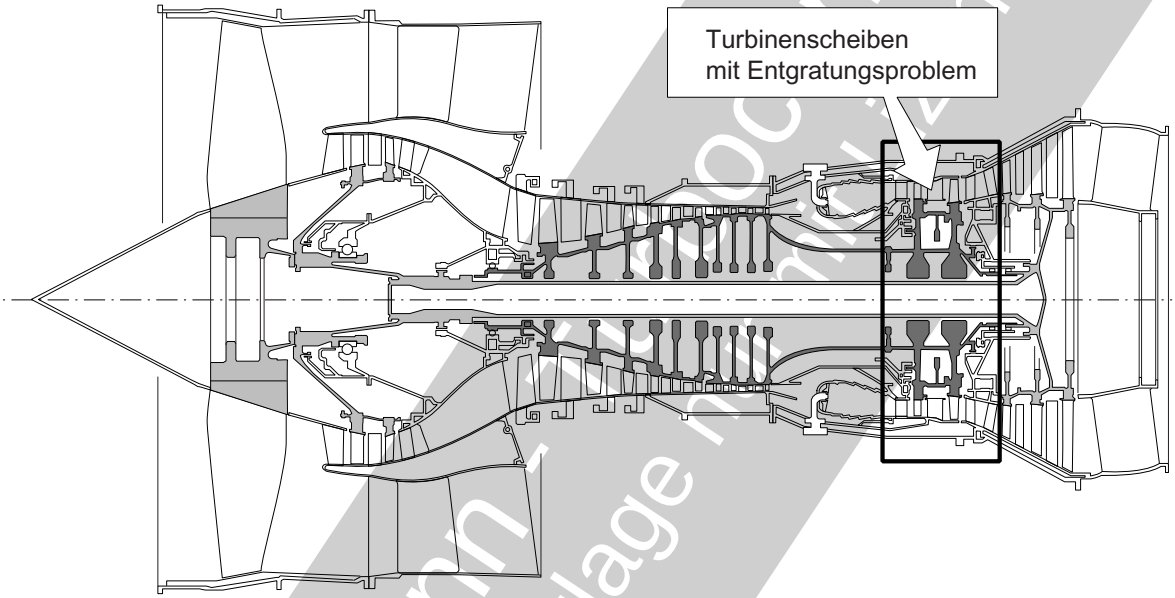


Bild 18.2-5

Bild 18.2-5 *(Lit. 18.2-1): Bis zu 30 % der* ***Fertigungskosten*** *eines Bauteils aus einer Titanlegierung muss für die* ***Entgratung*** *aufgewendet werden. Dazu trägt besonders die Gratbildung an Bohrungen bei. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit und die Neigung zur Kaltverschweißung (Fressen) sowie chemische Reaktionen beschleunigen den Verschleiß des Schneidwerkzeugs. Die Schneidengeometrie beeinflusst eine Gratbildung besonders. Für die Auswahl geeigneter Zerspanungsparameter eignen sich als Kriterium neben der Spanbildung die Grate.*

Üblicherweise entstehen beim Bohren am Ein- und am Austritt Grate. Der Grat am Austritt ist sehr viel ausgeprägter und bedarf deshalb besonderer Aufmerksamkeit. Die Gratbildung hängt besonders vom Kühlschmierstoff (KSS, Band 3, Bild 12.2.1.1.2-13 und Bild 12.2.1.1.2-14) ab. Die Skizzen oben zeigen Grate an Bohrungen in einem Blech aus TiAl6V4. Ohne Schneidflüssigkeit entstehen sehr ausgeprägte Grate mit typischer, den Prozessparametern zuordenbarer Ausbildung (Bild unten).

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten



Beispiel 18.2-1 (Lit. 12.2.2.2-3):

Zitat:“ ...the operators have been warned that there is a risk of uncontained failure of their ...(engines) unless certain high pressure turbine (HPT) components are replaced early. The warning came in a ... US Federal Aviation Administration emergency airworthiness directive (AD). In USA 25 engine units with...(known) serial numbers are affected. The AD warns that **a manufacturing process change** on some ...high pressure turbine discs **has reduced their ‘maximum cyclic life’**.
Operators must replace the discs with the newly issued cycle limits, the AD states, explaining that some HPT stage 1 discs need replacing between 2 600 and 3 600 cycles, and some stage 2 discs need to be replaced before 3 800 cycles.

...‘Rig testing has revealed that **the fatigue life of the ...turbine discs is more sensitive to a certain deburring process than expected**. The life limit of a restricted number of affected discs has been reduced’...“

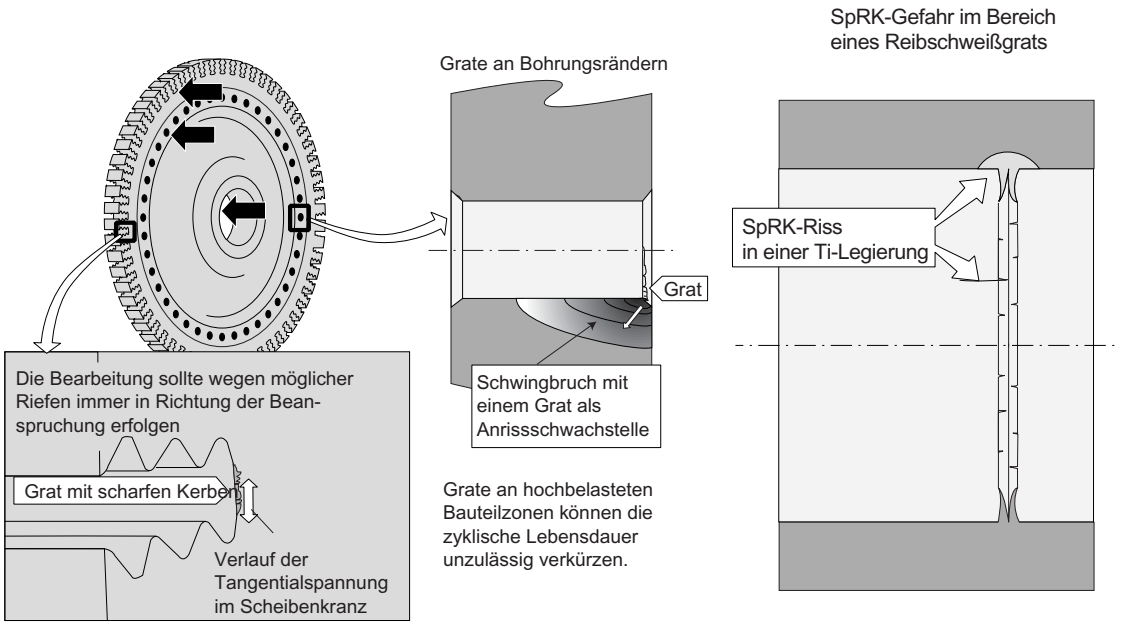
Kommentar: Es geht offenbar nicht darum, dass nicht entgratet (deburring) wurde, sondern dass ein **ungünstiger Entgratungsprozess** angewendet wurde. Dass dies die Lebensdauer der Turbinenscheiben so stark negativ beeinflusste ist eine wichtige Lehre (Bild 18.2-6). **Entgratung ist ein äußerst wichtiger Fertigungsprozess**. Dieser bedarf Verantwortungsgefühl und Fachkenntnis.
Leider machen die verfügbaren Unterlagen keine Angaben über das Entgratungsverfahren, sowie Art und Ort der Schädigung.

© Axel Rossmann - Ingenieurconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

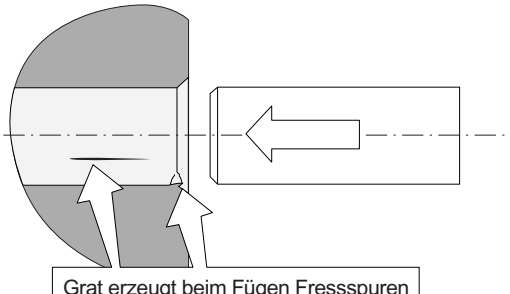
Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Schädigende Auswirkungen von Graten auf das Bauteilverhalten im Betrieb.

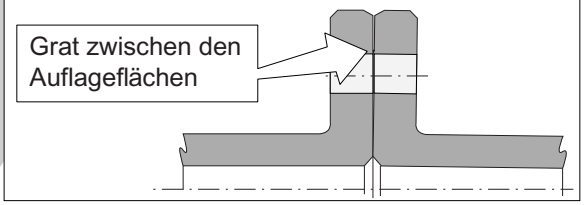
1 Abfall der zyklischen Lebensdauer bei Rotorteilen



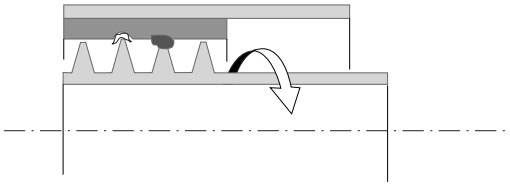
2 Ausfall der Bauteilfunktion, z.B. bei Gleitbewegungen (Regler, Verstellsysteme). Beschädigung von Passflächen: Abfall der Schwingfestigkeit, Montageprobleme.



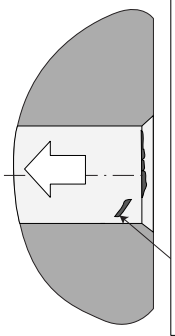
3 Probleme an Auflage- und Kontaktflächen: Kerben, schlechte Druckverteilung.



4 Auslösen eines Labyrinthschadens: Verschleß, selbstverstärkender Anstreifvorgang



5 Abgelöster Grat in durchströmtem Querschnitt



abgelöster Span in durchströmtem Querschnitt (Luft, Öl, Kraftstoff):
- Verunreinigung des Mediums
- Lagerschaden
- Verstopfung von Düsen und Filtern
- Schädigung von Bauteilen im Strömungskreislauf (z.B. Lager, Brennkammer, Turbinenschaufel)
- Anzeige an Magnetstopfen
- Beschädigung von Gleitdichtungen
- Schwergängigkeit und Blockieren
- Ausfall von Bauteilfunktionen (Regler)

Bild 18.2-6

Bild 18.2-6: *Grate können das* ***Betriebsverhalten des Bauteils*** *und auch das anderer Teile schadensursächlich beeinflussen. Die folgenden Beispiele sollen das verdeutlichen. Ein Fall, wie sich ein Grat auf die Strömung und dadurch entstehende potenzielle Schäden auswirkt, zeigt Bild 18.2-6.*

„1" Absenkung der Schwingfestigkeit: *Grate können einen unzulässigen Abfall der LCF- und HCF-Festigkeit verursachen (Bild 18.2-3, Beispiel 18.2-1). Im ungünstigen Fall kann die zyklische Lebensdauer davon bestimmt sein.*
Hoch belastete Scheibenzonen (Skizze links), weil mit einer für die Entgratung bzw. ***Kantenrundung*** *„komplexen" Geometrie (Bild 18.2-8), ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Dazu gehören Schaufelaufnahmenuten (Tannenbaum, Schwalbenschwanz) und Bohrungen (Band 3, Bild 12.2.1.1.2-5 bis -10). Die rechte Skizze zeigt einen Fall, bei dem während einer Reibschweißung Rissbildung auftrat, die offenbar im Zusammenhang mit Anrissen im Reibschweißgrat stand. Es besteht der Verdacht, dass die kleinen Anrisse im Grat im Zusammenhang mit Handschweiß SpRK in diesem Titanbauteil auslöste (Bild 18.3-16).*

„2/3" Montageprobleme und mechanische Beschädigungen: *Fügebewegungen zwischen Passflächen (z.B. Einführung eines Spannbolzens in eine Scheibenbohrung) können außer Grate,* ***Riefen und Fressspuren*** *erzeugen (Bild 18.2-2). Kommt es zum* ***Kaltverschweißen (Fressen),*** *ist eine deutlich erhöhte Fügekraft zu erwarten („2"). Wird eine erforderliche Axialkraft so vermindert, dass sie eine Anlage verhindert, kann es im Betrieb zu gefährlichen Lagerüberlastungen und/oder Setzbewegungen kommen. Entstehen bei der Fügebewegung Riefen, ist für querlaufende Belastungen mit einem gefährlichen Abfall der Schwingfestigkeit zu rechnen.*
*Skizze „**3**" skizziert den Fall, wenn Grate die* ***Auflage von Flanschen und Passflächen*** *verhindern. Ein* ***Setzen der Flansche*** *im Betrieb, möglicherweise bei instationären Bedingungen wenn sich die Verspannung verändert, führt zu* ***Unwuchten und Schwingungen****. Späne von Graten zwischen den Flanschanlageflächen können durch* ***Relativbewegungen wandern und dabei Kerben erzeugen****.*

„4" Auslösen eines Labyrinthschadens: *Die Erfahrung weist darauf hin, dass Späne und Grate bei neuen Labyrinthen einen selbstverstärkenden Anstreifvorgang begünstigen oder auslösen können, der zu einem katastrophalen Versagen des Labyrinthrings führt (Band 2, Bild 6.10.3.1.2-4).*

„5" Grate als Schadensursachen in durchströmten Querschnitten: Fremdkörper aus abgebrochenen Graten *die von einem strömenden Medium transportiert werden, können an anderen Bauteilen Schäden auslösen.*
Geraten solche Partikel in ***Wälzlager*** *und kommt es dort zu Eindrücken und Überwalzungen sind die Laufflächen ermüdungsgefährdet.*
Lagerschäden können ebenfalls von teilweise verstopften Öldüsen und Filtern ausgelöst werden. Ein reduzierter Durchfluss führt zu schädigender Überhitzung und metallischem Kontakt der Wälzflächen. Auch verlegte ***Kraftstoffdüsen*** *können die Triebwerkssicherheit gefährden, wenn der Kraftstoffstrahl abgelenkt wird und es zu* ***örtlichen Überhitzungen*** *an Brennkammer und Gehäuse kommt (Lit. 18.2-4).*
Gratpartikel zwischen Gleitflächen wie in ***Zahnradpumpen*** *oder* ***Reglern*** *(z.B.* ***Schiebern****), können ein Blockieren auslösen.*
Werden Blenden und Zumessbohrungen in ***Reglern*** *(hydraulisch, pneumatisch) verlegt, ist die Funktion beeinflusst.*
Besonders empfindlich sind gekühlte ***Heißteile*** *wenn der Kühlluftstrom auch nur wenig abnimmt. Eine solche Situation kann eintreten, wenn die* ***Kühlluftbohrungen von Turbinenschaufeln*** *mit nur wenigen Zehntelmillimetern Durchmesser ganz oder teilweise blockiert wer-*

© AKoRoss GmbH - TurboConsult
Lizenzvereinbarung unterlagen nur mit Lizenz

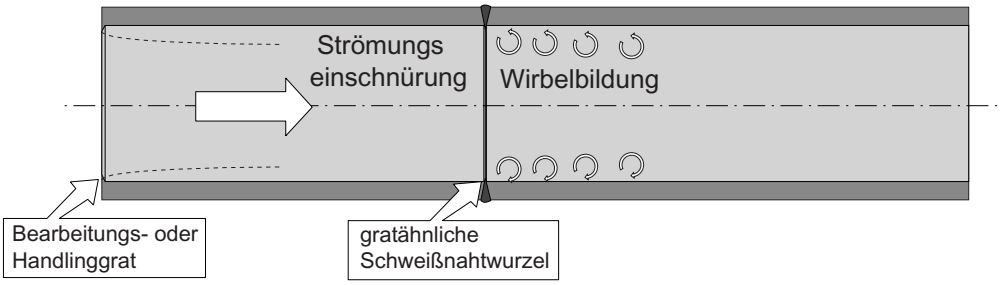
den. Es genügt z.B. schon, dass eine Entstaubungsbohrung an der Schaufelspitze verlegt wird (Bild 18.3-9).
Selbst wenn Gratpartikel von einem ***magnetischen Abscheider*** *festgehalten werden, kann eine Warnanzeige im Cockpit* ***Notmaßnahmen*** *erforderlich machen und eine gefährliche Situation entstehen lassen.*
Gelangen Gratpartikel zwischen die Dichtflächen einer ***Gleitringdichtung,*** *ist eine Leckage mit gravierenden Folgeschäden (z.B. durch ein anschließendes* ***Ölfeuer****) möglich.*

Bild 18.2-7: Grate in durchströmten Querschnitten *können die Strömung stören. In einer Rohrleitung kann ein Grat neben einer Widerstandserhöhung zu örtlicher Verwirbelung führen und Kavitation auslösen (Skizze oben; Band 1 Kapitel 5.5.1.3, und Band 2 Bild 6.11.1.2-8). Das System kann so zu Schwingungen mit der Gefahr von Schwingbrüchen angeregt werden. Möglich ist auch, dass die Druckschwingungen im Strömungsmedium die* ***Funktion des Systems beeinträchtigen*** *(Regler, Einspritzung). Kavitation kann auch Materialabtrag an den betroffenen Oberflächen verursachen und diese schädigen.*
Scharfe Kanten an einer Öffnung rufen eine Strömungseinschnürung mit Anstieg des Widerstands hervor, bzw. sie reduzieren die Durchflussmenge.
Kleinere Durchflussmengen als es der Auslegung entspricht sind vielfältig schadensauslösend:
- Überhitzung gekühlter Heißteile (Luft)
- Versagen von Lagern (Öl)
- Fehlfunktion von Brennkammern (Kraftstoff, Luft).
Die Skizze unten zeigt die ***Folgen einer „sorglosen“ Umstellung des Fertigungsprozesses****.*
Günstigere Fertigungskosten verlangten nach einer Änderung des Bohrverfahrens für die Luftbohrungen in Rohrbrennkammern (Skizze unten). Eine bedenkliche Abweichung gegenüber den bisherigen Bohrungen war mit den üblichen Inspektionsmethoden nicht aufgefallen. In Prüfläufen war jedoch das Betriebsverhalten des Triebwerks inakzeptabel. Als Ursache erwies sich das neue Bohrverfahren. Die Analyse des Problems ergab, dass abweichend vom bewährten Verfahren, eine scheinbar vernachlässigbare Gratbildung die Durchströmung und damit die Luftzufuhr unzulässig störte.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Grate und gratähnliche Strömungsstörungen in Rohrleitungen und Bohrungen verschlechtern manchmal die Bauteilfunktion entscheidend.

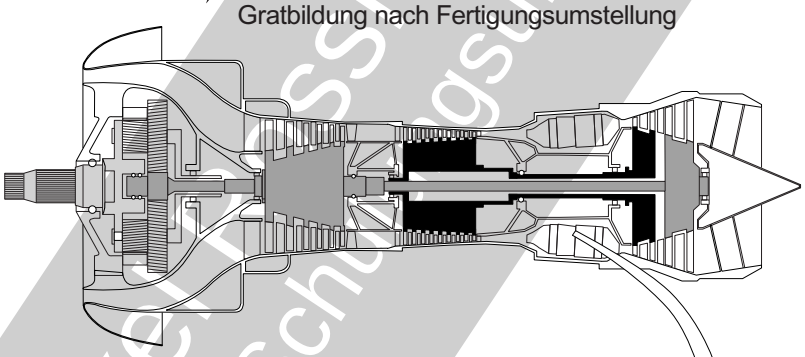


Widerstandserhöhung verringert den Durchfluss:
- Gekühlte Bauteile werden heißer (z.B. Turbinenschaufeln)
- Schlechtere Ölzufuhr (Lagerschäden)

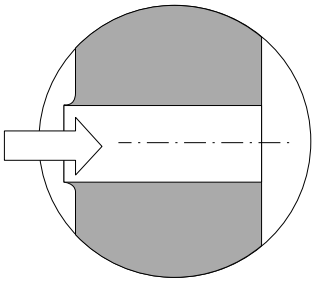
Verbrennungsvorgänge werden beeinflusst:
- Brennkammern funktionieren nicht

Kavitation: Abtrag in Leitungen, Schwingungen

Funktionsstörungen von Brennkammern bei Gratbildung nach Fertigungsumstellung



Der Strömungswiderstand wird besonders durch Grate gegen die Strömungsrichtung stark erhöht.



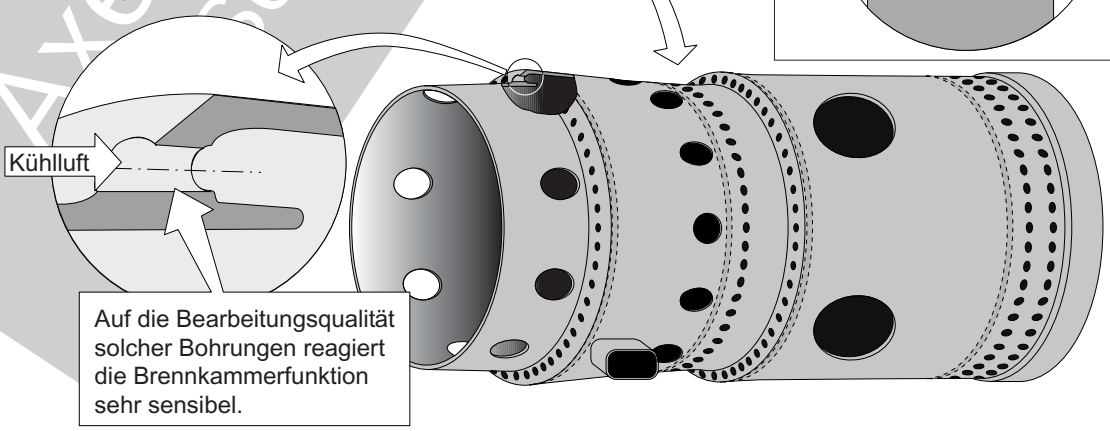


Bild 18.2-7

© Axel Hassmann Schutzgebühr

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Das Entgraten der Kanten ist von großer Bedeutung für die Bauteilsicherheit.

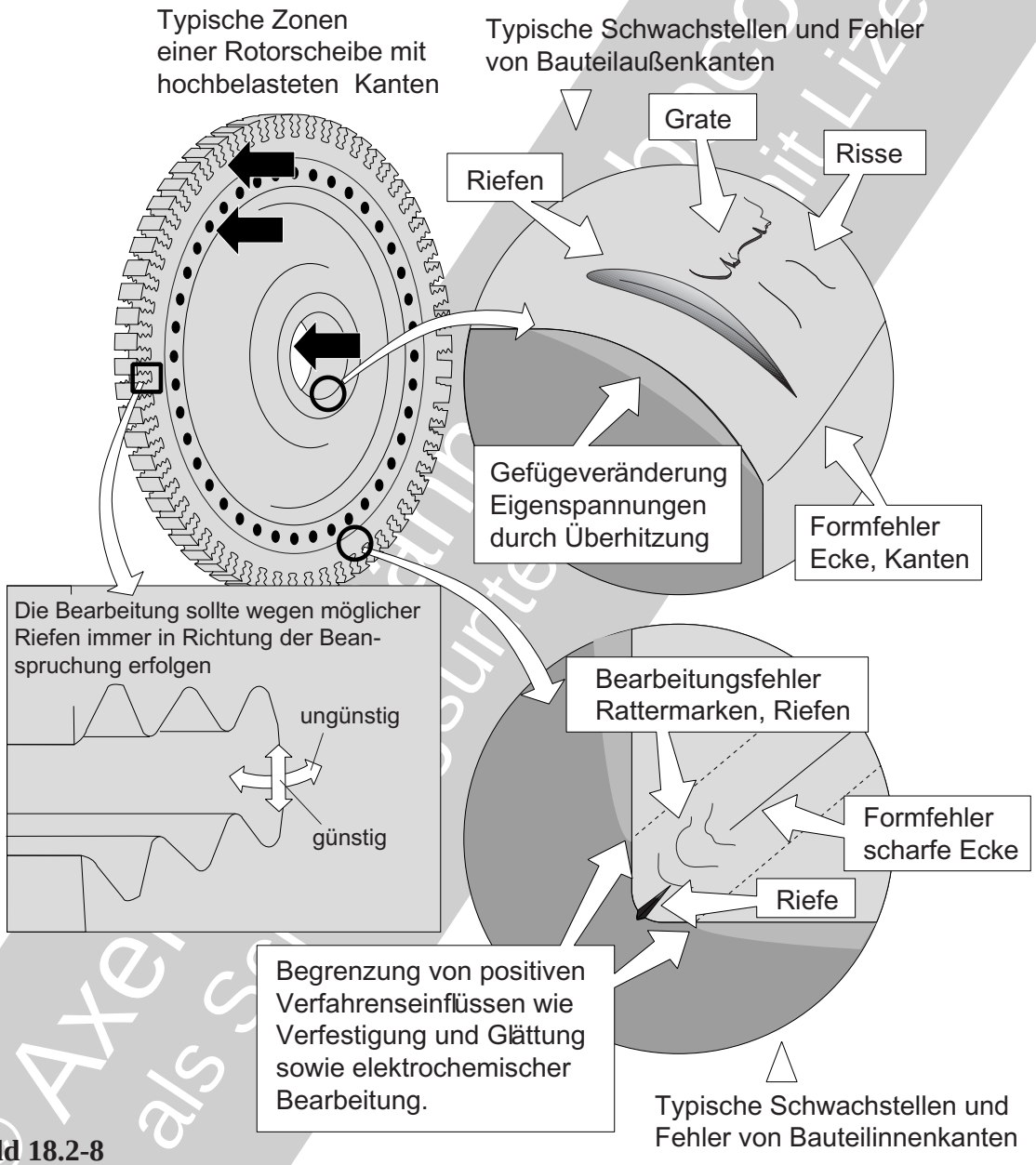


Bild 18.2-8

© Axel ... als Sonderausgabe ... mit Lizenz

Fertigung: Grate und zu scharfe Kanten

Bild 18.2-8: *Entgraten ist gewöhnlich mit dem Verrunden von Kanten gleichzusetzen. Im Folgenden wird der Einfachheit halber immer von „Entgraten“ gesprochen. Wird diese Tätigkeit als wenig qualifizierte abgetan, handelt es sich um eine* ***gefährliche Unterschätzung*** *(Beispiel 18.2-1, Lit 18.2-4). Gerade die etwas* ***eintönig erscheinende aber Fachkenntnis, Geschick und Motivation erfordernde Tätigkeit an sehr sensiblen Bauteilzonen kann eine spezifische Personalauswahl*** *notwendig machen.*
Nicht nur in hoch zyklisch beanspruchten Zonen wie Schaufelaufnahmenuten und Bohrungen (Skizze oben links) sondern am gesamten Bauteil ist Entgraten wichtig. Nur mit ***zugelassenen Verfahren im Rahmen abgesicherter Prozessparameter*** *darf entgratet werden. Dabei spielten bei einer spanenden Entgratung per Hand sowohl das Werkzeug nach Art und Werkstoff, als auch Parameter wie Andruck und Drehzahl sowie eventuelle Hilfsstoffe eine wichtige Rolle. In übertragenem Sinn gelten diese Forderungen natürlich auch für andere Entgratungsverfahren wie*

- *abrasives Strahlen*
- *Scheuern, gegebenenfalls mit chemischer Unterstützung.*
- *Druckfließläppen*
- *elektrochemische Verfahren (ECM)*

Zu ***„aggressive“ Prozessparameter****, besonders spanende Entgratung mit hochtourigen Fräsern und Schleifwerkzeug kann Kanten schädigen:*
- ***Aufbau neuer Grate*** *und/oder von* ***Überlappungen*** *(„Schuppen“, Details).*
- ***Überhitzung*** *mit Festigkeitsabfall als Folge einer* ***Gefügeveränderung*** *und im Extremfall* ***Rissbildung****.*
- *Aufbau von* ***Zugeigenspannungen*** *die sich Betriebsspannungen ungünstig überlagern.*

Weitere Probleme, die eher mit der Handhabung der Werkzeuge in Zusammenhang stehen, sind:

- *ungünstige* ***Verrundungskontur***
- *ungünstige* ***Bearbeitungsrichtung****. Dies ist der Fall, wenn* ***Bearbeitungsriefen quer zu den lebensdauerbestimmenden Betriebsspannungen*** *verlaufen (Detail unten links). Leider lassen sich häufig spanende Entgratungsverfahren in für die Bauteilfestigkeit ungünstiger Richtung, effektiver und leichter anwenden. Deshalb ist besonders darauf zu achten, dass dem Personal dieses Risiko bewusst ist.*

Weitere Entgratungsverfahren haben ebenfalls ihre spezifischen potenziellen Probleme:
Elektrochemische Verfahren *müssen einen verstärkten Abtrag der Kanten beherrschen. Ursache ist die Konzentration des elektrischen Feldes. Auch von der Bauteilform „abgeschirmte“ Bereiche müssen zuverlässig entgratet werden. Dabei darf kein selektiver Angriff (Korngrenzenangriff) gefährliche Kerben erzeugen.*
Abrasives Strahlen *kann, abhängig von Strahlgut und Prozessparametern wie Intensität, Auftreffrichtung und -winkel neue Grate oder bedenkliche Riefen erzeugen. Als besonders empfindlich können* ***Kanten von Verdichterschaufeln*** *gelten.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 18.2

18.2-1 D.A.Dornfeld, J.S.Kim, H.Dechow,J.Hewson, L.J.Chen, „Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V“, Berichte der internationalen Forschungsgemeinschaft für mechanische Produktionstechnik (CIRP Annals 1999, Manufacturing Technology), Volume 48/1/1999, Seite 73-76.

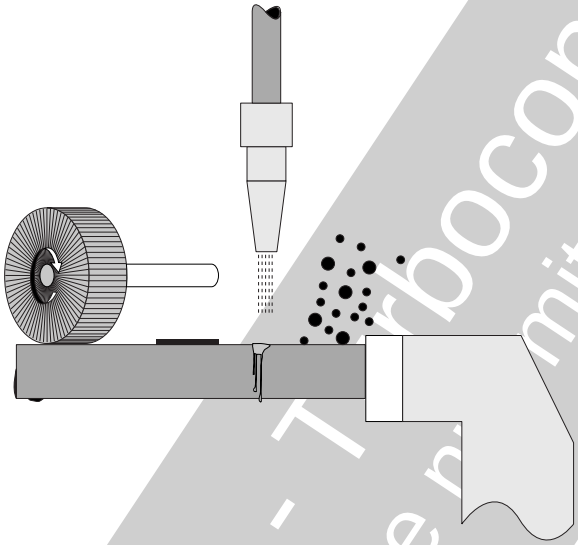
18.2-2 „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-007-7, American Society for Metals, 1986, 442.

18.2-3 „FAA warns Boeing 717 operators of BR 700 engine component failure“, Zeitschrift „Flight International“, December 18, 2000.

18.2-4 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.2.2.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.3 Verunreinigungen an Bauteilen



Der Fertigungsprozess kann Werkstücke schädigend verunreinigen. In erster Linie handelt es sich um Oberflächenverunreinigungen. Auch im Inneren hohler Bauteile wie gekühlten Heißteilen oder in Rohrleitungen können Verunreinigungen in Form einzelner Partikel, Agglomerate und Rückstände auftreten. Als Oberflächenverunreinigungen werden im Folgenden alle, von der vorschriftsmäßigen Oberflächenzusammensetzung abweichende, lose oder anhaftende Ablagerungen betrachtet. Diese Verunreinigungen wirken nicht notwendigerweise ohne weitere Einflüsse schädigend. Erst in weiteren Prozessschritten wie einer Wärmebehandlung (Bild 18.3-10.1 und -10.2), oder in Bädern von Reinigungsprozessen (Bild 12.2.2.3-8 und -9) entfaltet sich häufig die schädigende Wirkung. Besonders unangenehm sind Schäden die sich erst im Betrieb entwickeln (Bild 18.3-9 und Bild 18.3-10.3) .

Die können sich auf das Betriebsverhalten bzw. die Betriebssicherheit der Bauteile auswirken. Die schädigende Wirkung kann sich erst durch ein Zusammenwirken aufeinanderfolgender Fertigungsschritte ausbilden. Typisch ist die Reaktion von Verunreinigungen mit dem Grundmaterial bei einer Wärmebehandlung oder in Bädern von Reinigungsprozessen.

Herkunft bzw. Arten von Verunreinigungen im Fertigungsprozess sind äußerst vielfältig.

- Staub und Partikel aus spanenden Bearbeitungsprozessen wie Schleifen (Bild 18.3-1) und Band 3, Bild 12.2.1.1.1-2)
- Spritzer von Prozessbädern wie Ätzflüssigkeiten.
- Verunreinigungen die von Produktionsmitteln wie Strahlgut oder Vorrichtungen übertragen werden (Bild 12.2.2.3-2.1).
- Hilfsstoffe aus der Produktion die auf dem Bauteil verblieben sind oder von anderen Prozessen wie Reinigungsbädern verschleppt bzw. übertragen wurden (Bild 18.3-3).
- Anwendung falscher bzw. nicht spezifikationsgerecher Hilfsstoffe (Bild 18.3-3). Hierzu gehören ungeeignete Kühlschmierstoffe (KSS, Band 3, Kapitel 12.2.1.1.1) sowie nicht zugelassene Stifte, Stempel und Farben (Bild 18.3-4).
- Staub und Spritzer von Baumaßnahmen im Fertigungsbereich (Bild 18.3-6)

© Axel Rossmann - Turboconsult
Jede Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Ähnlich unterschiedlich sind die Möglichkeiten **wie Verunreinigungen auf die Bauteile gelangen** (Bild 18.3-1):

- Abluft aus Entlüftungen (z.B. Galvanik) und Abgase aus Schornsteinen.
- Kondensation von Dämpfen
- Verunreinigte Werkzeuge und Vorrichtungen
- Prozessmedien wie Bäder oder Strahlgut
- Staub von Bearbeitungsverfahren, Prozessmedien infolge direkter Beaufschlagung oder bei ungeeigneten Reinigungsmaßnahmen.

Verunreinigungen auf Bauteilen lassen sich mit geeigneten Maßnahmen vermeiden (Bild 18.3-18 und Band 3, Bild 14-5). Voraussetzung ist das sog. „gute **Housekeeping**“ welches permanenter Motivation, Sensibilisierung und Bemühung bedarf (Bild 18.3-20).

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Fremdmaterial auf Bauteiloberflächen wirkt in vielfältiger Weise schädigend. Um dies zu vermeiden, sollte man Art, Ursachen und Auswirkungen der Verunreinigungen kennen.

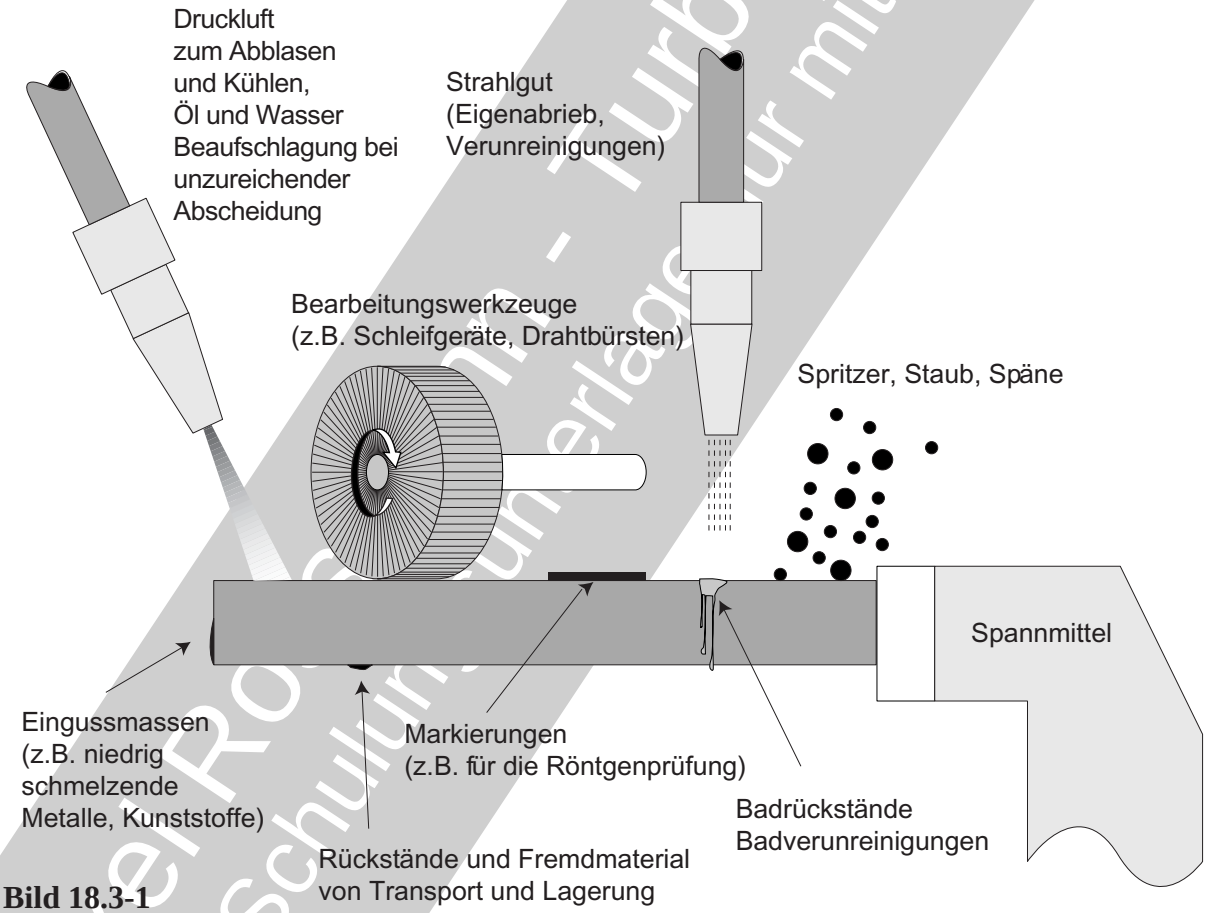


Bild 18.3-1

Bild 18.3-1: *Das schädigende Potenzial unterschiedlichster* ***Oberflächenverunreinigungen*** *(Bilder 18.3-7 bis -11) eröffnet sich erst bei genauerer Betrachtung. Im Folgenden wird dies an einer Auswahl von typischen Beispielen gezeigt.*

Aufschmierungen *entstehen wenn es zu einer fest haftenden Verbindung zum Grundmaterial kommt. Diese bilden sich unter* ***Kaltverschweißungen (Fressen)*** *bei ausreichender Relativbewegung und/oder Druck. Solche Bedingungen liegen in folgenden Fällen vor:*

- ***Bearbeitung*** *mit Werkzeugen wie Drahtbürsten oder Schleifgeräten.*
- *Strahlen mit verunreinigtem Strahlgut.*
- ***Spannen*** *der Werkstücke mit Werkzeugen und Vorrichtungen aus potenziell schädigenden Werkstoffen (Bild 18.3-11).*
- ***Einbetten*** *der Werkstücke mit niedrig schmelzenden Metallen.*

© Axel Rossmann - Turbocon Consult
Zur Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Die schädigende Wirkung besteht in erster Linie in ***Reaktionen mit dem Grundmaterial bei erhöhten Temperaturen*** *nachfolgender Fertigungsschritte und im Betrieb. Gefährliche Diffusionsvorgänge und Anschmelzungen führen zu örtlichem Festigkeitsabfall und/oder Versprödung. Im Extremfall ausreichend hoher Zugspannung und benetzender Bedingungen kann es zu Lötrissigkeit (LME, Bild 18.3-10.1, Band 1 Bild 5.3-6), einer spröden Rissbildung, kommen (Bild 18.3-11). Weitere Probleme sind Schädigungen an Beschichtungen (z.B. Diffusionsbeschichtung), die zu kostspieliger Nacharbeit oder zu kürzerer Oxidationslebensdauer im Betrieb führen.*

Auflagen und Rückstände: *Besonders gefährlich sind metallische Rückstände wie* ***Bleiband****. Es handelt sich um klebestreifenähnliche Markierungen. Sie werden in der Röntgenprüfung zur Kennzeichnung verwendet (Bild 18.3-10.2). Al-Band und Bleiband werden für Abdeckungen bei Strahlprozessen und in der Galvanik verwendet. Auch Al-Bänder sind nicht unproblematisch.*
Formschlüssige Reste einer niedrigschmelzenden Eingießlegierung können in engen Hohlräumen wie Kühlluftkanälen von Schaufeln verbleiben. Auch nicht ausreichend entfernte metallische Beschichtungen (z.B. ***Silber****; Band 1, Bild 5.3-7 und Bild 5.3-8), etwa im Fall einer Nacharbeit, können zu einer Gefahr werden. Die potenziell schädigende Wirkung entspricht der metallischer Aufschmierungen.*
Nichtmetallische Rückstände bilden sich aus eingetrockneten Flüssigkeiten. Dazu gehören Ätz- und Reinigungsbäder oder äußere Verunreinigungen bei Lagerung und Transport (Bild 18.3-2.1 und Bild 18.3-6). Diese Verunreinigungen können insbesondere das Oxidationsverhalten von Heißteilen verschlechtern (Bild 18.3-9). Enthalten Rückstände Halogene wie Chlor, kann es an Bauteilen aus Titanlegierungen unter Zugspannungen bei Temperaturen über 450°C zur Rissbildung (Spannungsrisskorrosion, Lit 18.3-1; Bild 18.3-16 und Band 3, Bild 12.2.1.7-8) kommen.

Partikel und Staub: *Nichtmetallische Rückstände von Transport und Lagerung sowie von „äußeren Quellen“ (Bild 18.3-2) treten gewöhnlich als Staub bzw. Pulver auf. Sie können ebenfalls mit dem Grundmaterial reagieren. SiC reagiert mit Ni-Legierungen bei hohen Temperaturen unzulässig (Lit. 18.3-18).*
*Gerade loser Staub kann die Haftfestigkeit thermischer Spritzschichten entscheidend verschlechtern („****Kügelchenproblem****“, Band 3 Bild 12.2.1.8.2-4).*
Metallische Pulver und Stäube entstehen bei Fertigungsprozessen wie Schleifoperationen, thermischem Spritzen oder Laserbearbeitung. Verbinden sie sich als Funken beim Auftreffen mit der Oberfläche ist eine Schädigung besonders intensiv (Bild 18.6-5).
Spritzpulver*,* ***Beschichtungspulver*** *und* ***Lötpulver*** *können bei sorglosem Umgang auf den Werkstücken liegen bleiben. Die besondere Gefahr dieser hochreaktiven Partikel geht von Diffusion und Anschmelzungen des Grundwerkstoffs bei erhöhter Temperatur aus. Meist handelt es sich um eine Wärmebehandlung oder einen Schweißprozess.*
Zu den Partikeln die sich in Hohlräumen absetzen gehört besonders Strahlgut.

Flüssigkeiten, Fette und Pasten: *Es handelt sich gewöhnlich um Hilfsstoffe (Bild 18.3-3) wie Schmierfette und Kühlschmierstoffe (Band 3, Kapitel 12.2.1.1.1). Eine Schädigung kann sich bei nachfolgenden Beschichtungsprozessen in Form schlechter Haftfestigkeit oder Ablösung der Schichten zeigen.*

Rückstände von Ätzmitteln- und Lötpasten *können mit Schwitzwasser zu Korrosionsschäden führen (Bild 18.3-15 und Bild 18.3-17)*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Vorsicht, es gibt auch eine Partikelverschleppung!

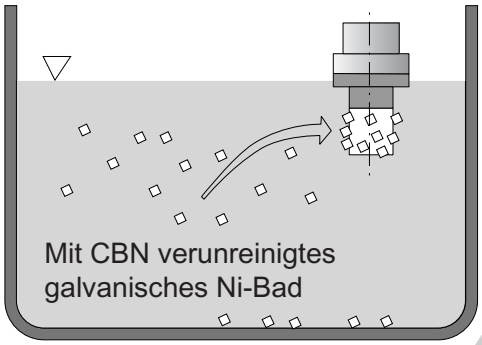
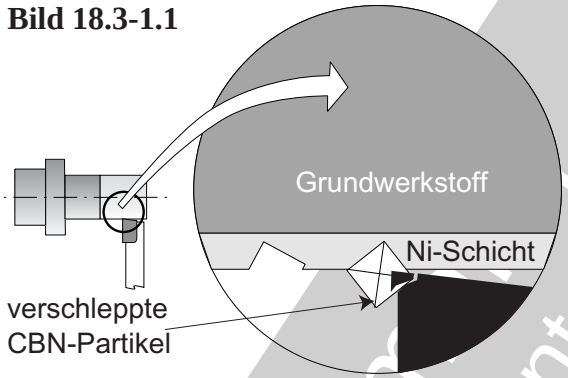


Bild 18.3-1.1



Bei Entfernungsversuchen mit Zerspanungswerkzeugen werden diese zerstört. Das gilt auch für Keramik- und Hartmetallschneiden. Kerben herausgerissener Hartpartikel und durch beschädigte Schneiden senken die Schwingfestigkeit gefährlich ab.

***Bild 18.3-1.1**: **Hartpartikel** wie CBN werden in **galvanischen Nickelbädern** an Schaufelspitzen als Verschleißschutz aufgebracht. Wird das mit Hartpartikeln 'verunreinigte' Bad zur **Beschichtung anderer Bauteile** verwendet, können dort unerwünscht Hartpartikel in die Oberfläche eingebettet werden. Diese Partikel bilden Form- und Mikrosteifigkeitskerben. Damit **mindern sie die Schwingfestigkeit** des Bauteils.Wird jedoch versucht die Parikel **mechanisch zu entfernen,** ist sogar mit noch größeren **Schädigungen** zu rechnen. Es kommt zum Ausbrechen der Körner aus der Nickelschicht und indirekt zu Oberflächenschäden durch an den Hartpartikeln beschädigte Werkzeugspitzen. Bleibt also nur ein Auflösen der verunreinigten Schicht.*

***Bild 18.3-2.1:** Ein wichtiger Mechanismus, mit dem Verunreinigungen in der Fertigung auf Bauteiloberflächen gelangen, ist die **Verschleppung von Medien**. Die eigentliche Schädigung wird erst von nachfolgenden Fertigungsschritten wie einer Wärmebehandlung ausgelöst.*

***Reinigungs- und Entfettungsbäder:** schwimmen die abgelösten Verunreinigungen wie Fette und Öle, ähnlich den Fettaugen einer Suppe, auf dem Bad (Band 3, Bild 12.2.1.7-12) werden eingetauchte Teile beim Herausnehmen wieder verunreinigt (Skizze oben links, Bild 17.3.1-8). So können sich Verunreinigungen epidemieartig ausbreiten. Typisches Beispiel sind Silikone als Ursache für Haft- und Benetzungsprobleme.*

***Abgase und Entlüftungen:** Werden Bauteile und/oder Transportvorrichtungen ohne ausreichende Abdeckung zwischengelagert oder transportiert, können sich darauf Partikel und aggressive Medien ablagern (Skizze oben rechts). Beispiel ist die Abluft von Galvaniken wenn keine ausreichenden Filter und Abscheider vorhanden sind oder deren Funktion eingeschränkt ist. Werden **Säuretröpfchen mitgerissen** oder **Säuredämpfe** von sich absetzender Luftfeuchtigkeit (**Schwitzwasser**) gebunden, können bedenkliche Anfressungen (z.B. interkristalline Korrosion = IK) entstehen. Eine besondere Gefahr der Verschleppung besteht bei **Transportvorrichtungen**. Besonders „**saugfähige**" **Werkstoffe** wie ungeschützte poröse Kunststoffe, Holzkisten oder Holzpaletten erscheinen bedenklich. Saugt der Werkstoff Verunreinigungen auf, lassen sie sich wie von einem Stempel auf andere Teile übertragen. Diese sind ihrerseits in der Lage, die Verunreinigung weiterzugeben.*

*Das **Abblasen mit Druckluft** zum Entfernen von Staub und Flüssigkeiten kann bei eingeschränkter Funktion des Wasser-/Ölabscheiders ebenfalls problematisch sein.*

© Wegst GbR - TU Ilmenau
Nur zum Schulungsunterlagen Lizenz

Kondensation von Dämpfen und/oder Reaktion mit Dämpfen sowie Abtropfen von Schmelzen bei erhöhten Temperaturen: *In Warmbehandlungsgefäßen, insbesondere wenn diese unter „Vakuum“ stehen, können Metalle abdampfen. Metalldampf der auf kälteren Flächen desselben oder anderer Bauteile kondensiert kann schädigen (Skizze Mitte links). Ein besonders hohes Schädigungspotenzial haben Kadmium, Blei, Wismut, Silber und Aluminium (Bild 18.3-11) sowie von Beschichtungspulvern (Band 3, Bild 12.2.1.4-14) und Loten (Bild 18.3-5). Rückstände wie Röntgenmarkierungen (Bild 18.3-10.2) und Reste einer niedrigschmelzenden Eingusslegierung (Bild 18.3-14) auf nicht ausreichend gereinigten Bauteilen können durch Diffusion, Anschmelzung oder Rissbildung (LME, Bild 18.3-13) die Festigkeit der Bauteile gefährlich beeinträchtigen.*

Verunreinigungen im Strahlgut: *Werden Anlagen zum Abrasiv- und Verfestigungsstrahlen (Skizze Mitte rechts) so eingesetzt, dass eine Verunreinigung des Strahlguts nicht vermieden wird, können diese auf nachfolgende Bauteilchargen übertragen werden (Band 3, Bild 12.2.1.6-11). Auch schädlicher Abrieb an Vorrichtungen aus ungeeigneten Werkstoffen kann entstehen und im gleichen Arbeitsgang auf das Bauteil übertragen werden (Bild 18.5-1). Ein typisches Beispiel ist der Abrieb von Abdeckbändern aus Blei, die verwendet werden um das Eindringen von Strahlpartikeln in Hohlräume zu verhindern.*
Abrasives Strahlen *wird auch zum Entfernen von Beschichtungen verwendet. So besteht die Möglichkeit, dass solche Partikel auf empfindliche Zonen durch einen „**Beladungseffekt**“ zurückbleiben und spätere Fertigungsprozesse stören (Band 3, Bild 12.2.1.8.1-3).*

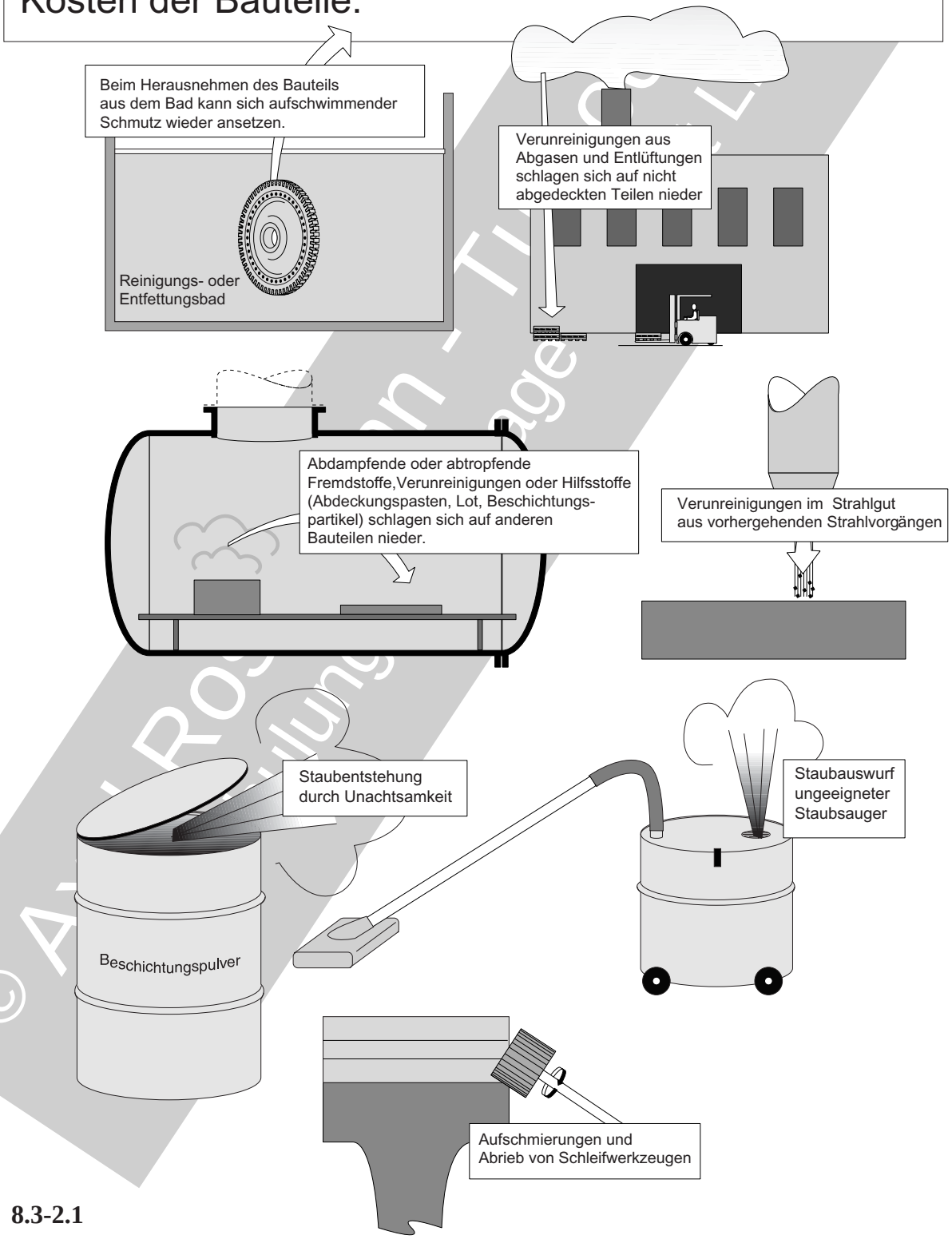
Staubablagerungen infolge Unachtsamkeit: *Dieses Risiko wird durch unzureichende Lagerung bzw. Abdeckungen (Bild 14-5), schlechte Einweisung, geringe Motivation (Bild 18.3-20) und/oder ungenügende Arbeitsvorbereitung erhöht. Das Öffnen des Deckels eines Aufbewahrungsgefäßes, die Entnahme und das Umfüllen des Pulvers kann dieses freisetzen. So entstehen Staubablagerungen auf Bauteilen die sich ungeschützt in der Nähe befinden (Skizze unten links). Solche Pulver sind Beschichtungspulver, Spritzpulver, Sinterpulver und Lotpulver. Sie sind wegen ihrem niedrigen Schmelzpunkt und der Neigung zur Diffusion sowie den Benetzungseigenschaften für Stähle, Ti- und Ni-Legierungen äußerst problematisch. Während einer Wärmebehandlung können sie das Bauteil an der Oberfläche und tiefgehend schädigen.*
*Wird mit unzulänglichen Mitteln versucht das Pulver zu bergen, kann das Problem noch größer werden. Verwendet man z.B. einen **Staubsauger mit zu grobem Filter** und oder einem Funktionsausfall des Filters, kann die Abluft das Pulver im gesamten Raum verteilen (Skizze unten rechts).*

Aufschmierungen mit Schleifwerkzeug und Vorrichtungen: *Schleif- und Glättungswerkzeuge, insbesondere vom „Schmirgeltyp“, können Abrieb aufnehmen. So lassen sich unterschiedliche Werkstoffe (z.B. Buntmetall, Leichtmetall und Ni-Legierungen) auf Bauteilzonen (z.B. Beschichtungen) oder andere Bauteile übertragen (Skizze unten Mitte).*
Vorrichtungen oder Hilfswerkzeuge *(z.B. ein Durchschlag) aus ungeeignetem Werkstoff (z.B. Kupfer oder Messing) können auf dem Bauteil Abrieb erzeugen der nachfolgende Fertigungsprozesse stört (z.B. Galvanik, Ätzen) oder bei einer Wärmebehandlung den Werkstoff unzulässig beeinflusst (Bild 18.3-11).*
*Wird von einem Werkzeug wie Stahlbürsten oder Stahlwolle (!) **Fe-haltiger Abrieb auf Ti-Legierungen** übertragen, kann das zur **Versprödung von Schweißnähten** führen (Band 3, Bild 12.2.1.3.1-19).*

© Meerbusch - Tutorconsult
Lehrgangsunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Die Verschleppung unerwünschter Stoffe in der Fertigung gefährdet die Sicherheit und erhöht die Kosten der Bauteile.



8.3-2.1

Luftverunreinigungen aus dem Produkionsprozess können von Triebwerken in benachbarten Prüfständen angesaugt werden und Schäden auslösen.

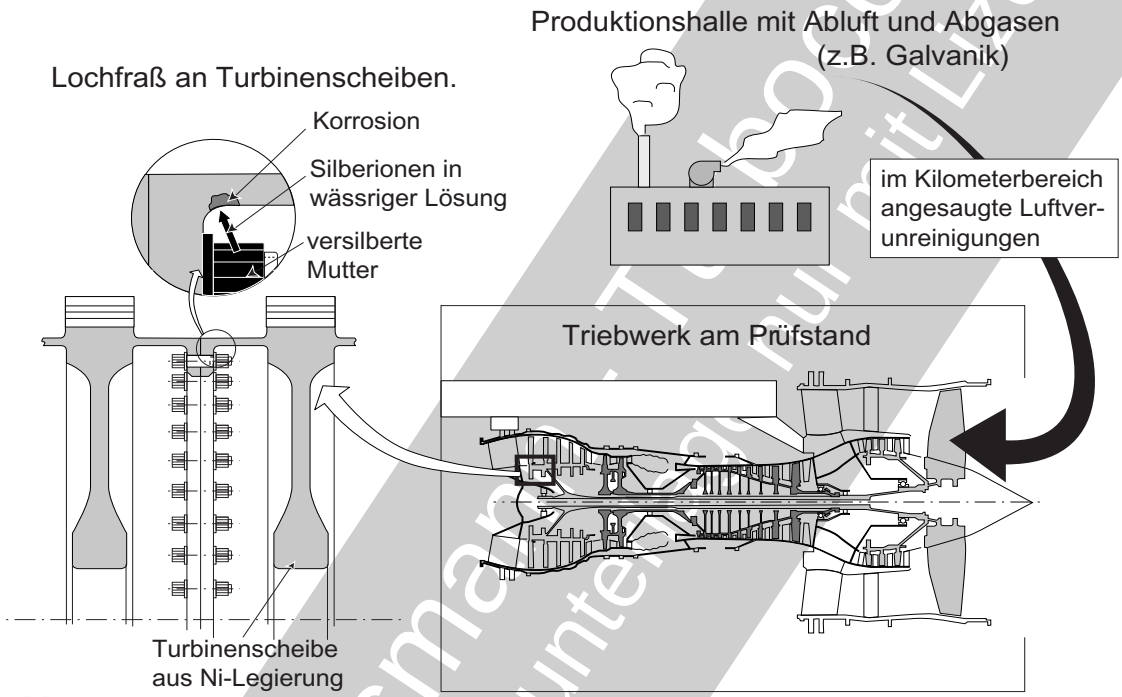


Bild 18.3-2.2

Bild 18.3-2.2: *Verunreinigungen und Schadstoffe aus der Fertigung können auch* ***direkt auf das Triebwerk einwirken****. Dabei handelt es sich nicht um eine Verunreinigung der Bauteile im Fertigungsprozess.*
Häufig befinden sich ***Prüfstände in der Nähe von Fertigungshallen****. So kann* ***verschmutzte Abluft erfahrungsgemäß bis zu einigen Kilometern*** *mit dem Wind in den Ansaugbereich der Triebwerke gelangen. Diese Verunreinigungen setzen sich im Triebwerk ab und sammeln sich an. Sie können langfristig zu gravierenden Schäden führen. Meist handelt es sich um Korrosion, insbesondere Sulfidation im Heißteilbereich.*
Als potenziell besonders aggressiv sind ***Luftverunreinigungen aus der Galvanik*** *zu bewerten. Hierzu gehören Chlorverbindungen aus Ätzbädern.*
So wurde ein Fall bekannt, bei dem die ***Scheiben der Niederdruckturbine*** *von Erprobungstriebwerken aus einer Ni-Legierung nach längeren Prüfstandsläufen* ***Lochfraß*** *aufwiesen. Es zeigte sich, dass Schwitzwasser in den Stillstandszeiten mit angesaugten chlorhaltigen Luftverunreinigungen offenbar einen aggressiven Elektrolyten bildete. Die Verunreinigungen stammten aus einer mehrere hundert Meter entfernten Galvanik. Sie lösten Silber von Verschraubungen der Rotoren. Diese Silberlösung wurde beim Starten des Triebwerks nach außen zentrifugiert. Sie dampfte unter den hohen Betriebstemperaturen ein. Das ausgeschiedene* ***Silber löste Sulfidation*** *(Band 1, Bild 5.6.1.4.1-3) mit lochfraßartigen Beschädigungen in kritischen Scheibenzonen aus.*
In einem anderen Fall wurden ***Lacknebel*** *von einem Triebwerk auf dem Prüfstand beim Abnahmelauf angesaugt. Die Ablagerungen erforderten eine Demontage und vollkommene Reinigung des Verdichters mit hohen Kosten.*

© Axel Bossmann - Technische Universität Clausthal - zur Verfügung gestellt für Studierende ausschließlich zum privaten Gebrauch

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Vorsicht in der Fertigung mit nicht zugelassenen Hilfsstoffen und/oder nicht vorgesehener Anwendung!

Beispiele: MoS_2, Grafit, BN, Silikon und Teflon können in Lacken, Spray, Trennmitteln, Kühl- und Schneidmitteln und Schmiermitteln vorkommen.

- Gefährlich für Verfahren deren Funktion von Reibeffekten beeinflusst werden ein typisches Beispiel ist Reibschweißen.
- Haftprobleme bei Beschichtungen und Lackierungen
- Störungen in Diffusionsschichten
- Benetzungsprobleme bei Eindringprüfung
- Schädigung,Korrosion und unerwünschte Reaktionen
- nach "einbrennen", schlecht entfernbar

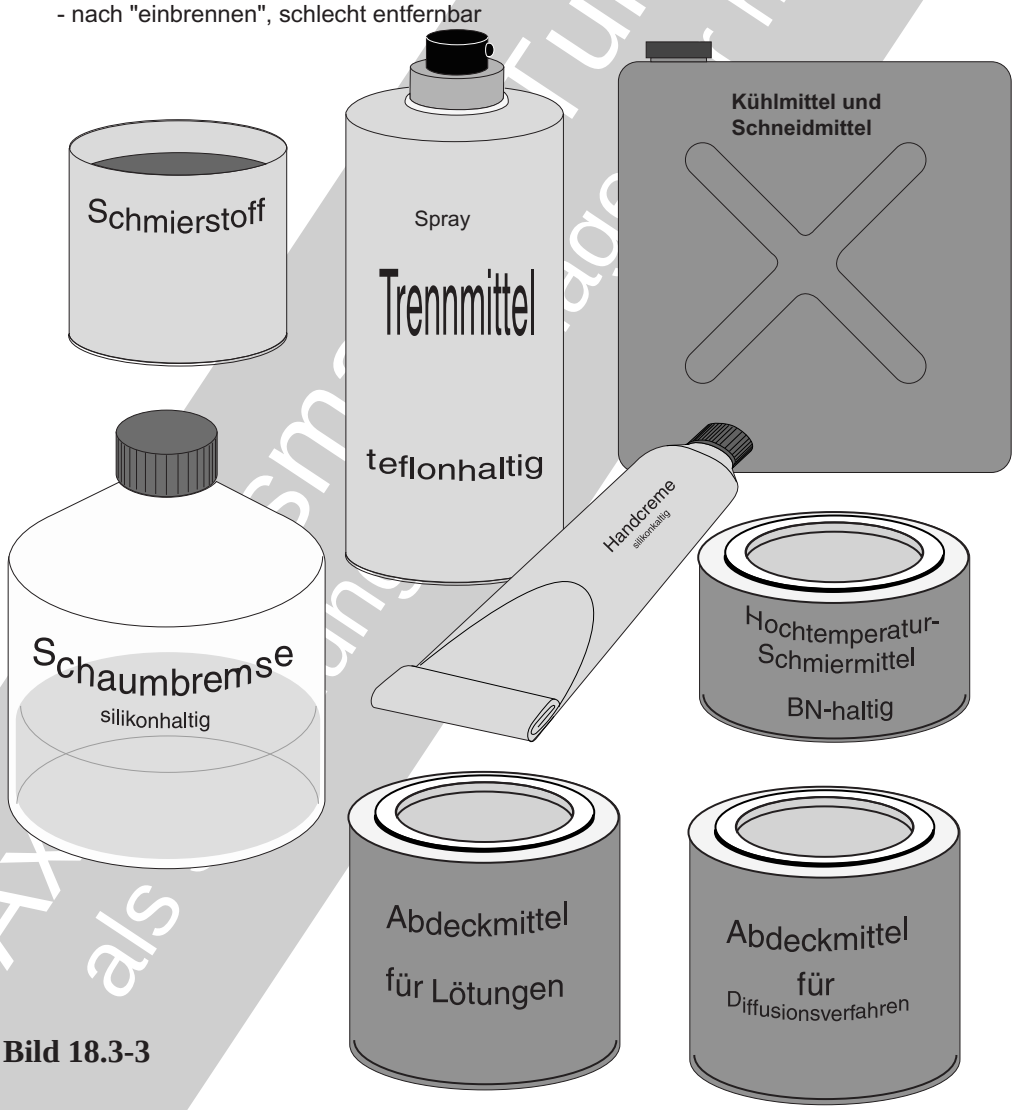


Bild 18.3-3

Bild 18.3-3: *Viele Probleme mit* ***Oberflächenverunreinigungen in der Fertigung lassen sich auf Hilfsstoffe zurückführen****. An einigen typischen Beispielen soll das Schädigungspotenzial verschleppter Hilfsstoffreste aufgezeigt werden.*

Schmierstoffe: *Bearbeitungsmaschinen erfordern an Gleitflächen, Lagern, Spindeln usw. eine Schmierung mit* ***Fett oder Öl****. Werden Bauteile mit diesen Gleitmitteln verunreinigt und nicht ausreichend gereinigt, besteht in*

nachfolgenden Fertigungsschritten die Gefahr einer Bauteilschädigung. Dazu gehören Beschichtungen (Lit. 18.3-5) und Wärmebehandlung. Ein ähnliches Problem mit Rückständen einer Farbkennzeichnung zeigt Bild 18.3-4. An Nickellegierungen können MoS_2-Zusätze unter Zugspannungen ***Rissbildung*** *und/oder eine gefährliche* ***Oxidation*** *auslösen (****Sulfidation****). Andere Ölzusätze können den Oxidationswiderstand ebenfalls herabsetzen und sich so später im Betrieb unangenehm bemerkbar machen.*

Entschäumungsmittel/Silikonöle *(Band 3, Bild 12.2.1.1.2-13): Diese Verbindungen beeinflussen als Verunreinigungen die* ***Benetzbarkeit****. Das kann bedenkliche Folgen haben: Die* ***Haftfestigkeit von Beschichtungen*** *wie Lacke und der Schichtaufbau werden gestört. Wenn die Festigkeit zwischen den Lagen faserverstärkter Kunststoffe (FVK) abfällt, entstehen zerstörungsfrei schwer feststellbare delaminationsempfindliche Fehlstellen .*
Die ***Rissprüfbarkeit mit Eindringstoff*** *(Bild 17.3.1-8) könnte unsensibler werden. Dieser Effekt wird zwar vermutet, Versuchsergebnisse scheinen aber nicht eindeutig zu sein. Da jedoch dieser Verdacht besteht, sind erfahrungsgemäß* ***gegebenenfalls umfangreiche Reinigungsarbeiten*** *an betroffenen Bauteilen notwendig. Die Maßnahmen werden also vom Risiko bestimmt, dass betroffene Bauteile unbemerkt zum Einbau gelangen.*

Kühlschmierstoffe *(KSS, Band 3, Kapitel 12.2.1.1.1)****:*** *Gerade schwer bearbeitbare Werkstoffe wie Ni- und Ti-Legierungen können Kühl- und Schneidmittel für eine bessere Zerspanungsleistung erfordern bei denen die Gefahr besteht, dass sie in nachfolgenden Fertigungsprozessen aggressiv und schädigend wirken. Hochfeste* ***Titanlegierungen*** *sind besonders empfindlich gegenüber* ***Rissbildung*** *(SpRK) unter Einwirkung von* ***Chlor.*** *Das gilt wahrscheinlich auch für andere Halogene wie Fluor.* ***Chlor- und schwefelhaltige Schneidmittel*** *sind deshalb bei Gefahr der Verschleppung nach Möglichkeit generell im Fertigungsprozess zu vermeiden (Lit. 18.3-2).* ***Schwefelbestandteile können an Nickellegierungen*** *bei Wärmeeinwirkung (Schweißen, Wärmebehandlung)* ***Sulfidation*** *im Betrieb begünstigen.*
Wirken Öle mit Schwefelgehalt auf ***versilberte Teile*** *wie Schrauben, Muttern und Gleitflächen, zeigt ein* ***dunkles Anlaufen*** *bis zur* ***Schwarzfärbung*** *die Bildung von Silbersulfid. Der* ***Reibbeiwert kann so deutlich ansteigen*** *und die Gleiteigenschaften verschlechtern. Mit einem vorgeschriebenen Anzugsmoment erreichbare Vorspannungen von Schraubverbindungen werden dann möglicherweise nicht erreicht. Schlechte Gleiteigenschaften von Silberschichten können Betriebsschäden durch* ***Heißlauf und „Fressen“*** *begünstigen. Einen ähnlichen Zusammenhang hat man in den 1960er Jahren an versilberten Gleitschuhen von Axialkolben-Kraftstoffpumpen beobachtet. Mikrobakteriell entstandenes Silbersulfid erzeugte in Kraftstofftanks aggressive Schwefelverbindungen und löste nach kurzen Betriebszeiten katastrophale Pumpenschäden aus.*
Schmierstoffe werden auch in der ***Umformtechnik*** *verwendet. Auf die Teile bzw. das Werkzeug aufgetragen, vermindern sie Verschleiß und die Reibkräfte (Lit 18.3-4). Damit wird in manchen Fällen die Verformung schwer verformbarer Werkstoffe wie hochfeste Titanlegierungen erst möglich. Solche Gleitmittel verbinden sich bei Verformungsprozess unter Temperatur (z.B. Zwischenglühungen) innig mit der Bauteiloberfläche und sind dann schwer zu entfernen. Gleitmittelreste wie Fettsäureamide oder Weichmacher können* ***Fehler in nachfolgenden Lackierungen*** *verursachen (Lit. 18.3-5). Häufig wird der Umformvorgang bei erhöhter Temperatur vorgenommen und/oder zwischen einzelnen Umformschritten liegt eine Wärmebehandlung. So besteht die Gefahr, dass Bestandteile des Schmiermittels (z.B.* ***MoS_2****) mit der Oberfläche schadensbegünstigend reagieren. Auswahl und*

© Axel Bosse-Platz - Tribologie-Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Zulassung solcher Schmiermittel muss diese Gefahr berücksichtigen. Gegebenenfalls sind ***geeignete Nachbehandlungen*** *der Teile vorzusehen.*
Sollen die Teile nachträglich eine Beschichtung wie Lackieren, Emaillieren, Galvanisieren oder thermisches Spritzen erfahren, muss die Oberfläche geeignet behandelt werden (Lit 18.3-4). Auch ***geringste Schmierstoffspuren*** *(oberste Atomlage) können erfahrungsgemäß bei Lackierungen zu Kratern, Rissen, Ablösungen und Benetzungsstörungen führen. Zum Nachweis solcher geringen Verunreinigungsmengen hat sich die Oberflächen-Massenspektroskopie (SIMS Verfahren, Lit. 18.3-5) bewährt.*

Reinigungsmittel: *Selbst Rückstände dieser Medien können Beschichtungen, besonders Lackierungen beeinträchtigen. Dies zeigten Spuren eines* ***synthetischen Waschmittels*** *(Na-Laurysulfat) im Produktionsablauf (Lit. 18.3-5).*

Trennmittel *weisen gewöhnlich einen Anteil von* ***PTFE*** *(Teflon®)* ***oder Silikonverbindungen*** *auf. Sie kommen insbesondere bei der Herstellung faserverstärkter Kunstharzbauteile zur Anwendung. Auf Formen gebracht, ermöglichen sie ein leichteres Lösen des Werkstücks. Diese Medien können bei unachtsamem Versprühen, über Putzlappen oder Reinigungsbäder verschleppt werden. Das führt bei* ***Beschichtungen*** *zu schlechter* ***Benetzbarkeit und Haftproblemen.*** *Die Bindung der* ***Lagen faserverstärkter Bauteile*** *wird geschwächt und Delamination unterstützt. Werden* ***Teflonrückstände ausreichend erhitzt****, etwa bei einer Wärmebehandlung, bildet sich Fluor. Es ist anzunehmen, dass, ähnlich wie Chlor, Titanteile die unter ausreichenden Zugspannungen stehen für* ***Spannungsrisskorrosion*** *gefährdet sind.*

Abdeckmittel: *In der Fertigung benötigt man für Prozesse wie* ***Löten und Diffusionsbeschichten*** *Abdeckmittel. So lässt sich eine unerwünschte Beschichtung bestimmter Flächen vermeiden. Verbleiben Reste dieses Abdeckmittels nach dem Verfahrensschritt zurück oder gelangt Abdeckmittel auf zu beschichtende Flächen oder andere Bauteile ist die Abdeckung Ursache von Fehlstellen.*

Hochtemperaturschmiermittel *werden an* ***Warmbehandlungsvorrichtungen oder Heißteilverschraubungen*** *verwendet, um ein späteres schadensfreies Lösen zu ermöglichen. Solche Medien enthalten Trockenschmierstoffe wie Cr-Oxide und hexagonales* ***Bornitrid****. Es wird befürchtet, dass Verunreinigungen dieser Art bei* ***Reibschweißverbindungen*** *die Reibbedingungen (Band 3, Bild 12.2.1.3.4-4 und -5) so verändern, dass es zu* ***Bindefehlern*** *kommt. Diese Gefahr könnte auch bei* ***grafithaltigen*** *Schmiermitteln bestehen.*

Handwaschpasten, Hautcreme und andere sanitäre Medien: *Sind Stoffe wie Silikonverbindungen enthalten, muss von ähnlichen Gefahren für die Bauteilintegrität ausgegangen werden, wie sie auch für Entschäumungsmittel auf Silikonölbasis und Trennmittel gelten. Die Übertragungsgefahr besteht in erster Linie durch* ***Abdrücke ungeschützter Hände****.*

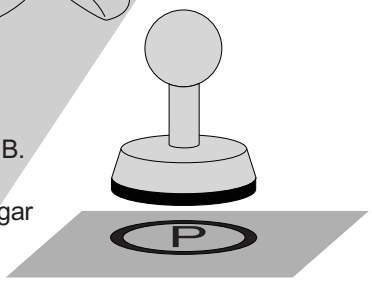
© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Ungeeignete Farben und Stifte insbesondere zur Kennzeichnung von Heißteilen, beeinflussen den Fertigungsprozess und das spätere Betriebsverhalten.

Typische, von einer ungeeigneten Kennzeichnung beeinflusste Anwendungen:

- **Heißteile**: Reaktionen, Oxidation
- **Beschichtungen**: Haftfestigkeit, Struktur
- **Ätzungen**: kein gewünschter Effekt (schlechte Benetzung).
- **Fügungen** wie Löten, Diffusionsschweißen, EB-Schweißen, Reibschweißen: Bindefehler durch Rückstände ausgelöst durch Reibbeiwertsänderung, Benetzung, Oxidation.

Stempel sind eine häufig vorgeschriebene Kennzeichnungsart, z.B. bei der Qualitätssicherung. Stempelfarbe kann nachfolgende Fertigungsprozesse beeinflussen. Falsche Stempelfarbe kann sogar Werkstoffe schädigen.



ungeeignete Kennzeichnung auf metallisch blanker Oberfläche

Ungleichmäßige Oxidation im Bereich der Kennzeichnung nach Wärmebehandlung an Luft

Nach einer Ätzbehandlung zur Entfernung der Oxide bleiben Oxidreste und eine örtliche Versprödung (Gefahr von Rissbildung) im Bereich der Kennzeichnung

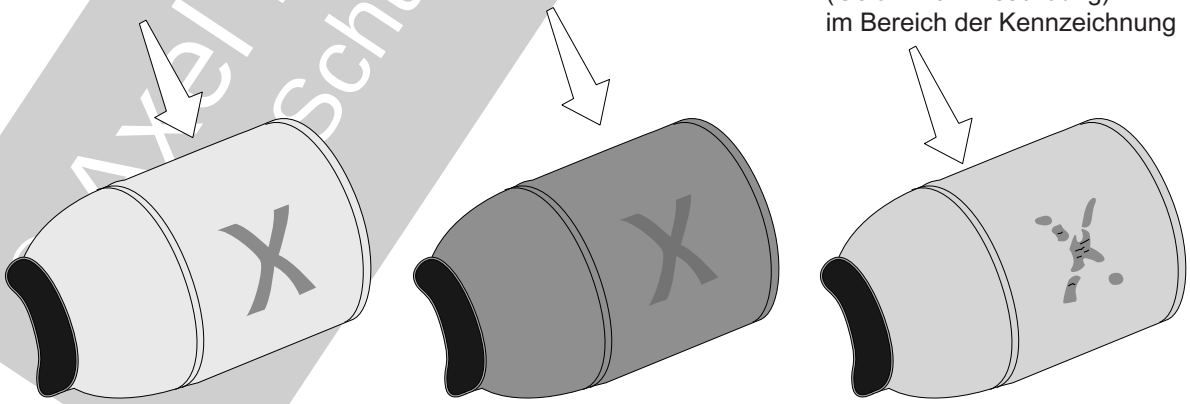


Bild 18.3-4

Axel Rossmann Schulungsunterlage

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Bild 18.3-4: *Ein besonderes Feld schadensrelevanter „Verunreinigungen" ist die Kennzeichnung von Bauteilen mit* ***Stiften, Kreiden und Farben.*** *Grundsätzlich müssen die verwendeten Kennzeichnungsmaterialien für den Anwendungsfall zugelassen sein. Es ist jedoch durchaus möglich, dass dies nur für einen bestimmten Prozessschritt gilt. Für andere, nachfolgende Prozesse jedoch bedenklich ist. In einem solchen Fall ist natürlich vorher für eine ausreichende Reinigung der Teile zu sorgen.*
Inwieweit Fertigungsprozesse und Bauteileigenschaften von Farbkennzeichnungen betroffen sein können ist nicht immer sicher einzuschätzen. Kommen neue Verfahren oder neue Hilfsstoffe wie Reinigungsmittel (z.B. aus Umweltschutzgründen) zum Einsatz, werden möglicherweise Kennzeichnungen nicht ausreichend entfernt. Dann sind unerwartete Auswirkungen nicht auszuschließen.
Poröse Materialien wie Beschichtungen oder Metallfilze *können die Farbe von Stempeln so einsaugen, dass eine schädigende Wirkung auch im Inneren und an der Haftfläche wirksam wird.*

Beispiel 18.3-1 (Lit. 12.2.2.3-1): Die Auswirkung einer Kennzeichnung zeigt die Skizzenfolge unten :
Im Fertigungsprozess wurden Blechteile einer Brennkammer mit einem **Stift** gekennzeichnet. Dadurch wurde bei einer nachfolgenden Wärmebehandlung an Luft die **Oxidation im Kennzeichnungsbereich verändert**. Neben einer Beeinflussung des Grundwerkstoffs entstanden sehr stabile Oxide. Sie ließen sich mit der üblichen nachfolgenden Ätzung nicht ausreichend entfernen. Eine Verschärfung der Ätzbehandlung birgt eher die Gefahr eines interkristallinen Angriffs (Band 3, Bild 12.2.1.7-10) mit unzulässigem Festigkeitsabfall. Ein Belassen der nicht schützenden Oxidation kann diese im Betrieb verstärken. Zumindest kann ein verändertes Aussehen den Kunden irritieren.

Bild 18.3-5: *Ein besonderes Problem ist die* ***Einwirkung von Fremdmetallen*** *(Bild 18.3-10.1 bis -11).*
Eine solche Situation entsteht, wenn niedriger als der Grundwerkstoff schmelzende Metalle bei erhöhten Temperaturen ***im benetzenden Kontakt mit der metallischen Bauteiloberfläche*** *stehen. Also durchaus nicht in allen Fällen metallischer Verunreinigungen auf erhitzten Bauteilen tritt eine gefährliche Schädigung ein. Oxidation kann den erforderlichen metallischen Kontakt verhindern. Dies gilt sowohl für Oxide auf der Bauteiloberfläche als auch für den Fall, wenn beim Erhitzen die Verunreinigung oxidiert bevor sie aufschmilzt.*
Deshalb sind ***Probenversuche*** *die keine schädigenden Effekte zeigen mit Skepsis zu betrachten. In diesem Fall* ***simuliert der Versuch möglicherweise nicht die notwendige ungünstige Kombination schadensrelevanter Einflüsse****.*
Folgende ***Schadensmechanismen*** *werden in erster Linie zwischen oberflächlichen metallischen Verunreinigungen und dem Grundmaterial wirksam:*

Anschmelzungen *in Zusammenhang mit der Bildung niedrig schmelzender Phasen. Damit besteht die Gefahr eines deutlichen,* ***tiefgehenden Festigkeitsabfalls und einer Versprödung****.*

Mikro- und Makrorissbildung *(Lötrissigkeit, LME) erfordert gewöhnlich ausreichend hohe* ***Zugspannungen*** *während die Schmelze einwirkt. Die Schmelze „schießt" dann in die Korngrenzen (Bild 18.3-13). Die Zugspannungen können sich beim Aufheizen oder Abkühlen als* ***Wärmespannungen*** *bilden. Sie können aber auch vor dem Erwärmen als* ***Eigenspannungen*** *(z.B. vom Schmieden) im Bauteil vorhanden gewesen sein.*

Diffusion*: Auch bevor es zum Aufschmelzen der Verunreinigung kommt, kann der Grundwerkstoff von Diffusion geschädigt werden. Werkstoffabhängig kann das bereits bei* ***rela-***

© Vogel Fachbuch Technische Universität Ilmenau

tiv niedrigen Temperaturen *geschehen. So schädigt* ***Kadmium*** *Titanlegierungen um 260°C. (Bild 18.3-11). Eine Diffusion kann die Festigkeit entscheidend* ***absenken und/oder zur Versprödung führen****. Verhindert sie, dass sich* ***eine schützende Oxidschicht bildet,*** *kann das in nachfolgenden Fertigungsprozessen wie* ***Ätzverfahren*** *einen* ***gefährlichen Angriff*** *auslösen.*
Denkbar ist auch ein Auftrag schädigender Metalle über die ***Dampfphase****, wenn sich z.B. im Vakuumofen ein Metalldampf aus Verunreinigungen bildete, der sich dann auf dem Bauteil niederschlägt (Bild 18.3-13).*

Entscheidend für eine Schädigung können z.B. Temperaturänderungen in Fertigungsprozessen oder im Betrieb sein, die hohe Wärmespannungen mit ***plastischer Verformung der Oberfläche*** *erzeugen (Thermoermüdung). Wird eine schützende Oxidschicht unterhalb einer Metallschmelze aufgerissen, ist die Voraussetzung für eine Anschmelzung und/oder Rissbildung im Grundwerkstoff gegeben. So kann der* ***Angriff einer Metallschmelze auch bei scheinbar oxidierten Bauteilen*** *wie sie im Betrieb zu erwarten sind, möglich werden (Bild 18.3-14). Der erforderliche metallische Kontakt zwischen Verunreinigung und Grundwerkstoff kann auch durch* ***Aufschmieren*** *(Lit. 18.3-12), z.B. beim Handling, erfolgen. Bildet sich dann während des Aufheizens keine trennende Oxidschicht, ist eine schädigende Situation gegeben.*
Erfolgt die ***Aufheizung im Vakuum*** *(Wärmebehandlung, Hochtemperaturlöten) oder in einer inerten (Wärmebehandlung) bzw. ätzenden Atmosphäre (Diffusionsbeschichtung) ist nicht von einer schützenden Oxidschicht auszugehen.*

Einige typische ***Metalle, deren Verunreinigungen ein erhebliches Schädigungspotenzial haben*** *sind (Bild 18.3-11):*

- Niedrig schmelzende Legierungen wie Einbettmassen aus Pb, Bi, Sn-Legierungen oder verbliebene ***Reste von Bleibändern*** *die zur* ***Abdeckung*** *oder* ***Kennzeichnung*** *(Röntgenprüfung) dienten (Bild 18.3-10.2).*

- ***Silber*** *und Silberlegierungen von* ***Hartloten*** *oder* ***Beschichtungen*** *(Bild 18.3-10.1).*

- ***Lotpulver*** *für Hochtemperaturlötungen, dessen Schmelzpunkt durch Zusätze wie Bor abgesenkt wird (Bild 18.3-5 und Band 3, Bild 12.2.1.4-14).*

- ***Beschichtungspulver*** *für Diffusionsschichten mit hohem Al-Gehalt (Bild 18.3-13 und Band 3, Bild 12.2.1.8.1-3).*

Gefährliche Verunreinigungen können bereits vor dem Einbringen in den Ofen vorhanden sein. Sie können aber auch ***erst im Ofen auf das Bauteil*** *gelangen. Dieses Risiko steigt mit der* ***Verwendung eines Ofens für unterschiedliche Fertigungsprozesse wie Vakuumglühen und Lötungen****. Die Skizze unten zeigt einen Fall, bei dem ein stecknadelkopfgroßer Tropfen Silberlot zu durchgehender Rissbildung in einer zentimeterdicken Schmiedescheibe führte. Offenbar stammte der Lottropfen von einer früheren Lötcharge und haftete in den porösen Grafit-Dämmmatten des Ofens oder auf dem Chargiergestell (Skizze oben). Man erkennt auch hier die Bedeutung das „****Housekeeping****“ (Bild 18.3-6 und Bild 18.3-20) .*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Ein verunreinigter Ofen und/oder ein verunreinigtes Bauteil wird zum sicherheitsrelevanten Problem.

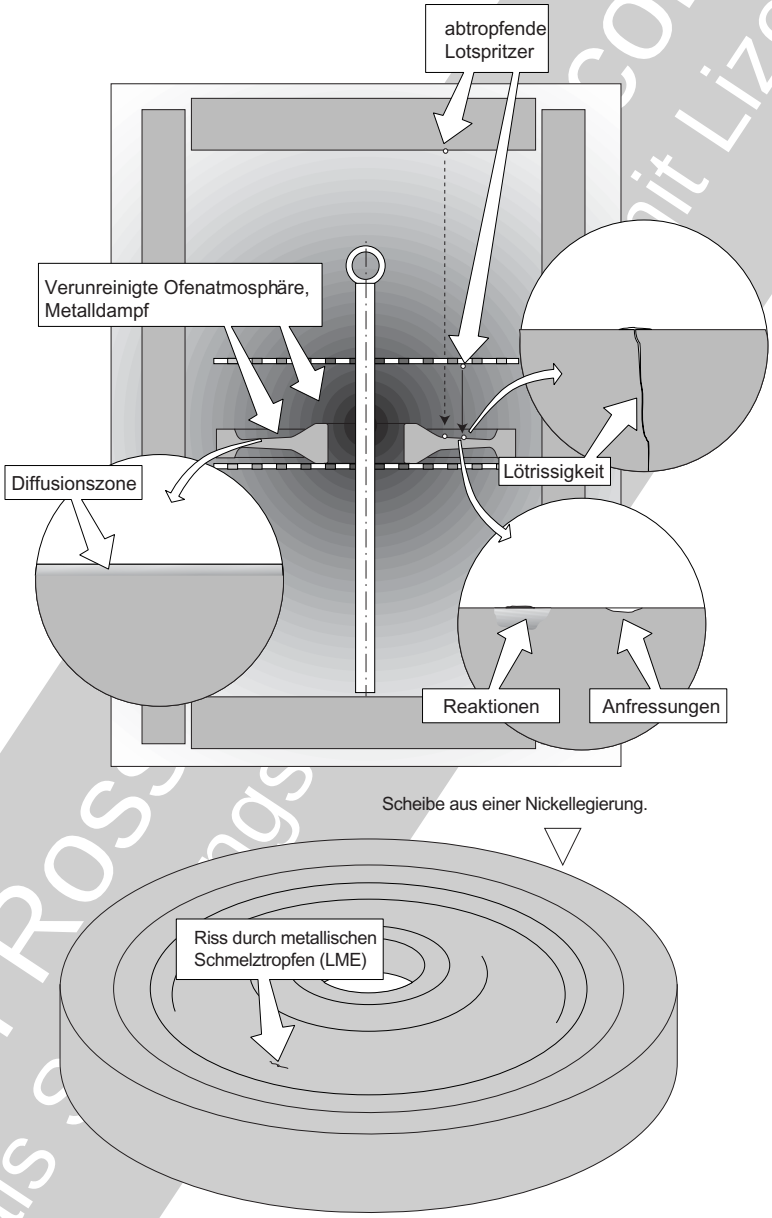


Bild 18.3-5

Bild 18.3-6: *Erfahrungsgemäß müssen in Fertigungshallen häufig* ***Bauarbeiten*** *im Rahmen von Umbauten, Reparaturen, veränderten Abläufen (Umstellung von Maschinen) und dem Aufbau neuer Produktionsanlagen bzw. -maschinen durchgeführt werden. Dabei muss nicht selten im gleichen Raum die Fertigung weiter laufen. In solchen Fällen besteht eine erhöhte Gefahr schadensrelevanter Verunrei-*

© Axel Ross

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

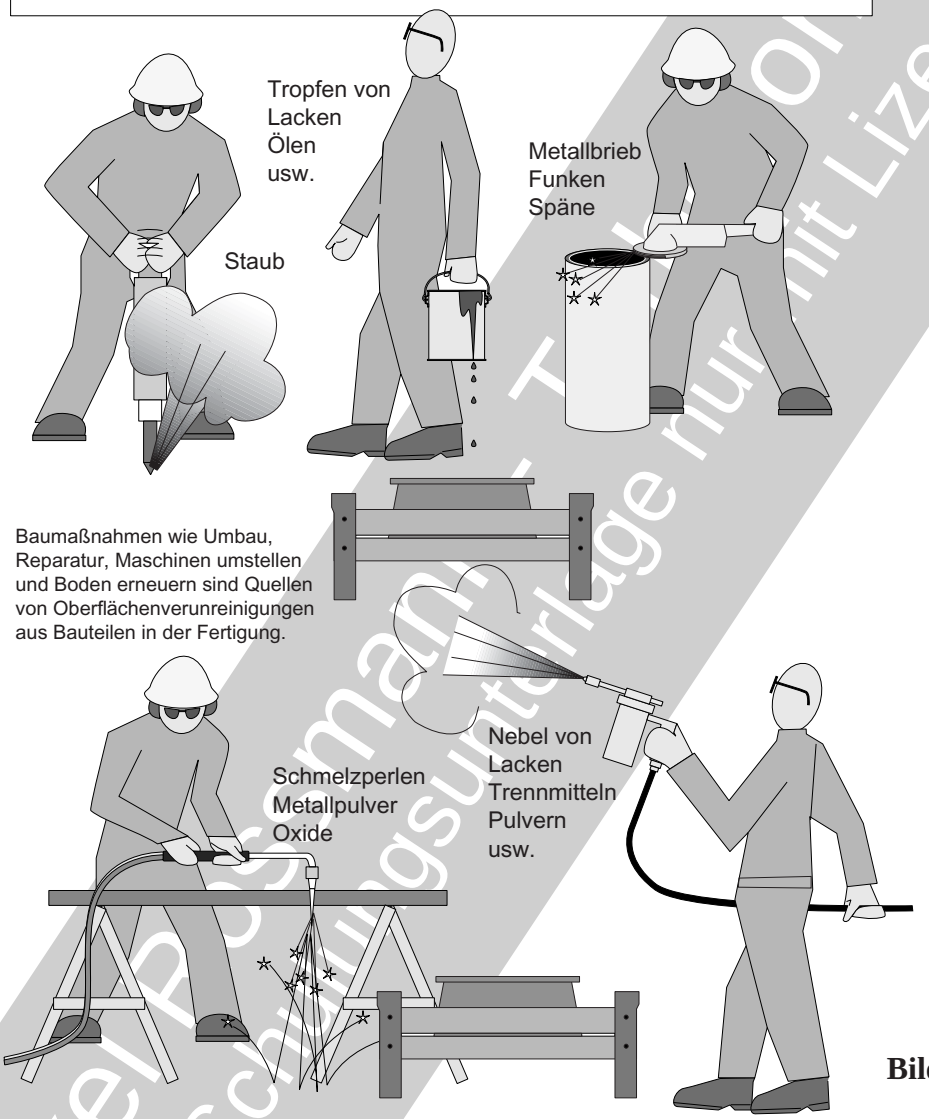


Bild 18.3-6

*nigung von Bauteilen. Abhilfe ist von einem besonders aufmerksamen „**Housekeeping**“ zu erwarten. Hierzu gehören*

*- geeignete **Transportbehälter** für die Werkstücke (Bild 14-5),*

*- **Abdeckungen** (Bild 14-5).*

*- **Zeitliche und räumliche Trennung** (z.B. provisorisch) der Bauarbeiten vom Fertigungsbereich.*

- Erhöhte Achtsamkeit auf Anzeichen für Verunreinigungen wie Staub und Flecken.

*Als besonders gefährlich sind **Metalltropfen** von Schweiß-, Schleif- und Schneidarbeiten anzusehen (Bild 18.3-3 und Bild 18.6-5). Hier besteht die Gefahr einer Reaktion und der Induzierung hoher Zugeigenspannungen als Folge der schnellen örtlichen Aufheizung der Metalloberfläche. So kann die Schwingfestigkeit und damit die zyklische Lebensdauer gefährlich reduziert werden.*

*Eisenhaltiger **Schleifstaub** kann auf Titanlegierungen an Schweißungen Versprödung und Rissbildung auslösen.*

Bild 18.3-1 beschreibt die schädigenden Auswirkungen durch Lacke, Öle und Staub.

© Axel Pössmann - Technologie Consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Aus der Fertigung stammende lose oder sich lösende Partikel in durchströmten Systemen (Öl, Kraftstoff, Luft) haben das Potenzial schwerer Folgeschäden.

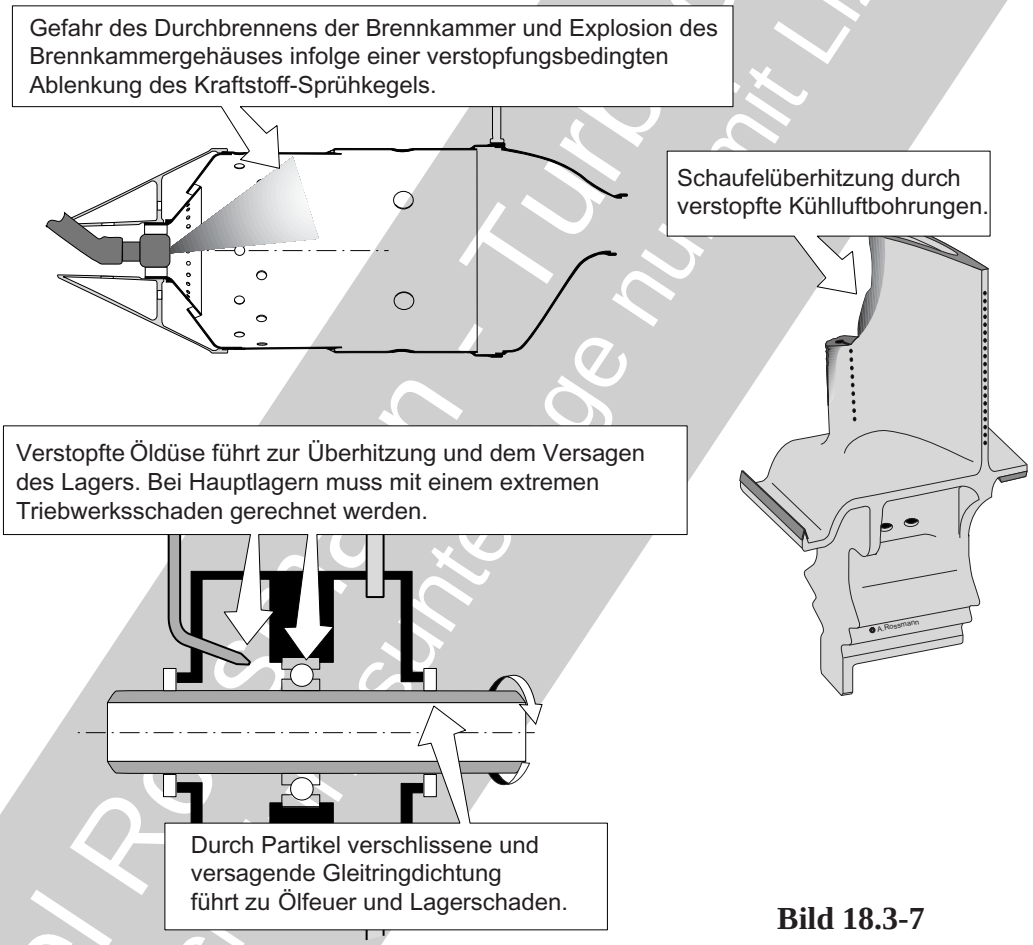


Bild 18.3-7

Bild 18.3-7: *Partikel in* ***durchströmten Querschnitten*** *des Kraftstoff- (Skizze oben links), Öl- (Skizze unten links) und Luftsystems (Skizze rechts) können zu* ***Bauteilversagen mit extremen Folgeschäden*** *führen. Schadensursächlich wirken Minderung, Blockieren und/oder Ablenken der Strömung.*

Wird ***Kühlluft*** *benötigt, sind Überhitzungsschäden an* ***Heißteilen*** *(Bild 18.3-9) zu erwarten.* ***Wälzlager*** *und* ***Gleitdichtungen*** *werden von einem geringeren* ***Ölstrom*** *doppelt beeinflusst. Einmal fehlt die ausreichende Kühlung, zum anderen bedeutet eine schlechte Schmierung eine größere Wärmeerzeugung. Bereits die Ablenkung des aus einer Düse austretenden Strahls, kann deren Wirkung verhindern (Schmierung) und/oder Bauteilbereiche wie die Brennkammer und Gehäuse mit der schräg brennenden Flamme* ***überhitzen****.*

Partikel auf den Laufbahnen führen bei ***Wälzlagern*** *zum* ***Versagen durch Ermüdung der Laufbahnen****. Gelangen abrasive Partikel zwischen die Dichtflächen von* ***Gleitringdichtungen,*** *ist mit Verlust der Dichtwirkung und als Folge mit* ***Ölfeuer*** *zu rechnen.*

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Bild 18.3-8 *und* ***Bild 18.3-9:*** *Das nebenstehende Bild zeigt* ***Schädigungsmöglichkeiten außen und im Inneren einer gekühlten Turbinenschaufel****. Bild 18.3-9 geht auf die inneren (Kühlluftbereich) Schädigungen genauer ein. Das* ***Betriebsverhalten****, insbesondere die* ***lebensdauerbestimmenden Eigenschaften,*** *können von einer Verschmutzung in unterschiedlicher Weise betroffen sein.*

Verschmutzung die aus dem Fertigungsprozess zurückblieb *kann z.B. mit Partikeln in den Kühlluftbohrungen die Kühlung beeinträchtigen. Im dargestellten Fall werden an Hand einer gekühlten Turbinenrotorschaufel potenzielle Gefahren für das Betriebsverhalten durch Verschmutzungen aufgezeigt. Sie lassen sich entsprechend dem Schädigungsmechanismus in die folgenden Gruppen einteilen, die sich gegenseitig beeinflussen können:*

Schädigungen die bereits im Fertigungsprozess von Verschmutzungen ausgelöst *wurden. Eine Form ist die Einbuße an Festigkeit. Beispiele sind unzulässiger Korrosionsangriff im Bereich der Verschmutzung oder Reaktionen mit der Verschmutzung während der Wärmebehandlung (Bild 18.3-1 und Bild 18.3-5).*

Erhöhte Betriebstemperaturen: *Führt man sich vor Augen, dass* ***ca. 15°C Erhöhung der Betriebstemperaturen, die immer im Bereich der Anwendungsgrenzen der Werkstoffe liegen, eine Halbierung der Kriechlebensdauer*** *bedeutet, erkennt man die Auswirkung auch scheinbar geringfügiger Beeinträchtigungen der Kühlung. Zur Verdeutlichung sei darauf verwiesen, dass +30 °C nur noch ein Viertel der Kriechlebensdauer erwarten lassen,+ 45 °C geht schon auf ein Zehntel zu.*
Folgende Einflüsse lassen eine Verschlechterung der Kühlung und damit einen örtlichen Temperaturanstieg des Bauteils erwarten (siehe rechte Skizze in Bild 18.3-9):

- Verengung bzw. Verstopfen der Kühlluftkanäle *mit Fertigungsspänen, Metallspritzern (z.B. vom Laserbohren), Spritz- und Strahlpulver, Diffusionsbeschichtungspulver und Kernrückstände. Hier sind besonders die sog.* ***Entstaubungsbohrungen*** *(Bild 18.3-9) zu erwähnen. Diese befinden sich am Ende der radial verlaufenden Kühlluftbohrungen. Es handelt sich gewöhnlich um sehr kleine Bohrungen. Sie können funktionsbedingt besonders leicht von größeren Partikeln wie Spänen oder Agglomeraten verlegt werden. Auch wenn der Kühlluftdurchfluss in der Gesamtbohrung, die über viele Löcher für eine Schleierkühlung oder Prallkühlung verfügt, scheinbar klein ist, kann bereits die Kriechlebensdauer deutlich unter Garantiewerte absinken.*
- Entstehung verstärkter Oxidation durch Ätzmittelrückstände *und andere, eine schützende Oxidschicht verhindernde Medien (Bild 18.3-9). Oxide in der Kühlkonfiguration wirken sich in doppelter Weise ungünstig aus. Sie* ***verengen Kühlluftkanäle*** *und verhindern mit ihrer* ***Isolationswirkung*** *die vorgesehene Wärmeabfuhr. Dadurch wird wiederum die Temperatur in der Wand erhöht, die Oxidschicht wächst, der schädigende Effekt beschleunigt sich.*

- Festigkeitsabfall und/oder Versprödung: *Beide Effekte beeinträchtigen sowohl die (statische) Kriechlebensdauer als auch die Lebensdauer unter Thermoermüdung.* ***Plastische Verformungen*** *bei diesen Betriebsbelastungen können frühzeitig Risse in versprödeten Bereichen entstehen lassen. Zu den typischen festigkeitsmindernden Einflüssen zählen:*
- ***Reaktionen mit Fremdmetallen*** *(LME, Diffusion, Bild 18.3-11) und anderen Partikeln wie* ***Siliziumkarbid*** *(SiC) mit Ni-Legierungen.*
- ***Interkristalliner (rissartiger) Angriff*** *im Bereich von Ätzmittelresten (Band 3, Bild 12.2.1.7-10).*
- ***Schwächung lasttragender Wände*** *als Folge verstärkter Oxidation (Sulfidation). Diese wird besonders von Silber- und/oder schwefelhaltigen Ablagerungen unterstützt (Bild 18.3-*

© Axel Possmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Fertigungsbedingte Rückstände in Heißteilen verändern auf unterschiedliche Weise die Betriebseigenschaften.

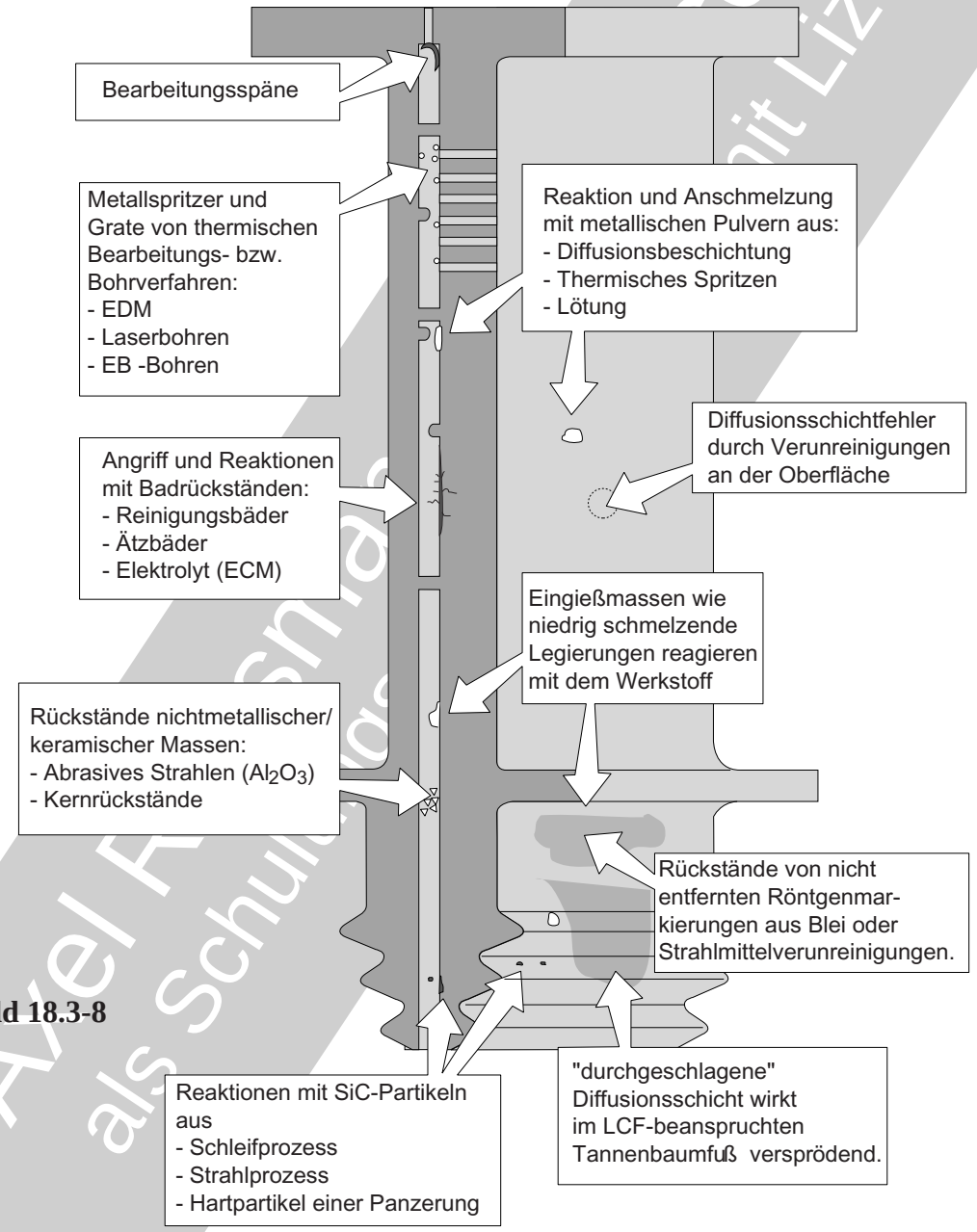
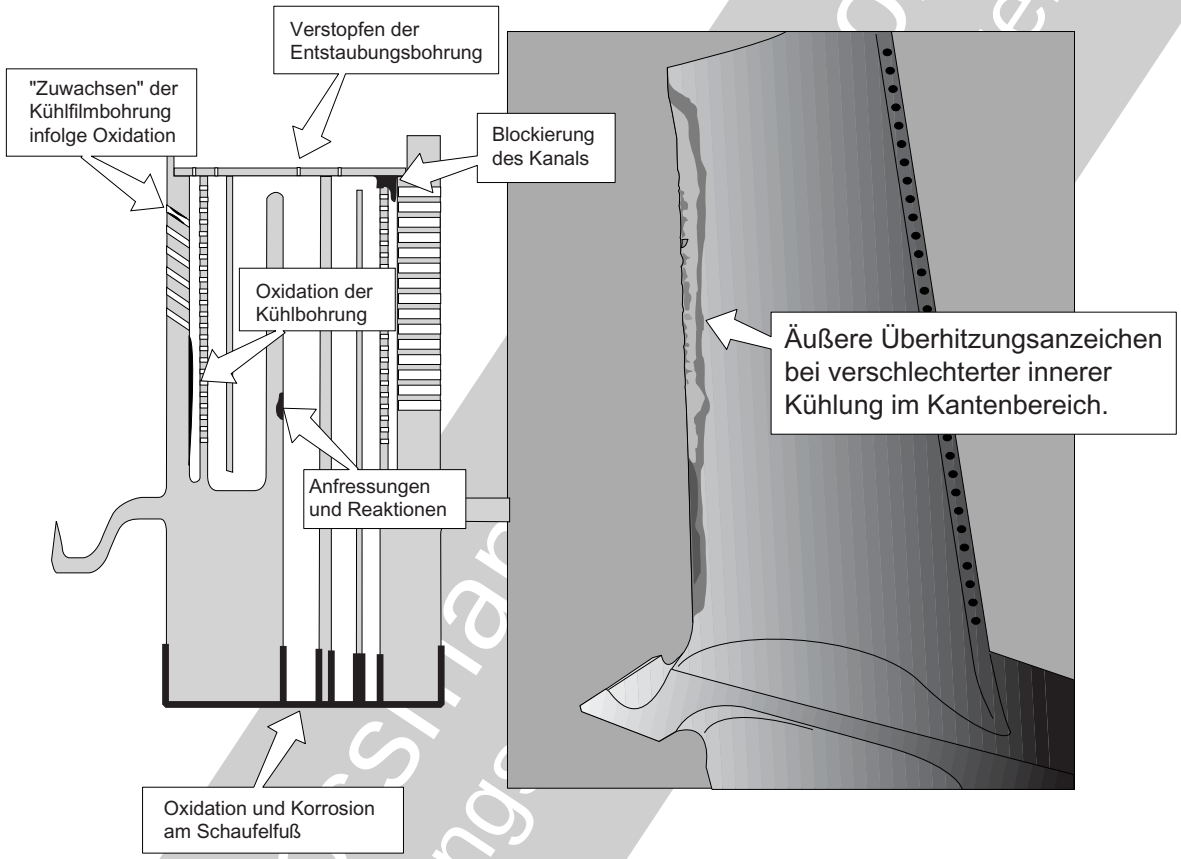


Bild 18.3-8

13; Band 1, Bild 5.6.1.4.1-3 und Band 1, Bild 5.3-8).

- Erhöhung der LCF-Beanspruchung: *Anhaftende Partikel und Werkstoffschädigungen auf hoch LCF-beanspruchten Schaufelfüßen. So werden gegebenenfalls gerade in geschädigten Zonen die Auflagebedingungen zusätzlich verschlechtert. Es entstehen gefährliche örtliche Spannungsspitzen.*

Schädigungen im Kühlluftbereich von Heißteilen, ausgelöst von fertigungsbedingten Verunreinigungen.



Typische Medien aus der Fertigung deren Rückstände Schädigungen **innerhalb** von Heißteilen hervorrufen können:

- Kernrückstände
- Strahlgut
- Ätz- und Reinigungsmittel
- Eingussmassen
- Schmelzperlen von Schweiß- und Bohrverfahren (Laser, EB)
- Beschichtungspulver
- Spritzpulver
- Lotpulver
- Abdeckstoffe
- Späne
- Grate
- Schleifstaub

Bild 18.3-9

Veränderungen der Bauteilfunktionen und andere lebensdauerbestimmende Effekte: *Wird beispielsweise der Oxidationswiderstand der Diffusionsschutzschicht des Blatts einer Turbinenschaufel verunreinigungsbedingt verschlechtert, kann der Oxidationsabtrag das Profil deutlich verändern und so zumindest den Wirkungsgrad verschlechtern.*

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Beispiel 18.3-2 (Bild 18.3-10.1, Lit 18.3-11):

Zitat: „Stage I turbine blades in engines of...commercial airplanes were **precision cast with ...Ni-base superalloy**. After service for 506 h, a fracture suddenly occurred during flight, and the engine was destroyed: the incident nearly led to a catastrophic flight accident.
The (investigation) results show that the blade fatigue failure is due to embrittlement, which is induced by the **contamination of a Bi-Sn low melting point alloy** on the blade surface during the manufacturing process of the blades, under the effects of service temperature and stress.
...high concentrations of Bi and Sn, which are not from the melting and casting process , but are from a Bi-Sn low melting point alloy, which subsequently adheres to the blade surface. Bi and Sn not only exist on the blade fracture surface, but penetrate into the blade foil...
Investigation of the manufacturing procedures of the blades shows that, **during the machining of the blade, one procedure adopts Bi (57%)-Sn(43%) alloy as a locating die**. The melting point of this alloy is 123 °C, and this alloy is very brittle in the solid state. This low melting point alloy is widely used as a locating die. Since the surface of the blade extended root is not machined, and it is incompletely cleaned, it is possible that the Bi-Sn alloy will remain ... after manufacture.
(In service) The centrifugal stress is about 900 MPa, and the temperature about 600°C...
... the (LMIE= LME) fracture is intercrystalline brittle...
Under dynamic stress, LMIE **cracks propagate to a definite dimension**. Owing to the **lack of liquid metal at the crack tip**, the cracks then begin to propagate by fatigue..."

Kommentar: LME wird hier als **LMIE (Liquid Metal Induced Embrittlement)** bezeichnet. Es ist durchaus erstaunlich, dass dieser Schaden erst nach längerer Betriebszeit auftrat. Es hätte erwartet werden können, dass bereits bei der ersten Inbetriebnahme durch Abschleudern, Abdampfen und Oxidation (Lit 12.2.2.3-8) die LME -Bedingungen eines benetzenden Kontakts von Grundmaterial und Schmelze „entschärft" sein sollte. Diese Annahme hat sich hiermit als falsch erwiesen und unterstreicht die Gefährlichkeit des Vorgangs. Möglicherweise war **durch ein Aufschmieren** bereits der erforderliche „benetzende" Kontakt über längere Betriebszeit gewährleistet.

Bild 18.3-10.1 *und* ***Bild 18.3-10.2*** *(Beispiel 18.3-4 und Beispiel 18.3-5): Metallische Verunreinigungen können die Festigkeitseigenschaften von Bauteilen entscheidend verschlechtern und sind damit ein Sicherheitsrisiko. Im Folgenden werden die Schädigungsmechanismen beschrieben.*

Für den selben Schadensmechanismus gibt es verschiedene Begriffe. ***Löt- bzw. Lotrissigkeit, Lotbruch, dehnungsinduzierte Spannungsrisskorrosion in Flüssigmetallen, Liquid Metal (Induced) Embrittlement (LME, LMIE):*** *Offenbar sind* ***mehrere Voraussetzungen*** *für diese Schäden notwendig (mittlere Skizze):*

- *Ausreichend hohe* ***Zugspannungen***
- ***Benetzungsbedingungen****, d.h. die Schmelztemperatur der Verunreinigung muss überschritten sein und es darf keine, auch noch so dünne, Trennschicht (z.b. Oxidschicht) vorliegen (Lit 18.3-9).*
- ***„Empfindlicher" Werkstoff*** *bzw. Werkstoff zustand.*
- *Riss(korrosions)wirksames Medium bzw.* ***Metallschmelze****.*

Bedingungen für die Entstehung von Lötrissigkeit können auf vielfältigere Weise entstehen (Skizzen unten).
Der Forderung nach metallischem Kontakt zwischen Schmelze und Grundwerkstoff kommt die, zumindest bei der Fertigung, meist ***metallische nicht merklich oxidierte Oberfläche*** *der*

© Axel Kressner, TU Dortmund
als Skriptunterlage für mündliche Prüfung

Nickel- und Titanlegierungen entgegen. Das gilt auch für Wärmebehandlungen und Prozesse (z.B. Beschichtungen) im Vakuum oder unter reduzierenden Bedingungen. Ein, trotz nachträglicher Oxidation, weiter bestehender metallischer Kontakt wird auch vom sog. ***Aufschmieren*** *gewährleistet. Solche Aufschmierungen sind Kaltverschweißungen („Fressen"). Typische Entstehungsursachen sind die Einwirkung von Werkzeugen aus ungeeigneten Werkstoffen, Fügevorgänge mit beschichteten Passflächen (z.B. Silber) und Strahlmittel als Verunreinigungen.*

Auch unter dichten Schichten, wie eine Silberschicht oder Cd-Schicht auf Ti- oder Ni-Legierungen, kann über längere Betriebszeiten ein metallischer Kontakt erhalten bleiben (Beispiel 18.3-3 und Beispiel 18.3-4).

Wird die trennende Oxidschicht unter der Schmelze von einem Kratzer beschädigt, wird LME ausgelöst. Solche Kratzer können mit einem Werkzeug oder Relativbewegungen von Berührungsflächen entstehen. Beispiele sind wärmedehnungsbedingte Relativbewegungen zwischen Auflagefläche des Bauteils und dem Chargiergestell oder gegenüber einer Vorrichtung.

Eine weitere Möglichkeit ist das Aufreißen der Oxidschichten und der Grundwerkstoffoberfläche bei zyklischer plastischer Verformung (LCF-Beanspruchung, Thermoermüdung). Mit diesem Mechanismus sind auch LME-Schäden nach längeren Betriebszeiten zu erklären (Beispiel 18.3-2, Skizze oben links).

*Fällt ein Schmelztropfen mit genügender kinetischer Energie auf eine metallische Oberfläche, kann auch eine dünne Oxidschicht (z.B. beim Glühen unter Schutzgas, im Vakuum oder unter reduzierender Atmosphäre) vom „****Tropfenschlag****" durchbrochen (Bild 18.6-5) und der für den Schaden notwenige metallische Kontakt hergestellt werden (Skizze oben rechts, Bild 18.3-5).*

Um Lötrissigkeit auszulösen reichen bereits geringe Metallmengen (Lit. 18.3-12). Es muss sich nicht unbedingt um reine metallische Verunreinigungen handeln. Auch ***Metallpigmente*** *in Beschichtungsstoffen reichen aus.*

Versprödung durch metallischen Kontakt im festen Zustand *(Solid Metal Induced Embrittlement = SMIE): Für eine Versprödung beim Kontakt mit einer metallischen Oberflächenverunreinigung ist es nicht unbedingt erforderlich, dass sich die Verunreinigung im schmelzflüssigen Zustand befindet. Es gibt Fälle, in denen auch ein metallischer Kontakt im festen Zustand Versprödung und Rissbildung auslöst. Diesem Schadensmechanismus dürfte das Aufplatzen versilberter Muttern bei Betriebstemperaturen unterhalb dem Schmelzpunkt zuzuordnen sein (Skizze oben Mitte, Lit. 18.3-8).*

Anschmelzungen *(Bild 18.3-10.2): Hat eine Metallschmelze zwar Kontakt zum Grundwerkstoff, fehlen aber die erforderlichen Zugspannungen, kann es trotzdem zu einer Schädigung kommen. Diese entsteht mit der Bildung niedrig schmelzender Phasen. So kann auch der Grundwerkstoff anschmelzen. Die Festigkeitswerte solcher Anschmelzungen sind gewöhnlich deutlich schlechter als die des Grundwerkstoffs. Häufig ist der Anschmelzungsbereich so versprödet, dass die Gefahr eines sofortigen Anrisses unter Betriebsbelastungen im LCF Bereich besteht. Treten während der Abkühlung zwischen der erstarrten Anschmelzung und dem umgebenden Grundmaterial ausreichend hohe Schrumpfspannungen auf, kann bereits Rissbildung (z.B. Warmrisse) ausgelöst werden. Je nach Menge der Verunreinigung können auch dicke Querschnitte (Zentimeter) unreparierbar geschädigt werden.*

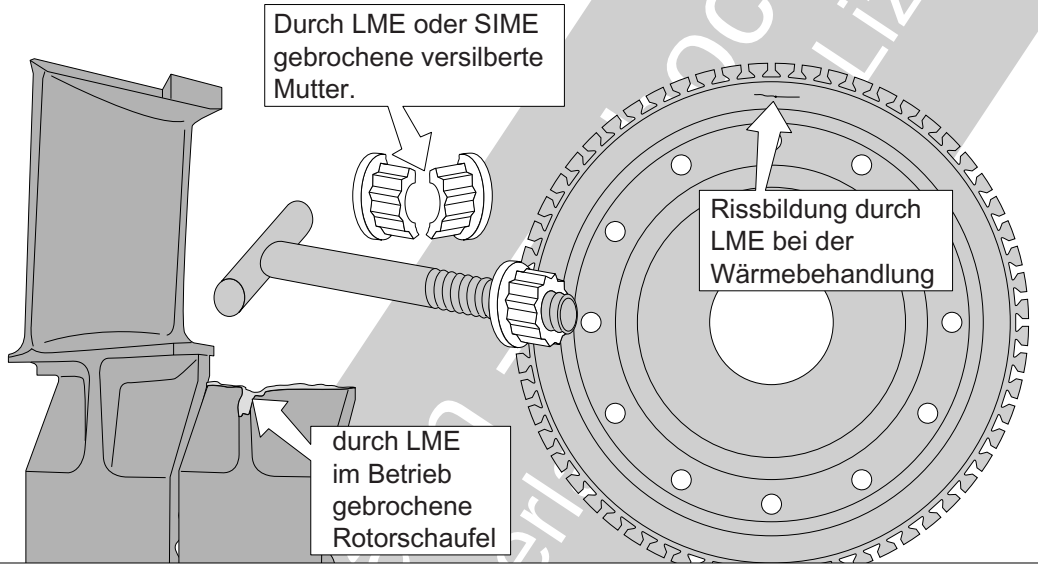
Diffusionsvorgänge*: Sind weder ausreichende Zugspannungen vorhanden, noch die Schmelztemperatur der Verunreinigung überschritten, kann trotzdem der Grundwerkstoff*

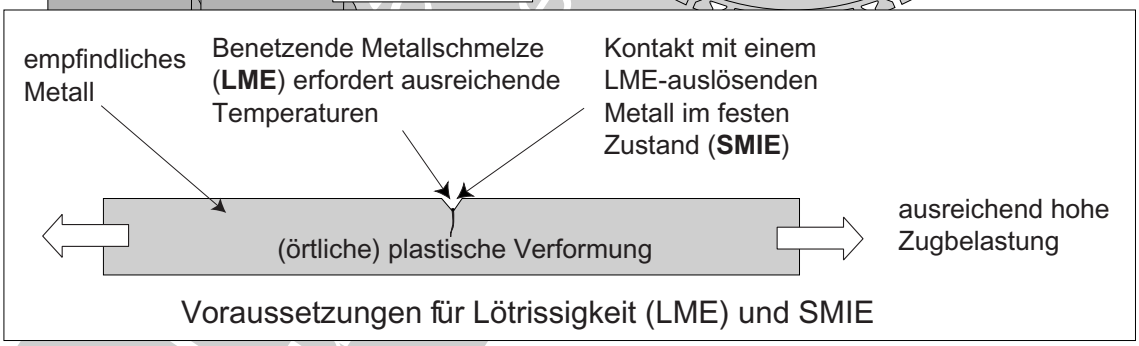
Fortsetzung auf Seite 18.3-24

© Aerospace Consult Ausbildungsunterlagen nur mit Lizenz

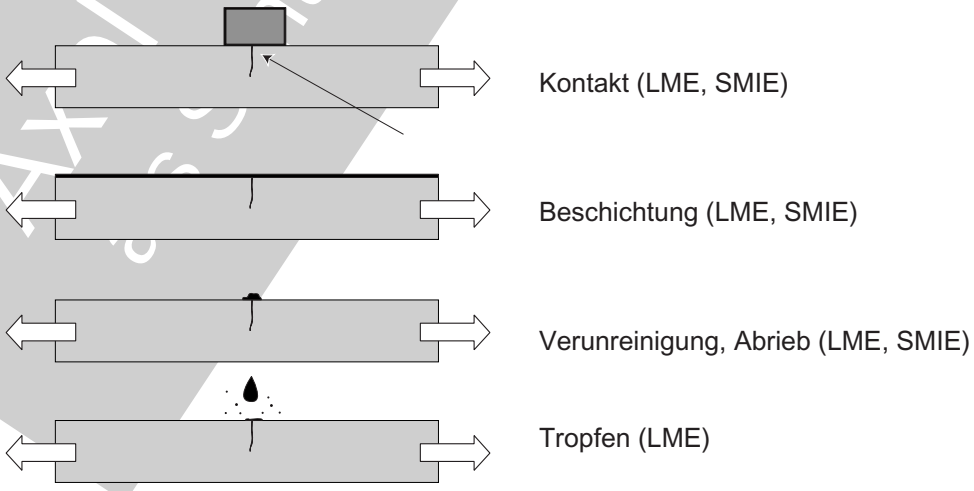
Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Versprödung und Rissbildung als Folge der Einwirkung von Metallschmelzen (Lötrissigkeit= Liquid Metal Embrittlement = LME) und dem Kontakt mit Metallen im festen Zustand (Solid Metal Induced Embrittlement = SMIE).





Voraussetzungen für Lötrissigkeit (LME) und SMIE



verschiedene Ursachen für den Kontakt mit Metallschmelzen (LME) und versprödenden Metallen in festem Zustand (SMIE)

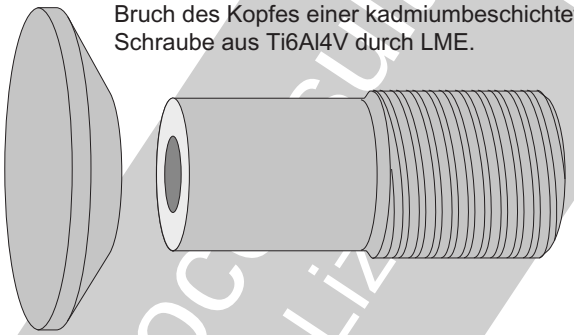
Bild 18.3-10.1

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Fortsetzung von Seite 18.3-22

unzulässig geschädigt werden. Dies ist dann der Fall, wenn Diffusionsvorgänge stattfinden.

Bild 18.3-10.2



Beispiel 18.3-4 (Lit 16.2.2.3-8): **Kadmierte Schrauben aus der Titanlegierung** Ti6Al4V wurden, um eine Elementbildung mit dem zu verschraubenden Aluminiumteil zu vermeiden, kadmiert. Die Temperatur der verspannten Schrauben löste interkristalline Sprödbrüche infolge LME durch das Kadmium aus. Die Brüche gingen von den unter hohen Kerbzugspannungen stehenden Übergangsradien der Schraubenköpfe zum Schaft aus.

Beispiel 18.3-3 (Bild 12.2.2.3-10, Lit 16.2.2.3-8): **Kadmierte Muttern aus niedrig legiertem Stahl mit einer Härte von 44 HRC** wurden für V-Klammern zur Verbindung von Luftentnahmerohren an Verdichtergehäusen eines militärischen Triebwerks verwendet. Die Betriebstemperatur lag bei 500 °C. Die Muttern platzten in mehrere Stücke auf, deren Bruchflächen oxidiert und belegt waren. Sie verliefen spröd und interkristallin und waren mit einer dünnen Schicht Kadmium überzogen. Teilweise waren rote, blaue und goldgelbe Verfärbungen vorhanden.

Bild 18.3-10.3 *(Lit 18.3-16 und Lit. 18.3-10): In mehreren ähnlichen Fällen kam es während der* ***Startphase zum Bruch des äußeren Brennkammergehäuses*** *(engl. Combustion Chamber Outer Casing = CCOC, mittlere Skizzen). Zu diesem Zeitpunkt ist der Brennkammerdruck und damit die Belastung des Druckgehäuses besonders hoch. Die Untersuchungen ergaben, dass sich in den Löchern der hinteren Flanschverschraubung entgegen der Vorschrift, eine*

© Rossmann - Turbocon Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

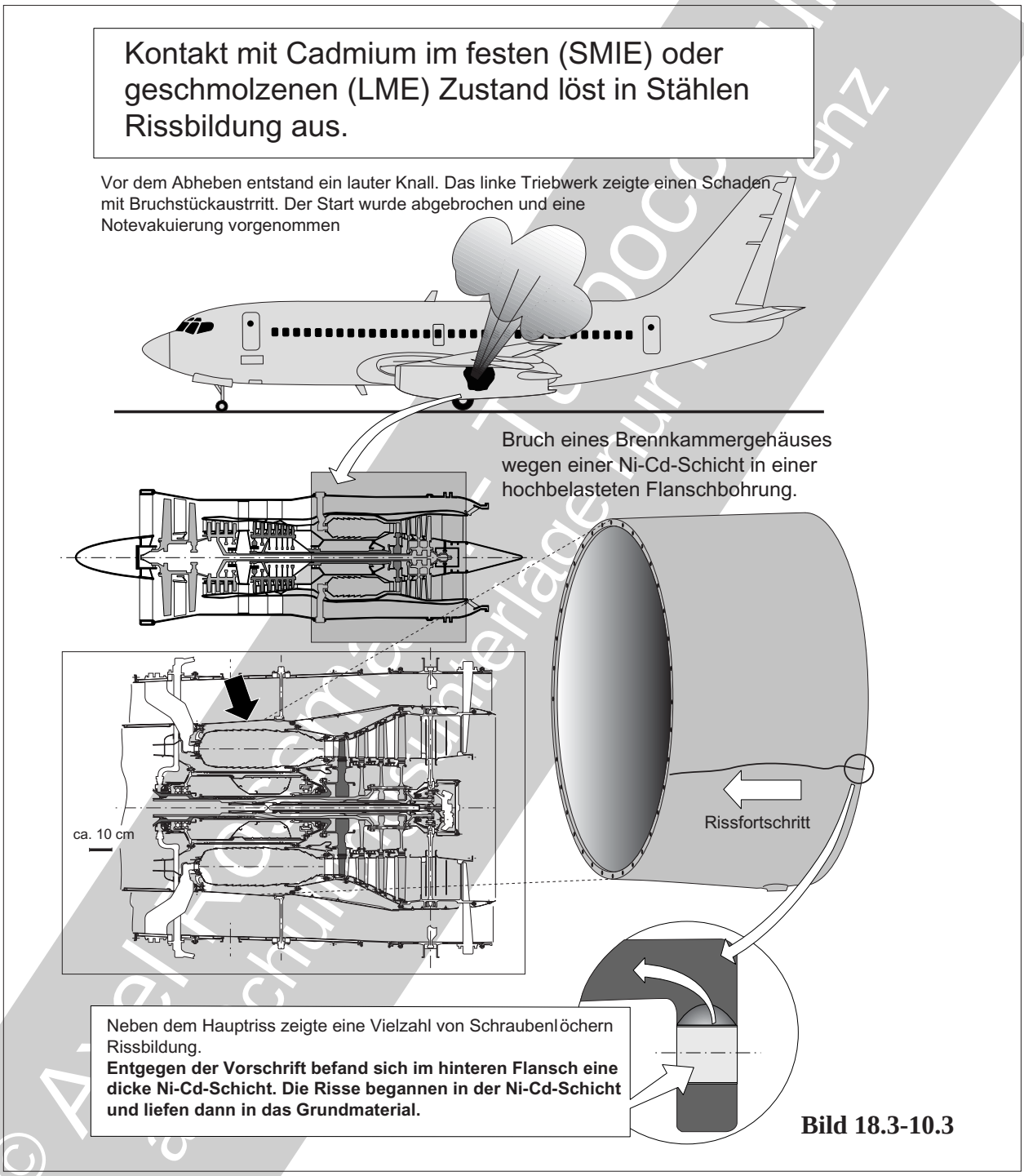

Kontakt mit Cadmium im festen (SMIE) oder geschmolzenen (LME) Zustand löst in Stählen Rissbildung aus.

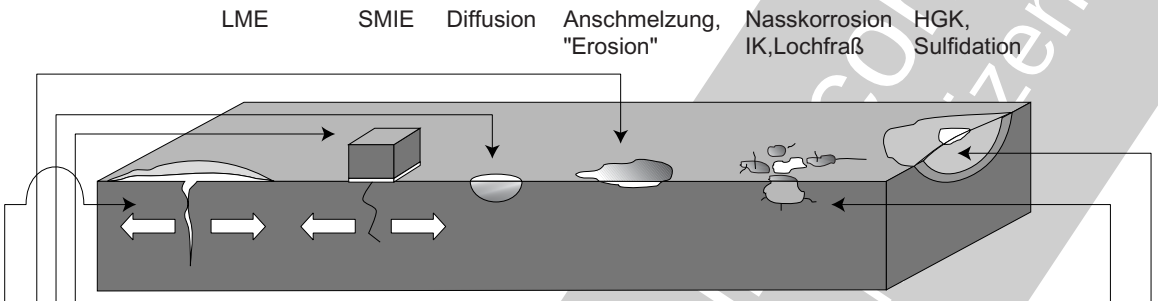
Bild 18.3-10.3

Ni-Cd-Schicht *befand. Diese Schicht wird zum Korrosionsschutz auf Gehäuse aus Stahl aufgebracht. Sie besteht aus einer Nickelschicht als Trennlage für die Cd-Schicht.*
Versagt diese Ni-Trennschicht oder wird Cd direkt auf dem Stahl abgeschieden, kommt es bei den hohen Temperaturen des Brennkammermantels zu LME.

Eine solche Situation lag nach Überholvorgängen in den ***Flanschbohrungen*** *vor. Rissbildung (Detail unten) und Rissfortschritt führten bis zum Aufreißen des Gehäuses. Heißgase und der Explosionsdruck führten zu Kraftstoffaustritt und Zündung. In den bekannten Fällen gelang trotzdem eine sichere Evakuierung des Flugzeugs.*

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Typische werkstoffspezifische Schädigungen im Zusammenhang mit fertigungsbedingten metallischen Oberflächenverunreinigungen.



Metallische Verunreinigung	gefährdeter Basiswerkstoff/ Legierung	Temperatur-bereich °C	zusätzlicher Einfluss, Bemerkung	Zugspannung MPa	Schadens-mechanismus	Literatur
Cd	Ti	>38 260		620	SMIE*) ähnl. SpRK	ASM Vol9 S. 464 (Beispiel)
	Fe (martens)	> 230	gekerbt, Spuren Cd, Sn,Ni	notw.	SMIE	ASM Vol11 S. 239 f.f, 243
Ag	Ti	> 200		notw.	SMIE	ASM Vol11 S. 243
	Ni	>600			Diffusion	Band 3
	Ni	>SP ca. 900		notw.	**) LME	Bild 18.3-10.1 und 18.3-10.3
	Ni	>500	Korr.med. z.B. Schwitzwasser		Korrosion/ Lochfraß	Band 1 Bild 5.6-2 und Kapitel 5.6.1
	Ni	>450	Schwefel		Sulfidation	Band 1 Bild 5.6.1.4.1-3 und Kapitel 5.6.1.4.2
Au	Ni	>200		notw.	SMIE	ASM Vol11 S. 243
In	Ni	RT		notw.	SMIE	ASM Vol11 S. 243
Cu Bronze	Fe (austen.)		martens. Stähle bei Austenittemp.	notw.	LME	ASM Vol11 S. 722
Pb	Ni	>SP	blanke Oberfl.		Anschmelzung LME	
	Ti	>SP	blanke Oberfl.		Anschmelzung	
		>SP	blanke Oberfl.		Anschmelzung LME, SMIE	
Bi	Ni	>SP	blanke Oberfl.		Anschmelzung LME	Band 1 Kap. 5.8 und und Bilder 18.3-13/-14
	Ti	>240 >SP	blanke Oberfl.		Anschmelzung, Temp abh. v. Leg. Wasserstoff-versprödung	

*) SMIE = Solid Metal Induced Embrittlement, **) LME = Liquid Metal Embrittlement

Bild 18.3-11

© Axel Rossmann - Turbocontrolt als Schulungsunterlage nur für Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Bild 18.3-11 *(Lit. 18.3-8): Diese Tabelle gibt denkbare* ***Metallkombinationen*** *des Triebwerksbaus an, bei denen es unter ungünstigen Umständen zur* ***Lötrissigkeit*** *(LME, Bild 18.3-8) 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 Triebwerkstypen als Korrosionsschutz für rostende Stähle verwendet (Beispiel 18.3-3, Bild 18.3-10.3 und Lit. 18.3-17). Auf korrosionsfeste Werkstoffe wurde Kadmium über Bäder oder als Aufschmierung verschleppt. In selteneren Fällen handelte es sich um eine beabsichtigte Beschichtung (Beispiel 12.2.2.3-4). 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 (Band 1, Bild 5.3-8). 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, Bild 18.3-10.2) 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 (Bild 18.3-10.2).*
Blei tritt mit Wismut in niedrig schmelzenden Legierungen zum Eingießen für das Spannen von Bauteilen auf. Hier besteht die Gefahr zurückgebliebener Reste, insbesondere in Hohlräumen gekühlter Turbinenschaufeln und als Aufschmierung (Bild 18.3-9 und Beispiel 18.3-2).

Kupfer, Messing und Bronzen: *sind als Auslöser von Lötrissigkeit in Stählen bekannt. Das Anschmelzen von Kupfer (z.B. Elektrode oder Beschichtung) erfolgt während des Schweißens (Lit 18.3-17).*
Kupfer wird auch als ***Lot für gebaute Verdichterleitschaufeln*** *und Gehäuse (Band 3, Bild 12.2.1.4-1) älterer Triebwerke 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.*

© Axel Bösenberg, Turbo Consult
Nur für Schulungsunterlage - Urheberrecht

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Oberflächenverunreinigungen wirken sich auch auf nachfolgende Fertigungsschritte und die Qualitätssicherung schädlich aus.

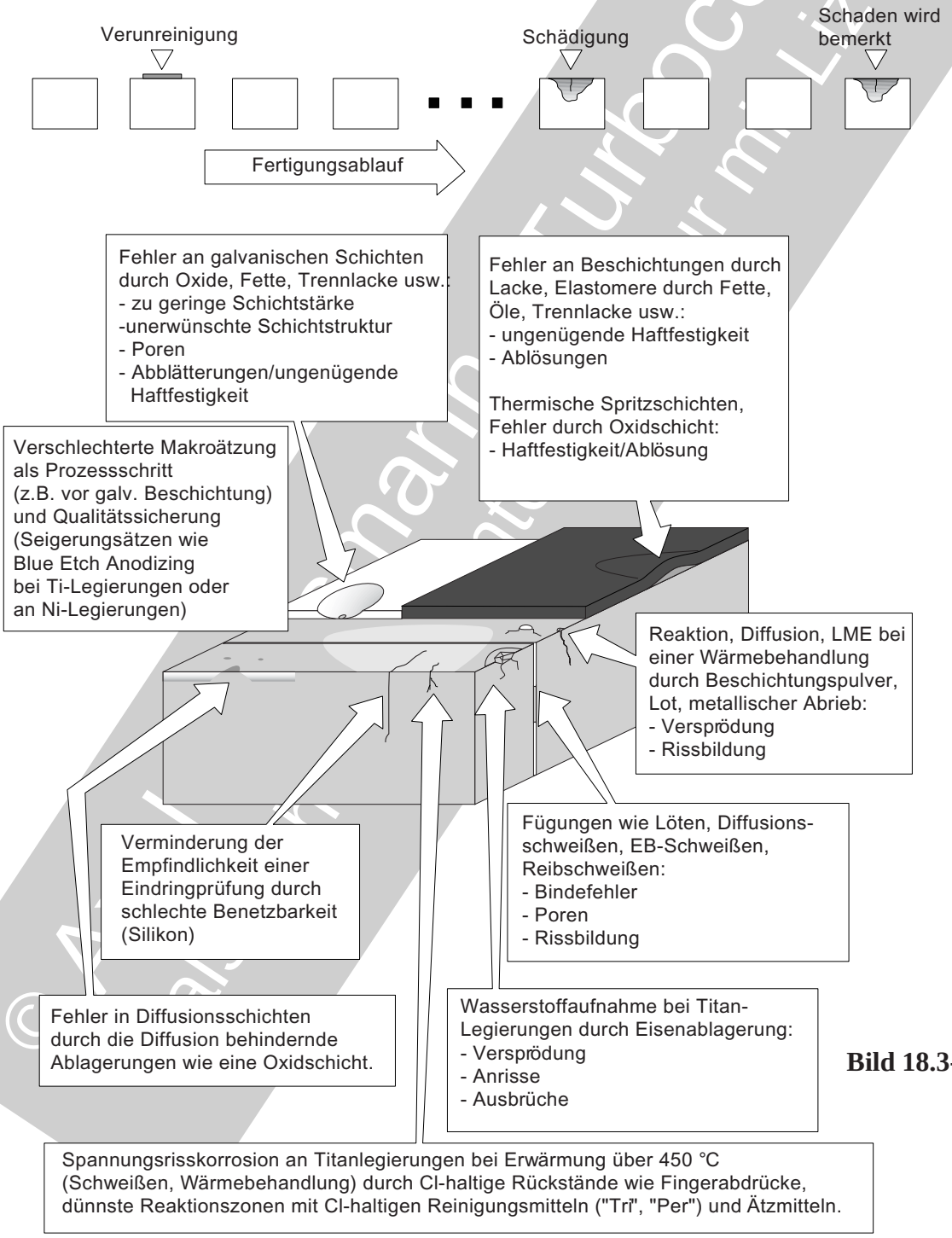


Bild 18.3-12

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Bild 18.3-12: Oberflächenverunreinigungen *wirken eher selten im Fertigungsprozess ihrer Entstehung schädigend. Eher tritt die* ***Schädigung erst in nachfolgenden Fertigungsschritten*** *auf und wird möglicherweise erst nach weiteren entdeckt (Skizze oben). Auch die Beeinträchtigung einer zerstörungsfreien Prüfung lässt sich als schädigend einstufen. Ein typisches Beispiel sind chlorhaltige Verunreinigungen auf Titanbauteilen. Erst später, bei Prozesstemperaturen oberhalb 450°C, kommt es zur Rissbildung. Es bedarf also durchaus einer Expertise, um nach dem Auffinden eines solchen Schadens aus dem Schadensbild und dem Fertigungsablauf auf Ursache und Zeitpunkt (Fertigungsschritt) rückzuschließen, in dem die Verunreinigung aufgebracht wurde. Im Bild sind typische verfahrensbezogene Probleme und Schäden im Zusammenhang mit Verunreinigungen aus anderen Fertigungsschritten oder dem vorhergehenden Handling (Bild 18.3-16 und Bild 14-4) und der Lagerung zusammengestellt. Man erkennt leicht, dass Zeitpunkt und Ort der Entstehung von Verunreinigungen oft nicht mit dem Schadensbild identisch sind.*

Die ***Haftfestigkeit von Beschichtungen*** *wie*

- *galvanisch abgeschieden,*
- *als Lackierung aufgebracht*
- *thermisch gespritzt,*
- *geklebt,*
- *gesintert,*
- *aufgedampft,*

ist besonders empfindlich gegenüber Verunreinigungen der Haftfläche. Eine ungenügende Haftfestigkeit kann sich sofort mit ***Abblättern*** *oder* ***Blasenbildung*** *zeigen. Sie kann aber auch erst nach weiteren Fertigungsschritten zu erkennen sein. Ist eine Trennung vom Grundmaterial noch nicht erfolgt, ist der zerstörungsfreie Nachweis einer schlechten Haftfestigkeit meist nicht möglich (Bild 18.8-5 , Bild 18.8-6 und Band 3, Bild 12.2.1.6-10,). Solche Verunreinigungen dürften in erster Linie aus Unachtsamkeit bei Handling, Transport und Lagerung zurückzuführen sein. Sie können über die Bildung von Oxidschichten bei ausreichenden Prozesstemperaturen (Schweißen, Wärmebehandlung) und als Beeinträchtigung der Benetzbarkeit den Beschichtungsvorgang stören.*

Struktur von Beschichtungen: *Ein Beispiel ist die Beeinträchtigung von Diffusionsschichten. Keramische und metallische Rückstände oder Oxide können die Diffusion örtlich behindern. Das beeinflusst die Zusammensetzung und Dicke der Schicht und beeinträchtigt so die Schutzwirkung.*

Festigkeit und Zähigkeit des Grundwerkstoffs: *Spritzer von Metallschmelzen entstehen bei Schweißverfahren (EB, Reibschweißen), heiße Partikel beim Schleifen, Trennen und der Hochgeschwindigkeitszerspanung. Sie wirken auf die Bauteiloberfläche schädigend (Bild 18.6-4). Sind Spritzer unkontrolliert entfernt worden, ist ein nachträglicher zerstörungsfreier Nachweis einer Schädigung (Bild 12.2.2.6-5) deutlich erschwert.*
Wirken Verunreinigungen als Metallschmelzen (LME, SMIE) ist bei einer Reaktion mit dem Grundwerkstoff mit erheblichen Festigkeitseinbußen und Versprödung zu rechnen (Bild 18.3-10.1 und Bild 18.3-10.2).
Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen unter Einwirkung chlorhaltiger Verunreinigungen (Band 3, Bild 12.2.1.7-8).
Verstärkte Wasserstoffaufnahme und Versprödung (Wasserstoffversprödung) im Bereich von Verunreinigungen entsteht meist bei galvanischen Prozessen und in Ätzbädern. Ein Beispiel ist die Wirkung von eisenhaltigen Ablagerungen bei Ätzprozessen von Titanlegierungen (Band 3, Bild 12.2.1.7-9). Solche Ablagerungen können Schleifpartikel und Rost aus Eisenabrieb (Drahtbürsten, Stahlwolle, Kugelstrahlen) sein. Auch Aufschmierungen von Vorrichtungen oder Werkzeugen sind suspekt. Das

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Eisen kann Schweißungen an Titanlegierungen verspröden.

Nachweisempfindlichkeit von zerstörungsfreien Prüfungen: *Typisches Beispiel ist eine schlechte Benetzbarkeit durch Verunreinigungen wie Silikonverbindungen (z.B. aus Schneidmitteln, Handcremen, Trennmitteln) welche an der Wirksamkeit von Eindringprüfungen (Bild 17.3.1-2 und Bild 17.3.1-3) zweifeln lässt.*
Auch die Erkennbarkeit von Seigerungen bei Ätzprüfungen wie ***Blue Etch Anodizing*** *(BEA, Bild 11.2-16) von* ***Titanlegierungen*** *oder Seigerungsätzungen an Ni-Basis Schmiedelegierungen (Bild 11.3-12) kann verständlicherweise von Verunreinigungen verschlechtert werden.*

Festigkeit von Lötungen und Schweißungen: *Fehler wie Porenbildung durch Abgasen von Verunreinigungen im Schweißspalt (EB-Schweißen, Band 3, Bild 12.2.1.3-25) und flächige Bindefehler sind beispielhaft zu nennen.*
Besonders empfindlich reagieren Diffusionsschweißungen auf kleinste Verunreinigungen die einen metallischen Kontakt der Schweißflächen und damit die Diffusion verhindern (Band 3, Bild 12.2.1.3.5-1 und 12.2.1.3.5-2).
Bei Reibschweißungen besteht der Verdacht, dass Bindefehler von Veränderungen der Reibbedingungen von Verunreinigungen mit Eigenschaften eines Hochtemperaturschmiermittels (z.B. hexagonales Bornitrid oder Grafit) ausgelöst werden.

Bild 18.3-13: *Schädigungen können in Ausnahmefällen auch in Triebwerke gelangen (Bild 18.3-16). Dafür gibt es unterschiedliche Gründe.*
- Versagen der Prüfverfahren
- Verunreinigungen bei Transport und Handling des geprüften Fertigteils.
- Die eigentliche Schädigung entsteht erst unter Betriebseinflüssen.
Bereits in der Fertigung eingetretene Schädigungen können sowohl die Festigkeit als auch die Funktion eines Bauteils beeinträchtigen.
Rissbildung, *z.B. als* ***Lötrissigkeit,*** *bedeutet die unmittelbare Gefahr eines katastrophalen Versagens (Skizze rechts oben).*
Versprödung *von Titanbauteilen beim Ätzen mit der Gefahr der* ***Schwingrissbildung*** *an betriebsbedingten Kerben (Erosion). Auslöser ist Rost (Skizze oben links).*
Bildung von ***Silbersulfid*** *an versilberten Schrauben und Muttern durch Kontakt mit einem schwefelhaltigen Medium (z.B. Schneidöl). Es beeinflusst das tribologische Verhalten mit einem erhöhten Reibbeiwert (Skizze rechts Mitte).*

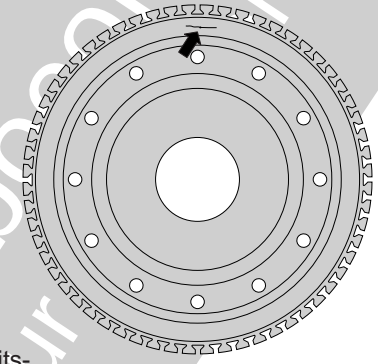
Folgende Betrachtungen beschränken sich auf Verunreinigungen deren schädigende Wirkung erst unter Betriebseinflüssen entsteht (Rahmen unten). Dabei ist die ***Betriebstemperatur*** *für eine schädigende Wirkung von Verunreinigungen entscheidend.*
Rissbildung als Folge einer Reaktion zwischen Metallen (LME und SMIE, Bild 18.3-10.1 -10.2 und Bild 18.3-11) kann auch im Betrieb ausgelöst werden. Dies ist besonders bei Aufschmierungen und festhaftenden Partikeln zu befürchten, wenn die materialschlüssige Verbindung eine schützende Oxid-Zwischenschicht verhindert.
Verstärkte Oxidation als Folge von Ätzmittelresten (Bild 18.3-9) bewirkt eine Wärmeisolierwirkung und Verengung in Kühlluftkanälen. Diese ungünstige Kombination lässt die Bauteiltemperatur schnell lebensdauerverkürzend ansteigen. Ähnlich wirken Verstopfungen mit

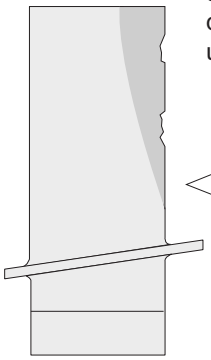
© Axel Bossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Das Betriebsverhalten der Bauteile wird von Oberflächenverunreinigungen schadensursächlich beeinflusst.

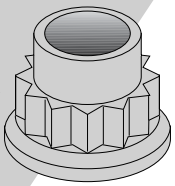
Rissbildung mit Bruchgefahr an hochbeanspruchten Bauteilen wie Rotorscheiben,Turbinenschaufeln und Spannbolzen durch diffusionsbedingte Gefügeveränderungen und LME.





Versprödung von Titanlegierungen durch Wasserstoffaufnahme im Bereich von Ablagerungen (z.B. Rost) (Hydridbildung) kann zu Ausbrüchen und so zu unzulässigem Schwingfestigkeitsabfall führen.

Aufnahme von Schwefel durch die Silberbeschichtung (Schwarzverfärbung) kann den Reibbeiwert verändern und die sichere Montage erschweren.

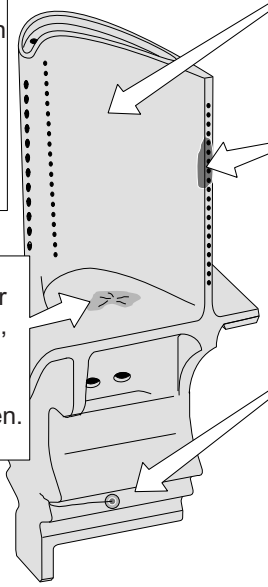


Beispiele für Schädigungen die an Heißteilen durch fertigungsbedingte Verunreinigungen entstehen können.

Schäden in den Kühlluftkanälen durch oxidationsfördernde Verunreinigungen:
- Oxidation,
- Korngrenzenangriff
- Sulfidation

Verstopfung durch Partikel aus der Fertigung mit:
- Oxidation
- Rissbildung,
- Bruch

Oxidation im Bereich austretender Flüssigkeit



Rissbildung und/oder verstärkte Oxidation , insbesondere im Bereich schwefelhaltiger Ablagerungen.

Rissbildung und Bruch im Bereich schlechter Festigkeitswerte und/oder einer Versprödung infolge von Reaktionen mit Fremdmetallen (LME, SMIE).

Bild 18-13

Partikeln des Fertigungsprozesses. Unterstützen diese Verunreinigungen einen Korngrenzenangriff (Band 3, Bild 12.2.1.7-10) wird die Festigkeit weiter abgesenkt.

Ähnlich können Ätz- und Flussmittelreste (Band 3, Bild 12.2.1.4-17) wirken, die bei abwechselnder Schwitzwasserbildung und Erwärmung zu Korrosionsschäden führen (Bild 18.3-15).

Bild 18.3-14 *(Lit. 18.3-6): Dieser Flugunfall war auf den* ***Bruch mehrerer Turbinenschaufeln*** *der 1. Hochdruckstufe zurückzuführen (Skizze unten rechts). Alle gebrochenen Schaufeln stammten aus dem gleichen Wärmebehandlungslos das schon früheren ähnlichen Schäden zugeordnet wurde. Im Grundmaterial der Schaufeln konnten 1,4-1,9 ppm des Elements* ***Wismut*** *nachgewiesen werden. Diese minimalen Wismutspuren wurden als Ursache für die verkürzte Lebensdauer der Schaufeln verantwortlich gemacht.*
Die große Frage ist, wie das Wismut in die Turbinenschaufeln gelangte. Drei Möglichkeiten bieten sich an (Rahmen unten):

- ***Aufschmierungen*** *einer niedrig schmelzenden Eingussmasse die zur Halterung der Schaufel bei der Bearbeitung diente (Bild 18.3-10.1).*

- ***Verbliebene Eingussmasse*** *auf und/oder in der Schaufel.(Bild 18.3-7).*

- ***Aufgedampfte Eingussmasse*** *bei einem Fertigungsprozess (Wärmebehandlung im Vakuum, Diffusionsbeschichtung, Hochtemperaturlötung).*

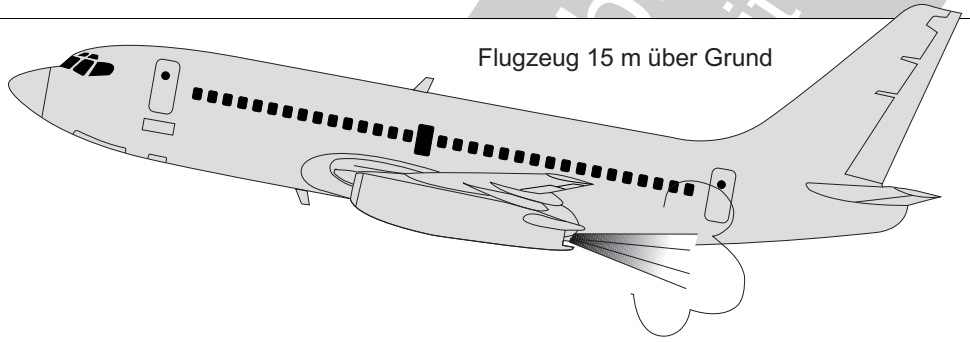
Leider geht aus der vorliegenden Literatur nicht hervor, ob das Bauteil überall Wismutspuren aufweist oder ob sich diese nur auf den Bruchbereich konzentrieren. Auch ist nicht klar, ob es sich um eine gleichmäßige Verteilung handelt, oder eine Konzentration an Gefügemerkmalen wie den Korngrenzen vorliegt.
Eine auf den Schadensbereich begrenzte Werkstoffverunreinigung würde eher auf Aufschmierungen oder verbliebene Reste in den Schaufelkühlkanälen hinweisen. Gegen diese Art der Wismutbeaufschlagung spricht, dass sich die betroffenen Teile anscheinend auf ein Wärmebehandlungslos eingrenzen ließen. Das ist kaum mit zufällig verbliebenen Resten und Aufschmierungen plausibel zu erklären.

Ist die Schaufel großflächig verunreinigt, würde dies eher für Diffusion im Zusammenhang mit einer Aufdampfung sprechen. Ein solcher Vorgang wäre z.B. in einem Vakuum- oder Schutzgasofen denkbar, in dem Wismutverunreinigungen verdampften und sich auf den Bauteilen niederschlugen. Auf diese Schadensentstehung weist die Tatsache hin, dass offenbar nur ein Wärmebehandlungslos betroffen ist.

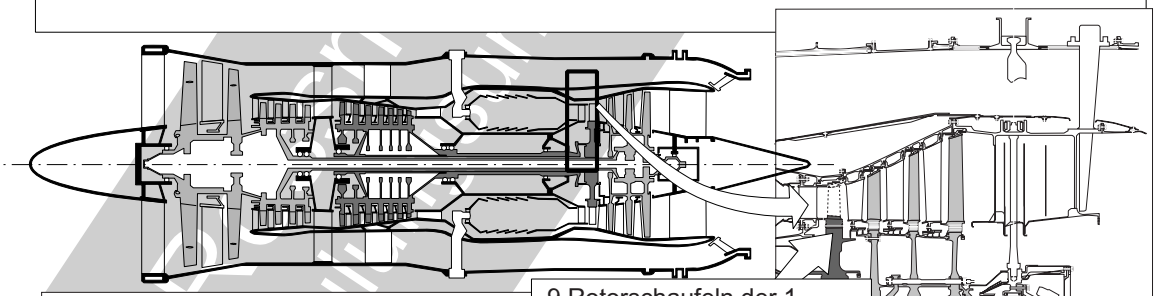
© A. Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

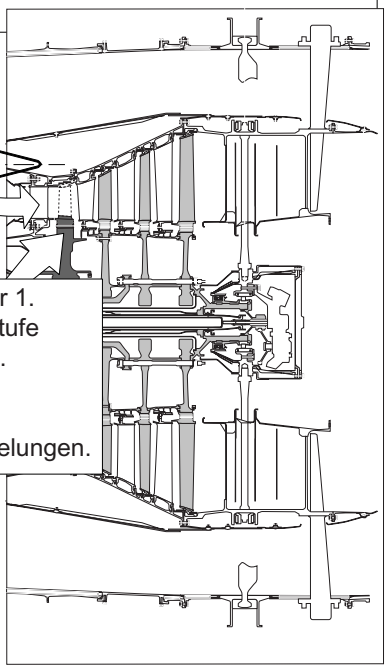
Turbinenschaufelbrüche die sich einem Wärmebehandlungslos zuordnen lassen sind ein starkes Indiz für ein Fertigungsproblem. In diesem Fall besteht offenbar ein Zusammenhang mit ungewöhnlichen Spuren des Elements Wismut im Schaufelwerkstoff.



Die Startrotation und das Abheben verliefen normal. An dem Punkt, bei dem das Fahrgestell gerade eingezogen ist, hörte die Besatzung eine laute Explosion und das Flugzeug schwenkte nach rechts. Das linke Triebwerk war ausgefallen. Wie sich später herausstellte war eine Laufschaufel der Hochdruckturbine gebrochen. Das Flugzeug schlug auf der Abflugbahn hart auf.



9 Rotorschaufeln der 1. Hochdruckturbinenstufe primär abgebrochen. Dann umfangreiche Schäden an allen folgenden Beschaufelungen.



Eine potenzielle Möglichkeit für die Verunreinigung des Schaufelwerkstoffs mit Wismut bei einer Wärmebehandlung:

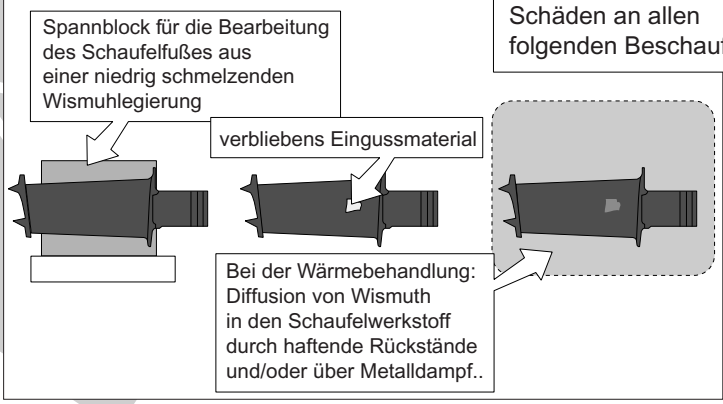


Bild 18.3-14

Mehrere Abstürze wurden auf den Bruch flexibler Leitungsverbindungen als Folge eines fertigungsbedingten Ätzangriffs zurückgeführt.

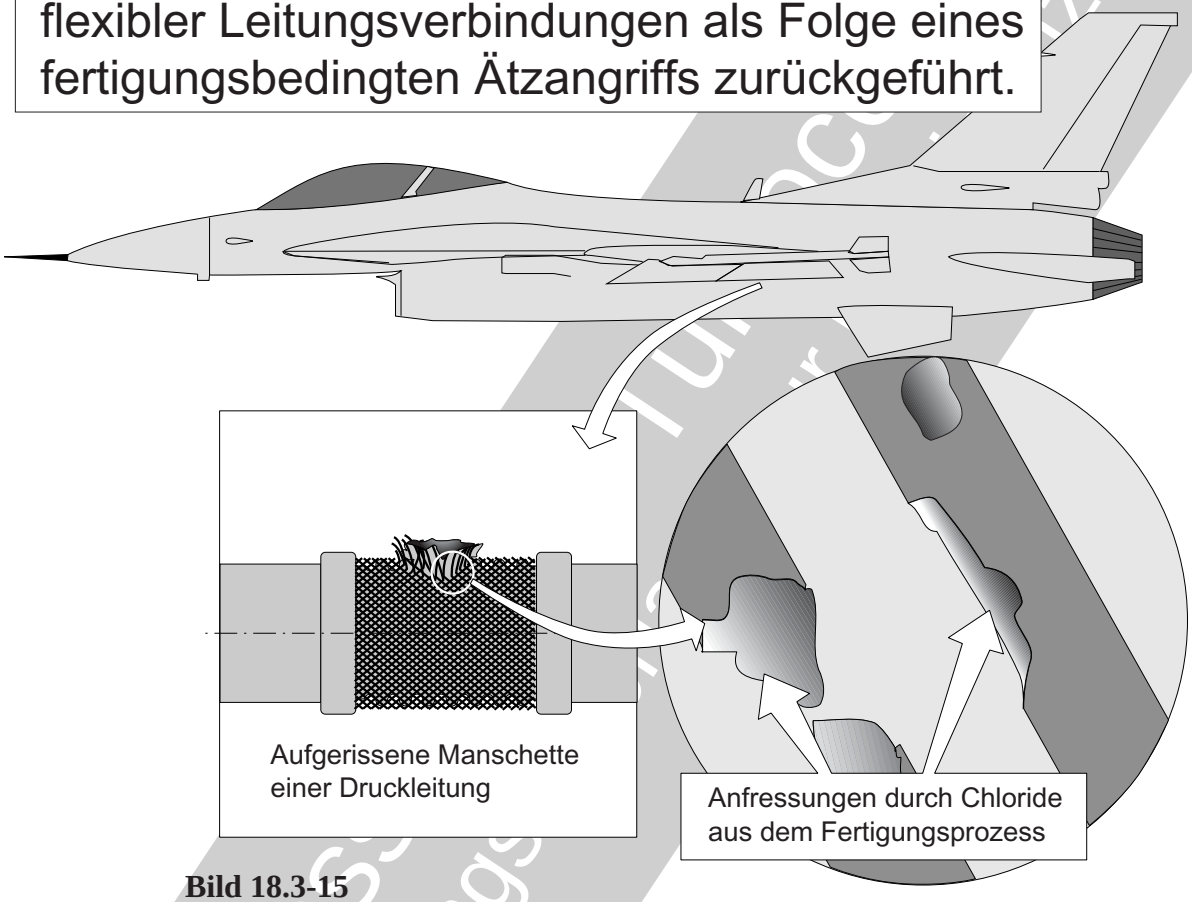


Bild 18.3-15

Bild 18.3-15 *(Lit 18.3-13): In der Literatur zu diesem Schadensfall lautet es:*
„The first two losses (of modern military fighters) occurred 1997 and seem to have been caused by the rupture of a flexible hose. 'The hoses had been ***contaminated by chlorine during the manufacturing process****, and this weakened the braids in the hoses once the engine entered service'."*
Details wurden vom Autor auf Grund seiner Erfahrung dargestellt. Zu vermuten ist, dass die chlorhaltigen Rückstände mit ***Schwitzwasser ein Korrosionsmedium*** *bildeten (siehe auch Bild 18.3-17) welches wahrscheinlich besonders bei* ***Betriebstemperaturen*** *sehr konzentriert auf die rostfreien Drähte (meist vom Typ CrNi18 9) der abstützenden Manschette einwirkte. Der Korrosionsangriff dürfte unter dem Mikroskop etwa so wie im Detail ausgesehen haben.*

Bild 18.3-16: *Zwei Beispiele für Spannungsrisskorrosion im Zusammenhang mit Medien aus der Fertigung. Im oben skizzierten Fall lösten* ***chlorhaltige Rückstände eines Entfettungsbades*** *bei einer nachfolgenden Wärmebe-*

Spannungsrisskorrosion in der Fertigung, ausgelöst von Badrückständen und Handschweiß.

Spannungsrisskorrosion im Bereich der Schweißung einer Welle aus einer hochfesten Ti-Legierung: Nach einer Entfettung in einem Cl-haltigen Bad ohne Inhibitor verblieb eine Cl-haltige dünne Reaktionsschicht und führte während einer folgenden Wärmebehandlung zur Rissbildung.

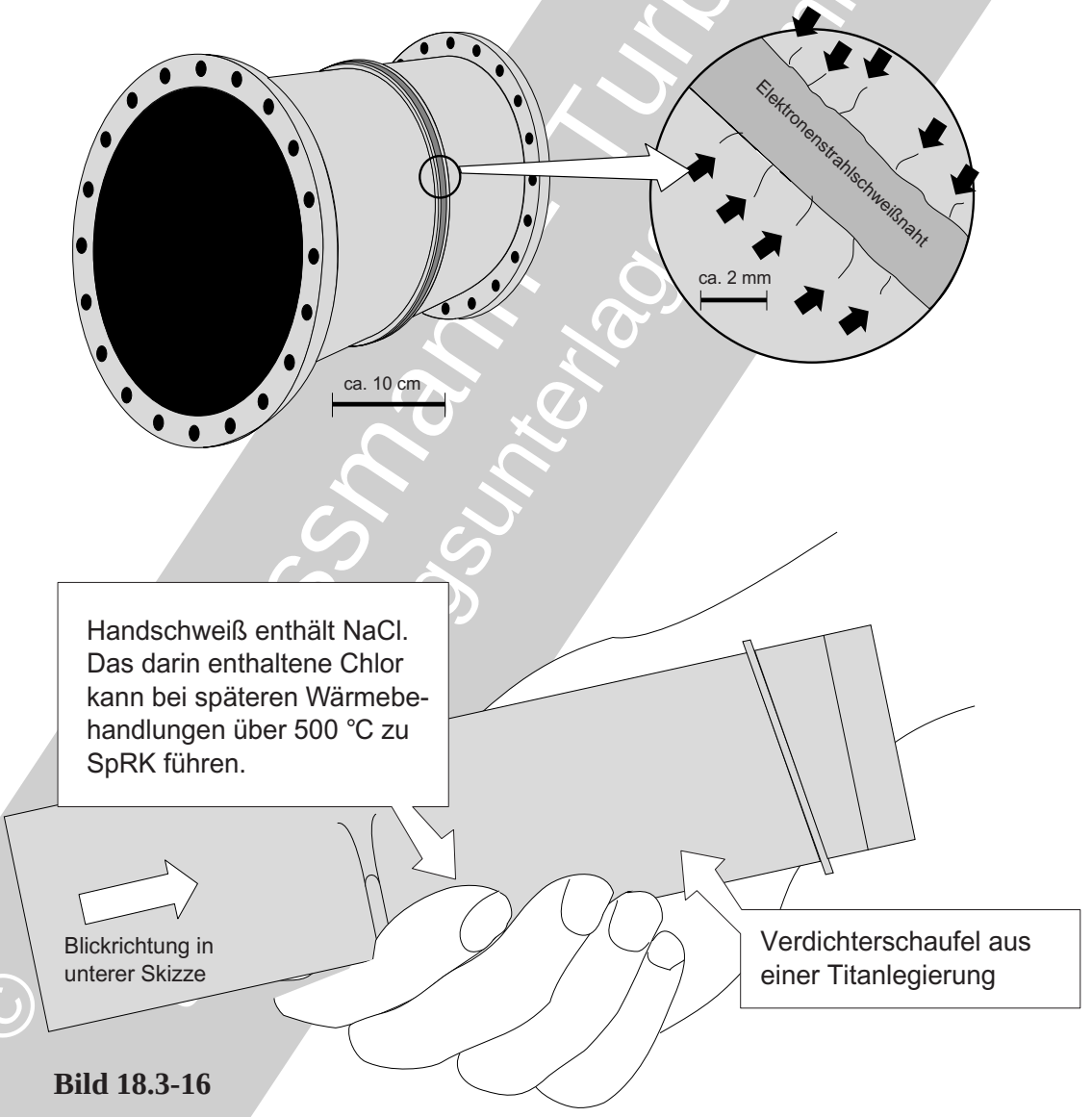


Bild 18.3-16

handlung und hohen Zugspannungen (Schweißspannungen) ***Spannungsrisskorrosion*** *aus.*
Die untere Skizze zeigt, wie es im Betrieb zum Schaufelbruch infolge Fortschritt eines Spannungskorrosionsrisses kam. ***Eingetrockneter Handschweiß*** *in einem Bereich hoher Schmiede-Zugeigenspannungen löste die Risse aus. Selbst diese geringe Menge Chlor im Kochsalzrückstand reichte zur Rissbildung aus.*

© Wissmann-Turboconsult Ergänzungsunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Nicht ausreiched entferntes Flussmittel führt zu gefährlichen Anfressungen.

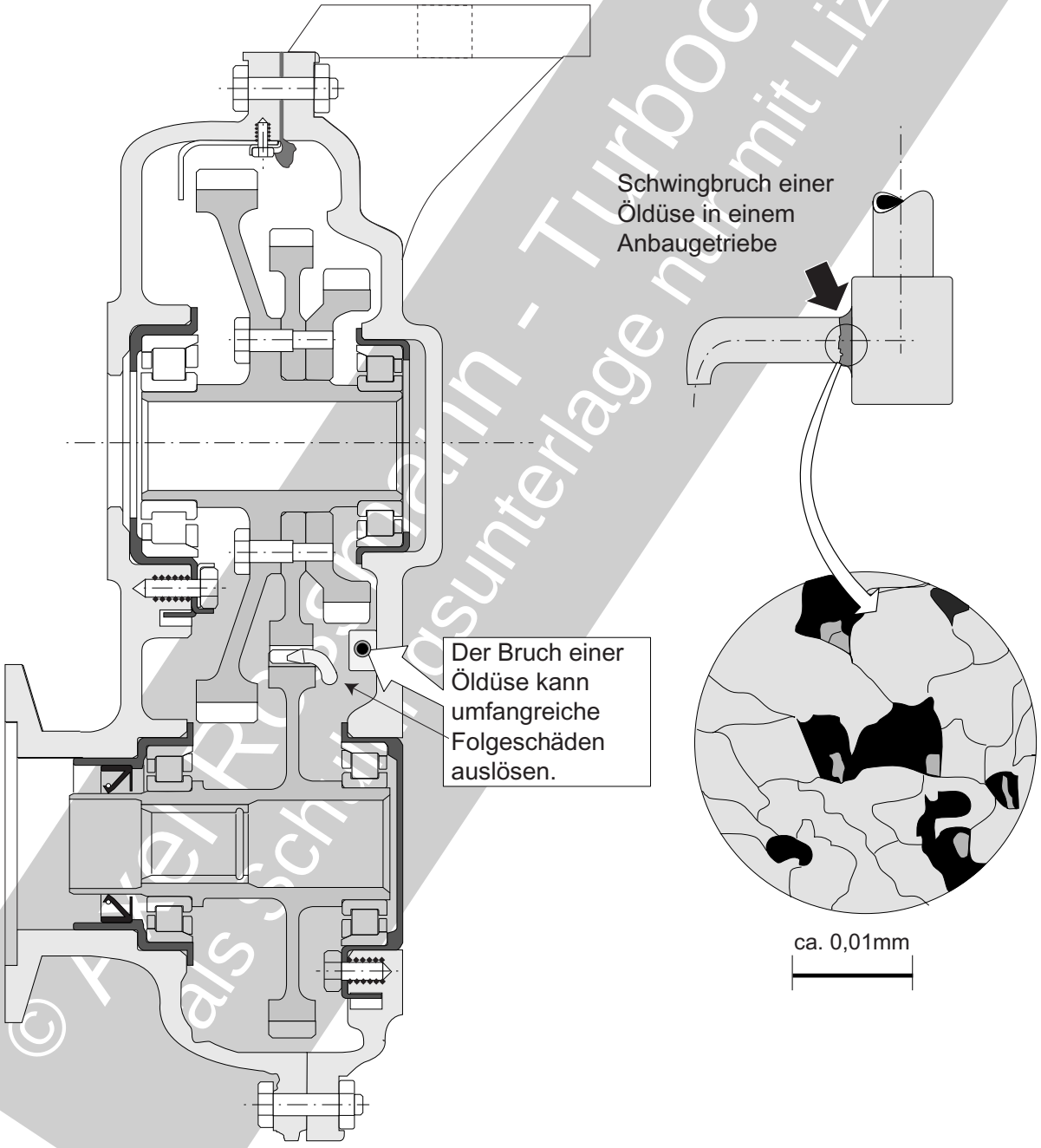


Bild 18.3-17

© Axel Rossmann - Turbocontult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Bild 18.3-17: Rückstände *ätzender bzw. korrrosiver Medien aus der Fertigung wie* ***Ätzbäder und Flussmittel bzw. Lötpasten*** *können während der späteren* ***Lagerung*** *und/oder unter* ***Betriebsbedingungen*** *schädigend wirken (Bild 18.3-14).*

Hartlötungen *mit Loten auf Cu- oder Silberbasis werden an* ***Ölleitungen*** *aus Stählen vom 14 8-Typ und in manchen älteren Triebwerkstypen an gebauten* ***Verdichterleitschaufeln*** *aus 13%igen Cr-Stählen angewendet (Band 3, Bild 12.2.1.4-1).*

Im dargestellten Fall kam es zum ***Schwingbruch*** *einer Öldüse (Skizze rechts) in einem Anbaugetriebe (Skizze links). Die abgebrochene Düse gelangte zwischen die Zahnräder und löste einen größeren Folgeschaden aus. Der Schwingbruch begann am Übergang der Lötung. Hier lag* ***interkristalline Korrosion*** *(Detail) vor, die auf einen Angriff von* ***Flussmittelresten*** *zurückgeführt wurde.*

Ein solcher Korrosionsangriff ist denkbar, wenn aus den eingetrockneten Verunreinigungen mit ***Schwitzwasser*** *oder erhöhter* ***Luftfeuchtigkeit*** *ein wässriger* ***Elektrolyt*** *entsteht (Bild 18.3-13). Begünstigend für den Angriff dürfte die Elementbildung zwischen dem Lot und dem Grundwerkstoff wirken. Zusätzlich kann sich bei der Lötung in manchen Werkstoffen ein ungünstiger Gefügezustand (Sensibilisierung) ausbilden, der den Korngrenzenangriff (****interkristalline Korrosion = IK****) begünstigt.*

Bild 18.3-18: *Gegen bedenkliche Oberflächenverunreinigungen an Bauteilen lassen sich* ***präventive Maßnahmen im Ablauf des Fertigungsprozesses*** *treffen, deren Wirksamkeit nicht zuletzt in einer Kombination liegt. Solche Maßnahmen wurden im Folgenden einzelnen Schritten eines üblichen Fertigungsablaufs zugeordnet.*

„1“*: Von besonderer Bedeutung ist, dass ein effektives „****Housekeeping****“ gelebt wird. Unter „Housekeeping“ versteht man ähnlich wie im eigenen Haushalt* ***Sauberkeit und Ordnung mit der notwendigen Disziplin****. Es bedarf der* ***Sensibilisierung und Einsicht aller Mitarbeiter****. Dazu gehört, dass allen Betroffenen* ***plausible Erklärungen für diese Notwendigkeit*** *gegeben werden. Eine solche Einstellung ist von geeigneten* ***Schulungen, auch vor Ort mit einprägsamen Beispielen,*** *zu erwarten.*

Um das erwünschte „Housekeeping“ durchzusetzen ist, ähnlich wie die erfolgreiche Kampagne in amerikanischen Großstädten (New York) - ***„Null Toleranz“*** *gegenüber Verunreinigungen - erfolgversprechend. Dabei geht man von der Erfahrung aus, dass sich um eine stillschweigend tolerierte weggeworfene Kippe nach kurzer Zeit ein Müllhaufen ansammelt. Natürlich muss als Voraussetzung eine* ***geeignete „Infrastruktur“*** *gewährleistet sein. Dazu gehören ausreichende und geeignete Abfallbehälter, nicht missbräuchlich nutzbare Transportbehälter, das richtige Handling und die richtige Lagerung der Bauteile.*

„2“*:Bereits die* ***Anlieferung*** *der Teile zu den einzelnen Prozessschritten ist von entscheidender Bedeutung, um* ***Verunreinigungen rechtzeitig zu erkennen*** *(Bild 18.3-19). Dies hat mehrere Gründe:*

Sind die Beschäftigten ausreichend erfahren, besteht eine gute Chance, dass sie ***ungewöhnliche Veränderungen an den Bauteilen erkennen****. Dabei kann ihr besonderes* ***Eigeninteresse***

Fortsetzung auf Seite 18.3-39

© Axel Rossmann Turbokonsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Präventive Maßnahmen gegen und Vorgehen bzw. Abhilfen bei Verunreinigungen.

Wichtige Schritte und Merksätze:

1. "Housekeeping" durch Motivation und Sensibilisierung der Mitarbeiter. Einige Merksätze:
   - Wehret den Anfängen: "Null Toleranz" gegenüber "wilder" Abfallentsorgung.
   - Geeignete Transportbehälter
   - Saubere Transportbehälter (keine Späne oder Reste von Hilfsstoffen wie Schneidöle und Kühlmittel).
   - Geeignete Lagerungsorte (z.B. keine Schwitzwasserbildung, keine aggressiven Dämpfe).
   - Information und Belehrung der Mitarbeiter, mit plausibler Erklärung möglicher Risiken und Schäden.

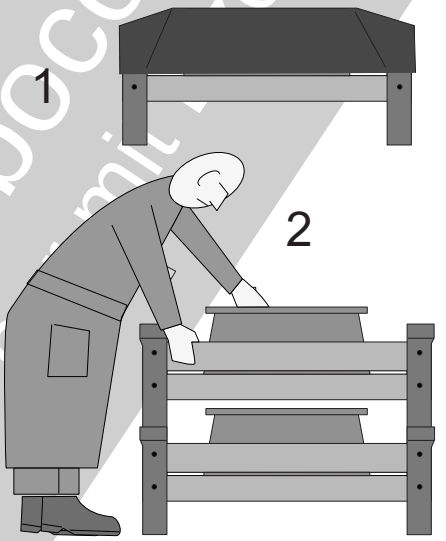
2. Kontrolle der Anlieferung vor jedem relevanten Prozessschritt auf potenziell gefährliche Verunreinigungen. Insbesondere vor Prozessschritten welche
   - Verunreinigungen gefährlich beeinflussen (z.B. Wärmebehandlung)
   - Zu Fertigungsschäden und Ausschuss führen (z.B. Beschichtungsverfahren)

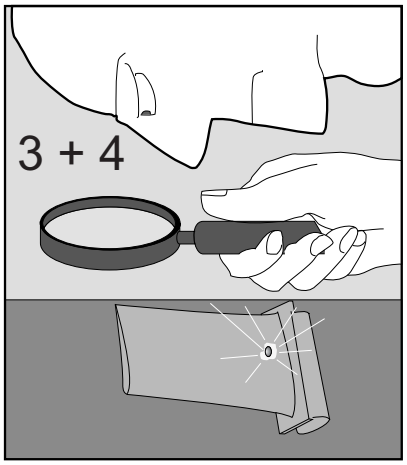
3. Identifizierung der Verunreinigungen als Voraussetzung zur Abschätzung des Schädigungspotenzials.
   - Probenentnahme
   - Analysen am Bauteil
   - Abdruckverfahren für mikroskopische Untersuchung
   - Röntgen, Thermografie, chemische Analysen

4. Überwachung des Fertigungsprozesses und Beobachtung der Bauteile:
   - Reinheit der Hilfsmedien (z.B. Strahlgut, Bäder)
   - Aussehen der Bauteile (z.B. Flecken)

5. Prüfung ob bereits eine Schädigung eingetreten ist: In der Organisation benannten Spezialisten zu Rate ziehen.

6. Geeignete, spezifikationskonforme Reinigungsverfahren einsetzen. Diese müssen gegebenenfalls von Spezialisten erarbeitet und von den zuständigen Stellen (z.B. Lizenzgeber, Dienststellen) zugelassen werden.





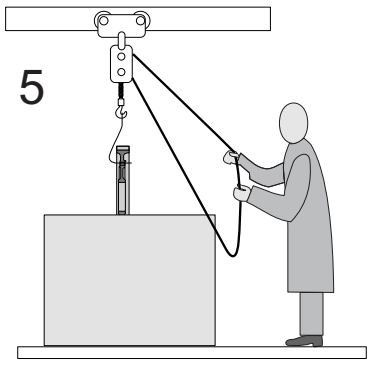


Bild 18.3-18

© Axel Rossmann - Turbocon Consult
als Schulungsunterlage mit Referenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Fortsetzung von Seite 18.3-37

vorausgesetzt werden. Gehen doch Probleme und Ausschuss sonst in den „eigenen“ Fertigungsprozess mit unangenehmen Konsequenzen über. Werden Verunreinigungen ***rechtzeitig erkannt,*** *lässt sich das* ***Risiko hoher Ausschusskosten minimieren****. Zusätzlich besteht die Wahrscheinlichkeit, die* ***Ursache schnell einzugrenzen und gezielte Gegenmaßnahmen einzuleiten****.*

„3“*: Um Risiken möglicherweise betroffener oder gar ausgelieferter Teile abschätzen zu können ist es notwendig, neben Feststellung einer bereits eingetretenen Schädigung, die* ***Verunreinigung zu identifizieren****. Dazu gibt es spezifische* ***Laboruntersuchungen*** *zu denen insbesondere die Mikroanalyse im REM (engl. SEM, Bild 17.3.2-7) zählt. Die Untersuchungen werden, insbesondere bei teuren Bauteilen, nach Möglichkeit zerstörungsfrei durchgeführt. Die* ***Identifikation*** *eines gegebenenfalls bereits wirksam gewordenen* ***Schadensmechanismus*** *und des* ***Schadensausmaßes*** *ist eine Voraussetzung für die* ***Erarbeitung und Zulassung eventueller Nacharbeit und Reparaturen*** *(Bild 17.1-11).*

„4“*: Von entscheidender Bedeutung ist die* ***Beobachtung des Fertigungsprozesses****, d.h. der Bauteile und der Hilfsmittel von* ***erfahrenem und motiviertem Personal*** *(Bild 17.1-5).* ***Ungewöhnliche Veränderungen*** *an Bauteilen (z.B. Farbe, Glanz, Flecken) und/oder ein* ***ungewöhnliches Verhalten*** *von Bädern (z.B. Blasenbildung, Verfärbung, Wirksamkeit) und Maschinen (z.B. Geräuschentstehung, Verschleiß, Spanbildung) kann wichtige Hinweise geben.*

„5“*: Werden Verunreinigungen und/oder ungewöhnliche* ***Oberflächenveränderungen*** *festgestellt, ist zur* ***Identifizierung*** *einer Schädigung, gegebenenfalls für eine Risikoabschätzung und eine mögliche Nacharbeit, die Untersuchung durch Spezialisten notwendig. Deren* ***Ansprechpartner bzw. die Informationskette*** *dorthin sollte festgelegt und bekannt sein. Das gilt besonders für Fertigteile, die mit einer Nacharbeit zur Auslieferung gebracht werden sollen.*

„6“*: Um Verunreinigungen zu vermeiden sind gegebenenfalls* ***Reinigungsverfahren*** *an geeigneter Stelle im Fertigungsablauf einzuführen. Solche Verfahren müssen* ***von den zuständigen Spezialisten ausgewählt, erprobt und zugelassen*** *werden. Dies ist unbedingt erforderlich, um unerwartete neue schadensrelevante Effekte (z.B . Ätzschädigung oder Schädigung von Beschichtungen) auszuschließen.*

Bild 18.3-18.1

Bild 18.3-18.1*: Selbst scheinbar harmlose Medien die für den Menschen gut verträglich sind können als Verunreinigung in der Fertigung zu Problemen führen. Dabei ist mit* ***Anfressungern*** *bis zur* ***Rissbildung*** *zu rechnen. Die Schädigung kann sich verstärken wenn die Konzentration durch* ***Eintrocknen erhöht wird.*** *Auch* ***erhöhte Temperatur*** *kann eine Schädigung unterstützen. Rissbildung wird besonders von hohen Zugspannungen (Eigenspannungen) in der benetzten Oberfläche unterstützt.*
*Als bedenklich können säurehaltige Getränke gelten. Dazu zählen ‘****Colagetränke****’ mit* ***Phosphorsäure*** *(Schädigung von Titanlegierungen durch Rissbildung, Band 1 Bild5.6.3.1.1-7) und* ***Fruchtgetränke*** *mit hohem* ***Fruchtsäuregehalt*** *(Schädigung von Stählen durch Lochfraß).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Sendungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Beispiele für die Detektierbarkeit von Verunreinigungen in Hohlkörpern.

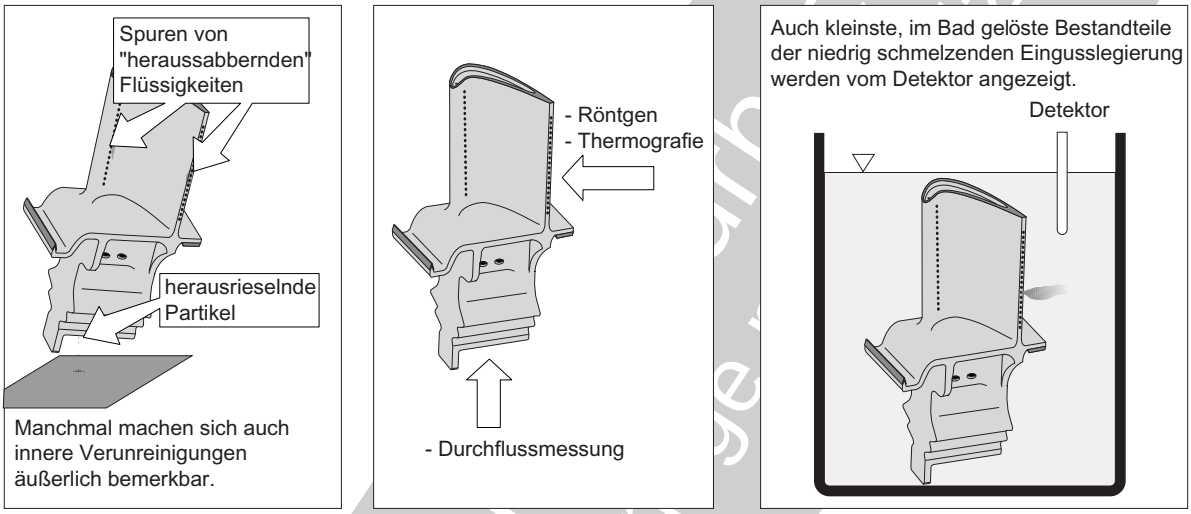


Bild 18.3-19

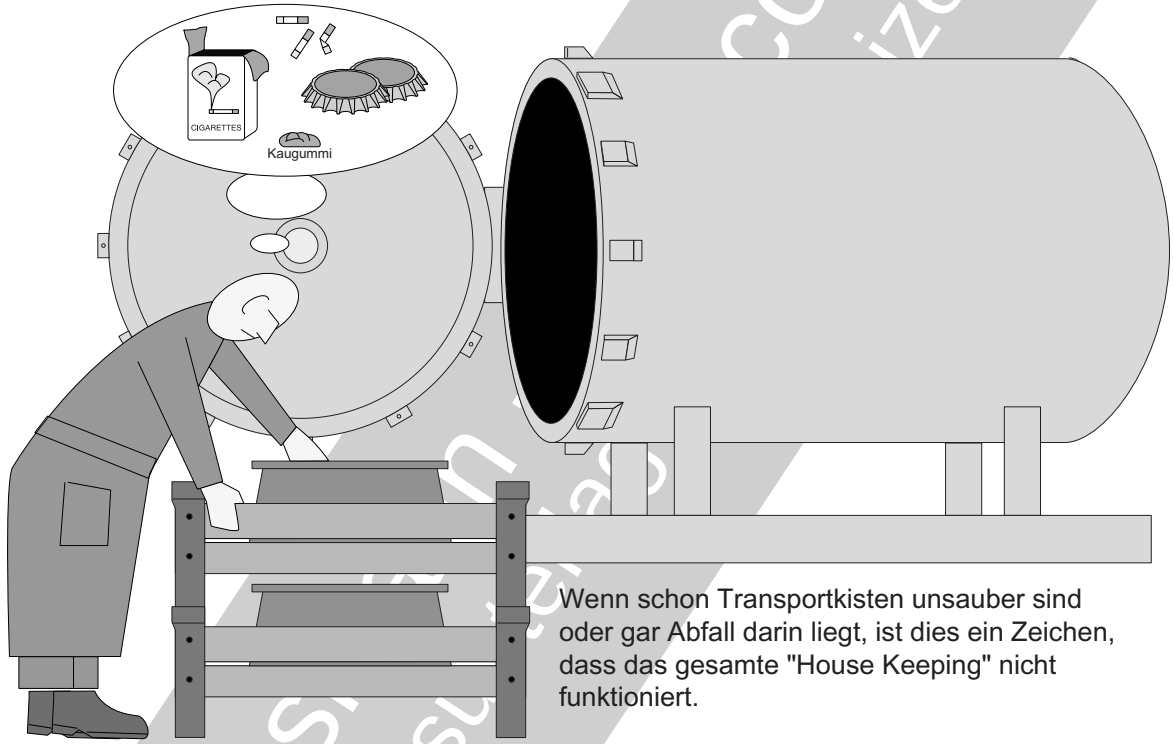
Bild 18.3-19: *Ein besonderes Problem ist das* ***Auffinden fertigungsbedingter Verunreinigungen in schlecht einsehbaren Hohlräumen.*** *Dazu gehören* ***Kühlluftkanäle*** *in Turbinenschaufeln, integrierte* ***Ölbohrungen*** *in Getriebegehäusen und verzweigte* ***Leitungen*** *wie sie für Ölsysteme typisch sind. Deshalb ist beim Handling auf* ***austretende Partikel und Flüssigkeiten*** *besonders zu achten. Auch* ***Reaktionszonen*** *und* ***Ablagerungen*** *(Flecken) um nach innen führende Bohrungen sind ein wichtiger Hinweis (Skizze oben links).*
Verengungen und Verstopfungen können mit Hilfe einer ***Durchflussmessung****, möglicherweise in* ***Kombination mit Thermografie,*** *erkannt werden (mittlere Skizze).*
Um innere Verunreinigungen mit ***Röntgen*** *zu finden, ist eine ausreichende Schwächung der Röntgenstrahlung im Vergleich zu den Bauteilwänden erforderlich.*
Lassen sich Verunreinigungen in einem sonst unschädlichen Bad lösen, besteht die Möglichkeit ***über die Badverunreinigung*** *die* ***Bauteilverunreinigung analytisch zu erkennen*** *(Skizze rechts). Dieses Verfahren wird zur Feststellung von kleinsten Resten niedrig schmelzender Eingusslegierungen genutzt. Für den Legierungsbestandteil Wismut (Bi) liegt die Nachweisgrenze bei 0,02 ppm (Lit 18.3-7).*

Bild 18.3-20: *Um zu verhindern, dass Verunreinigungen sich schädigend auswirken, ist es insbesondere wichtig,* ***vor Fertigungsprozessen*** *die solche Schädigungen auslösen können (z.B. Wärmebehandlung und galvanische Prozesse), die* ***Bauteile visuell besonders genau zu kontrollieren****. Typische Verschmutzungsmerkmale zeigt die untere Skizze. Gegebenenfalls sind* ***Fachleute der festgelegten Informationskette*** *zur Beurteilung und Abhilfe hinzuzuziehen.*

© Axel Rossmann Verlag Schulte als Schulungsunterlage

Fertigung: Verunreinigungen an Bauteilen

Ein entscheidender Schritt zur Abhilfe von Oberflächenverunreinigungen ist, diese zu erkennen.



Wenn schon Transportkisten unsauber sind oder gar Abfall darin liegt, ist dies ein Zeichen, dass das gesamte "House Keeping" nicht funktioniert.

Einige typische Verschmutzungsmerkmale an Bauteilen

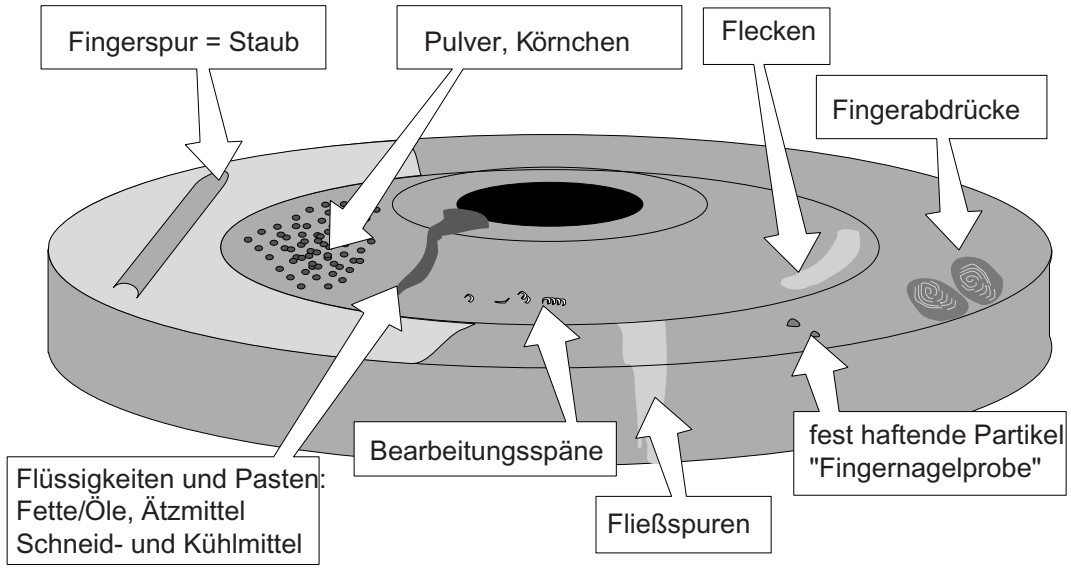


Bild 18.3-20

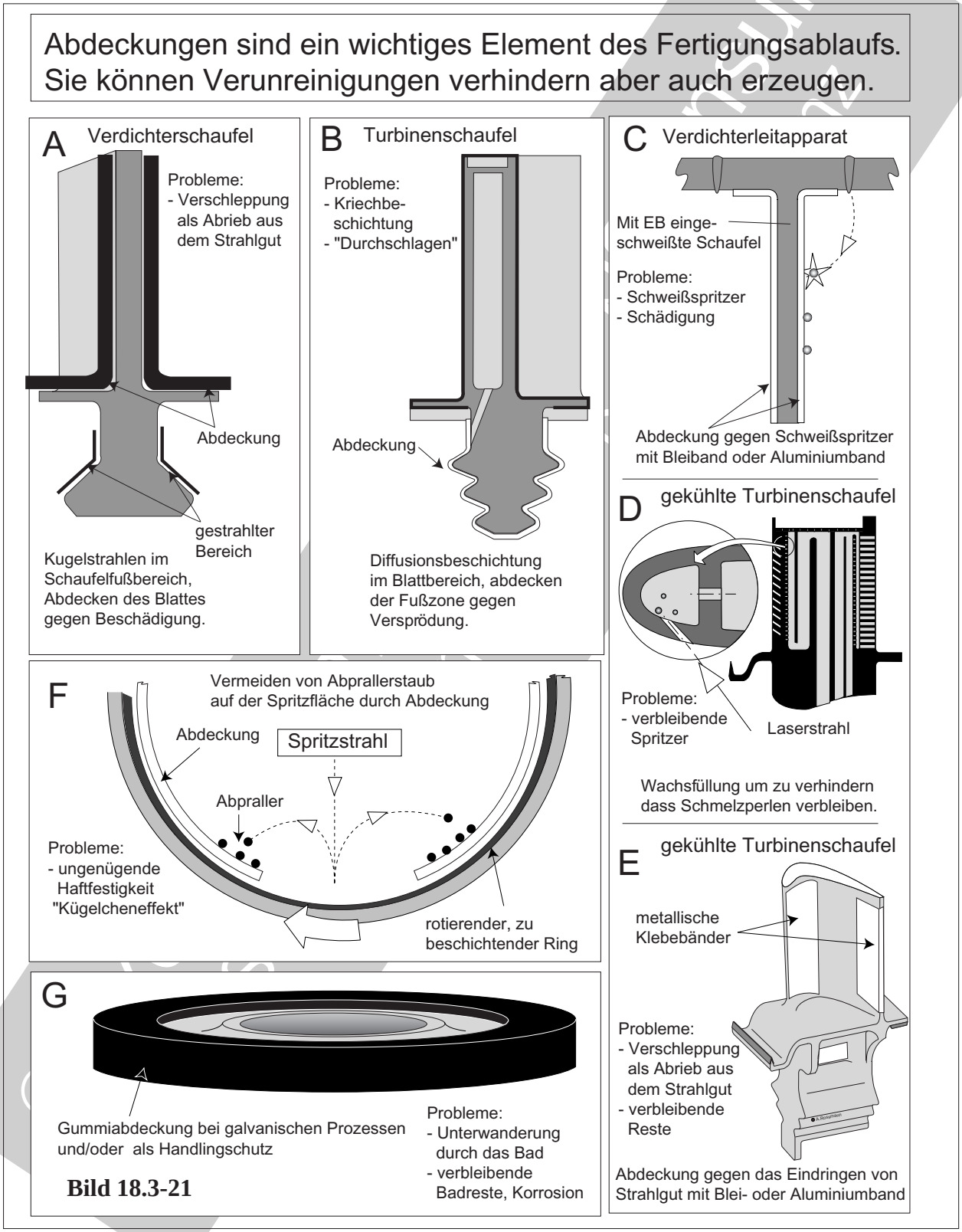


Bild 18.3-21: Abdeckungen *sind notwendig um Verunreinigungen zu vermeiden. Sie können aber auch selbst die Ursache für Verunreinigungen sein.*

*„**A**“, Abdeckung mit Gummimasken bei **Strahlprozessen**. Zur Vermeidung der Verformung filigraner Querschnitte. Für abrasives Strahlen wird auch Metallband verwendet. Abrieb oder*

verbliebene Reste von Metallbändern können in nachfolgenden Prozessen Schäden auslösen (Bild 18.3-9 und Bild 18.3-19).

*„**B**“, Abdecken des **Schaufelfußes** von Turbinenschaufeln, um eine Beschichtung mit einer spröden **Diffusionsschicht** und damit ein Absinken der LCF-Festigkeit zu verhindern (Band 3, Bild 12.2.1.8-3). Die Abdeckung kann unterwandert werden. Verbliebener **Pulverstaub** bei einer nachträglichen Wärmebehandlung schädigend wirken (Bild 18.3-2).*

***„C“** Abdecken gegen **Schweißspritzer** vom Elektronenstrahl- , Laser- und Reibschweißen (Bild 18.6-6 und Bild 18.6-12). Spritzer können die **Oberfläche örtlich überhitzen und schädigen** (Bild 18.6-5).*

*„**D**“ Um **Spritzer vom Laserbohren** zu ‘entschärfen’ (Anschmelzungsgefahr) und zu entfernen werden aus Hohlräumen gekühlter Turbinenschaufeln mit einer **Wachsfüllung** (Lit. 18.3-7) die Gegenwände abdeckt, entfernt. Es besteht die Gefahr, dass anhaftende Schmelzperlen sich später lösen, oder nicht vollständig entfernt wurden.*

*„**E**“ Abdecken von **Hohlräumen**. Bleibt wegen verschlissener oder beschädigter Abdeckungen **Strahlgut in Hohlräumen** zurück, können **Heißteile überhitzt** werden oder Schäden im **Ölkreislauf** (Lager)auftreten. Wird Abrieb **verschleppt,** kann das in nachfolgenden Prozessen Schäden auslösen (Bild 18.3-9 und Bild 18.3-19).*

*„F“ Abdeckung bei **thermischen Spritzprozessen** zur Vermeidung von **überspritzten Abprallern** (Kügelcheneffekt, Band 3, Bild 12.2.1.8.2-4). Die Erfahrung zeigt, dass die Neigung **Abpraller** zu erzeugen offenbar **von der Härte des Silikongummis** (Füllmaterial?) abhängt. Hier dürfte ein Zusammenhang mit der messbaren **Rücksprunghärte** bestehen (Band 2 Bild 6.10.1.2-13). Diese könnte damit ein Merkmal für die Tauglichkeit als Abdeckung sein.*

*Auch **Oxidstrahlen der Oberfläche der Silikonabdeckung** scheint Spritzer zu minimieren.*

*„**G**“ **Gummiabdeckungen** um Bäder von bestimmten Bauteilzonen fernzuhalten. Wird die Abdeckung unterwandert, ist in Ätzbädern mit **Korrosion** bei Beschichtungen mit **Unterwanderung** zu rechnen. Verbleibt die Abdeckung nach dem Prozess noch einige Zeit, können Badreste in Spalten schädigend wirken.*

Literatur zu Kapitel 18.3

18.3-1 „ASM Handbook“, Volume 4, „Heat Treating“, ASM International, 1991, ISBN 0-87170-379-3. Seite 919 und 910.

18.3-2 „Machining Titanium Alloys“, www.supraalloys.com/Machining_titanium.htm, 10.4.2004, Seite 1-12.

18.3-3 „Titanium Design and Fabrication Handbook for Industrial Applications“, „Titanium Surface Treatments, Cleaning & Maintenance“, Titanium Metals Corporation (Timet) ,www.timet.com/fab-p34.htm, Seite 1.

18.3-4 W.Klose, „Kühlschmiermittel auf Metalloberflächen“, Zeitschrift „Oberflächentechnik“, 86 (1995) Nr. 6, Seite 1876-1882.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.3-5 R.D.Münster, „Fehlern auf der Spur, Haftungs- und Benetzungsstörungen an lackierten Bauteilen“, Zeitschrift „Lackiertechnik“, 49 (1995) 3, Seite 190-191.

18.3-6 NTSB -AAR (Aircraft Accident Report) 72-9 „United Airlines, INC. Boeing 737-222, N9005U, Philadelphia International Airport, July 19, 1970“, Seite 1-38.

18.3-7 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 60 und 81.

18.3-8 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.

18.3-9 AMS, Metals Handbook Ninth Edition, „Volume 9 , Metallography and Microstructures“, R.R.Boyer „Titanium and Titanium Alloys“, ISBN 0-871170-007-7 (v.1), Seite 464.

18.3-10 NTSB Identification MIA88IA231, Microfiche number 36430A, July 1988.

18.3-11 Z.Peidao, Y. Hai, „A Case Study of Bi-Sn-Induced Embrittlement“, D.R.H.Jones, „Failure Analysis Case Studies“ 1998 Elsevier Science Ltd. Seite 360-365, reprinted from „Engineering Failure Analysis“, 3, 241-247 (1996).

18.3-12 W.Friehe, „Dehnungsinduzierte Spannungsrisskorrosion in Flüssigmetallen“ („Strain-induced stress corrosion cracking in liquid metals“) , Zeitschrift „Werkstoffe und Korrosion 29“ Seite 747-753.

18.3-13 S.W.Kandebo, „GE Win Signals Entree Into F-15 Business“ , Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 29, 2002, Seite 27 und 30. (2338)

18.3-14 H.Simon, „Oberflächenreaktionen an Titanwerkstoffen“, Zeitschrift „Metall Oberfläche“ 5-1982, Seite 211-217.

18.3-15 E.U.Lee, R.G. Mahorter, J.D. Wacaser, „Fracture of Ti-8Al-1Mo-1V Alloy Fan Blade by Stress Corrosion Cracking and Fatigue“. Proceedings des Symposiums vom 1-6 May 1977, Toronto, Canada, „Fractography in Failure Analysis“, ASTM Special Technical Publication 645, Seite 128-143.

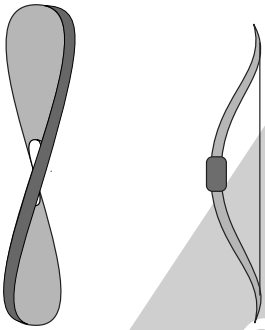
18.3-16 Aviation Occurrence Report Number 88H0001, Canadian Aviation Safety Board, 12.December 1989.

18.3-17 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.

18.3-18 A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 2“, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 7.1.4.

© Axel Rossmann - Turbocons.at
Abschlussunterlage nur mit Lizenz

18.4 Eigenspannungen



In diesem Kapitel werden **Eigenspannungen**, oft auch pauschal als **innere Spannungen** (engl. **internal stresses**) oder **Restspannungen** (engl. **residual stresses**) bezeichnet, als Spannungen in einem Bauteil **ohne äußere Last** definiert. Wärmespannungen als Folge von Temperaturgradienten sind damit ebenfalls Eigenspannungen. Eigenspannungen werden entsprechend der Literatur 18.4-1 in 3 Gruppen der Art I, Art II und Art III eingeteilt (Bild 18.4-1). Eigenspannungen stehen innerhalb des Bauteils im Gleichgewicht (Bild 18.4-2). Eine Veränderung von **Makroeigenspannungen** (Eigenspannungen I. Art) führt zu einer „Bewegung“ bzw. **Verzug**. Diese Auswirkungen lassen sich in der Fertigung (z.B. Relaxation, Verfestigung) und/oder im Betriebseinsatz (Kriechen, Rissbildung) beobachten (Bild 18.4-4). Änderungen von **Mikroeigenspannungen** können unter Fertigungsbedingungen **Maßänderungen** hervorrufen. Es gibt wohl kaum einen Fertigungsschritt bei dem nicht Eigenspannungen entstehen oder verändert werden können (Bild 18.4-3 und Bild 18.4-5.0). Ob Zug- oder Druckeigenspannungen entstehen und wie hoch diese sind, hängt entscheidend von den Prozessparametern ab (Bild 18.4-2).

Druckeigenspannungen sind gewöhnlich erwünscht (Bild 18.4-7 und Bild 18.4-10) weil sie das Betriebsverhalten (Schwingfestigkeit) der Bauteile verbessern. Sie können aber auch schädigend wirken, wenn sie das Abplatzen einer Schicht (z.B. Thermobarriere) unterstützen. Um die Schwingfestigkeit zu verbessern, kommen Fertigungsverfahren zum Einsatz, die gezielt Druckspannungen in das Bauteil einbringen. Am häufigsten wird dafür das Kugelstrahlen angewendet (Band 3, Bild 12.2.1.6-5). Auch Gefügeunterschiede können Druckeigenspannungen erzeugen. Die Einsatzhärtung nutzt hohe Druckspannungen in der Härteschicht, die auf einer Volumenvergrößerung des Härtegefüges beruhen.

Zugeigenspannungen sind dagegen in vielen Fällen unerwünscht (Bild 18.4-11 und Bild 18.4-12) weil sie, insbesondere bei Überlagerung mit Zug-Betriebsspannungen, das Verhalten (Schwingermüdung, Kriechen) der Bauteile verschlechtern. Zugeigenspannungen unterstützen oder sind eine Voraussetzung für Rissbildung bei einwirkenden Medien. So werden **Spannungsrisskorrosion** (Band 3, Bild 12.2.1.7-8) und **Lötrissigkeit** (Bild 18.3-5, Bild 18.3-10.1 und Band 3, Bild 12.2.1.7-8) ausgelöst. Die Gitteraufweitung unter Zugspannungen begünstigt die Aufnahme von Wasserstoff und damit die **Wasserstoffversprödung**.

Die **Messung von Eigenspannungen** ist mit zerstörungsfreien und zerstörenden Methoden möglich (Bild 18.4-21 und Bild 18.4-22). Zerstörungsfrei lassen sich lediglich Eigenspannungen in einer sehr dünnen Oberflächenzone (10 µm-Bereich) bestimmen. Damit ist eine **Bewertung der Auswirkungen auf das Betriebsverhalten eines Bauteils problematisch**. An der Oberfläche ist unter plastischer Verformung spanender Bearbeitung immer mit Eigenspannungen nahe der Fließgrenze zu rechnen.

Sind unerwünschte Eigenspannungen in einem Bauteil vorhanden, können diese mit einer Wärmebehandlung merklich abgebaut, nicht aber ganz beseitigt werden. Nutzt man Kriecheffekte längerer Glühzeiten (**Relaxation**) lassen sich Eigenspannungen sehr weit abbauen (Bild 12.2.2.4-14). Trotzdem ist es richtig von **spannungsarm Glühen (engl. stress relief heat treatment) statt spannungsfrei Glühen** (Bild 18.4-15.1) zu sprechen.

© Weißgerber Engineering Consult
Nur zur privaten Nutzung lizenziert

Bild 18.4-1: *Unter* ***Eigenspannungen*** *versteht man* ***Spannungen in einem Körper, die im Gleichgewicht*** *stehen (Bild 18.4-2). Solange sie sich nicht ändern, treten sie nach außen nicht in Erscheinung. Nach Hochleitner werden beispielsweise Eigenspannungen in Mono-Blattfedern gezielt vorteilhaft genutz. Durch die Fertigungsschritte walzen, vergüten und vorrecken lassen sich Druckeigenspannungen an der Oberseite induzieren welche bei Betriebslast die Zugmittelspannung absenkten und so die die erreichbare Lastwechselzahl anheben. Als einfaches Beispiel zur Erklärung der Vorgänge in einem Eigenspannungssytem kann das geschlossene System Bogen + Sehne dienen. Von außen wirken Kräfte wie das Dehnen der Sehne mit dem Pfeil und die Haltekraft am Bogen. Im „auslegungsgemäßen" Ruhezustand* ***(„A")*** *ist die Sehne auf Zug belastet, der Bogen auf Biegung (Zug und Druck). Damit wirken nur 'innere Kräfte' die im Gleichgewicht stehen. Wird der Bogen von einer äußeren Kraft gespannt* ***(„B"), überlagern sich diese Spannungen aus der äußeren „Betriebslast" mit den Eigenspannungen****.*
Führen die Eigenspannungen zur plastischen Verformung, bei ***erhöhter Temperatur*** *zum Kriechen (****Relaxation****, „C"), bauen sie sich ab. Dieser Effekt entsteht auch mit einem Nachgeben bei* ***Rissbildung*** *(****„D"****) wie sie Spannungsrisskorrosion oder Lötrissigkeit („****E****") auslöst. Dabei dürfte jedoch die Schädigung, zumindest bei Rissbildung, das Betriebsverhalten unzulässig verschlechtern.*
Eine Veränderung der Eigenspannungen erfolgt auch, wenn Betriebsspannungen die ***Fließgrenze überschreiten*** *und eine plastische Verformung eintritt. Bei verformungsbehinderten Zuständen (z.B.* ***Thermoermüdung****) können hohe Eigenspannungen induziert werden. Eine* ***Rissbildung geht dann mit einem Eigenspannungsabbau*** *(Bild 18.4-16) und/ oder dem Bruch des Bauteils einher.*
Überschreiten die Betriebsspannungen, zu denen auch Eigenspannungen gehören, die Bauteilfestigkeit, tritt ***Versagen, letztendlich mit dem Bruch*** *ein* ***("F")***

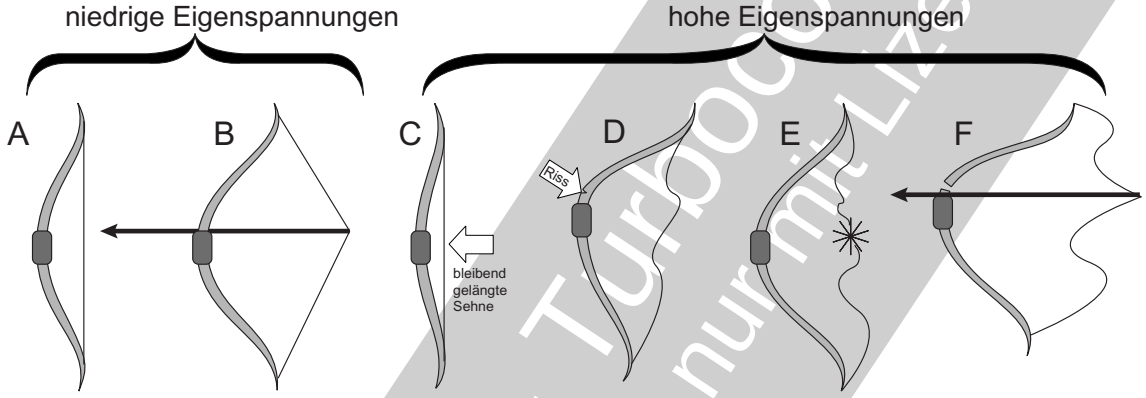
Man teilt Eigenspannungen, abhängig von der Größe des Wirkungsbereichs, in mehrere Arten ein (Lit 18.4-1 und Lit. 18.4-3). Diese Eigenspannungsarten beeinflussen sich häufig gegenseitig.
Eigenspannungen I.Art*: Für Fertigungsprozesse und damit den Praktiker der Fertigung sind besonders diese makroskopischen Eigenspannungen (Band 1, Bild 4.3-15) von Bedeutung. Solche Eigenspannungen wirken über einen deutlich größeren Bauteilbereich als die Gefügemerkmale. Kräfte und Momente stehen für diese Eigenspannungen im Gleichgewicht. Werden sie verändert, ist das mit Maßänderungen bzw.* ***Verzug*** *verbunden (Skizze unten). In Fällen eines symmetrischen Eigenspannungszustands kommt es nicht zum Verzug. Beispiele sind eine beidseitig kugelgestrahlte Platte (Bild 12.2.2.4-2) oder eine im plastischen Bereich geschleuderte Scheibe (Bild 18.4-17 und Band 1, Bild 5.4.1.1-9 und Bild 5.4.1.1-10).* ***Maßänderungen*** *als Folge von Dehnungen im elastischen Bereich sind vergleichsweise gering. Sie zeigen sich dem Praktiker an* ***eng tolerierten Passungen****. Schnelle Eigenspannungsänderungen, wie sie von äußeren Kräften angeregt werden, können mit auffälligen Bewegungen des Bauteils ablaufen. Beispiel ist das Durchschnappen eines Büchsendeckels.*
Eigenspannungen II. Art *wirken im Bereich der Gefügemerkmale (Korngrößen). Bei Veränderungen sind die zu erwartenden Verformungen gering, und treten deshalb in der Praxis kaum in Erscheinung. Solche Eigenspannungen liegen z.B. im Bereich funkenerodierter Flächen (Band 3, Bild 12.2.1.2-1) oder von Beschichtungen vor.*
Eigenspannungen III. Art *sind lediglich über kleine Bereiche in der Größenordnung von Atomabständen inhomogen. Veränderungen sind makroskopisch nicht erkennbar. Typisch sind Eigenspannungen in Härtegefügen (Einsatzhärten, Nitrieren) oder um Phasen in aushärtbaren Legierungen.*
In der Skizze unten ist der Fall dargestellt, in dem eine Scheibe aus einer schwer zerspan-

© Arbeitsgemeinschaft Bossmann - Tu Chemnitz
Vervielfältigung nur mit Lizenz

Fertigung: Eigenspannungen

Was sind Eigenspannungen und wie wirken sie?

Auswirkungen von Eigenspannungen am Beispiel des Bogens + Sehne als geschlossenes System.



Gerät in Ruhe Eigenspannungen im Gleichgewicht.

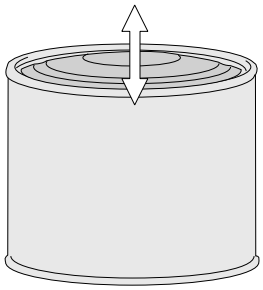
Gerät unter auslegungskonformer Betriebslast. Überlagerung von Eigenspannungen und Betriebslast

Eigenspannungsabbau durch plastische Verformung "C" oder Rissbildung "D". Das Nachgeben unter hohen Eigenspannungen baut diese ab. Führt dabei aber zu bleibenden Verformungen ("Verzug").

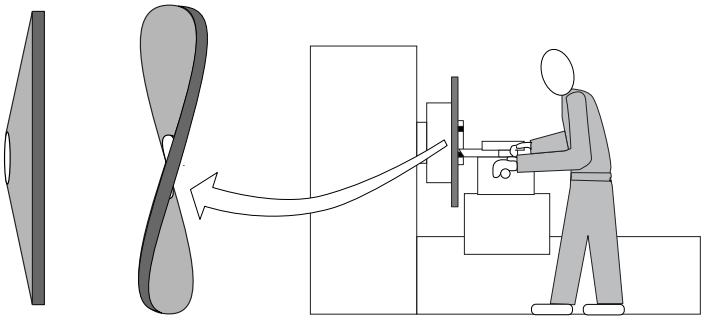
Gerät in Ruhe, verzögerter Bruch, durch schädigende äußere Einflüsse wie Korrosion oder erhöhte Temperatur.

Gerät im Betrieb. Bruch durch Überlastung auf Grund der Überlagerung von Eigenspannungen und Betriebslast.

Eine Änderung der Makroeigenspannungen zeigt sich in vielen Fällen durch eine merkliche bleibende Verformung (Verzug). Dies gilt sowohl für die Einbringung als auch für den Abbau von Eigenspannungen.



"Durchschnappen" des Büchsendeckels ausgelöst von einer geringen äußeren Kraft.



Von Eigenspannungen als Folge der Bearbeitung verzogene Scheiben

Bild 18.4-1

baren hochfesten Nickellegierung einseitig plan überdreht wird. Dabei werden in die zerspante Planseite hohe Eigenspannungen eingebracht. Je nach Zerspanungsparametern handelt es sich an der Oberfläche um Zug- oder Druckspannungen. Solange die Scheibe von Spannkräften, dh. äußeren Kräften gehalten wird, ist sie plan. In diesem Fall stehen unsymmetrische Eigenspannungen mit äußeren Kräften im Gleichgewicht. Wird die Scheibe jedoch aus der Aufspannung genommen, fehlen die äußeren Kräfte und die Eigenspannungen müssen sich verlagern, um einen neuen Gleichgewichtszustand, diesmal nur der inneren

© Turbocon.sult
Nutzungsvertrage nur mit Lizenz

Eigenspannungen stehen im Gleichgewicht. Stört eine Änderung das Gleichgewicht, bewegt sich das Bauteil. Es verzieht sich, bis wieder Gleichgewicht herrscht.

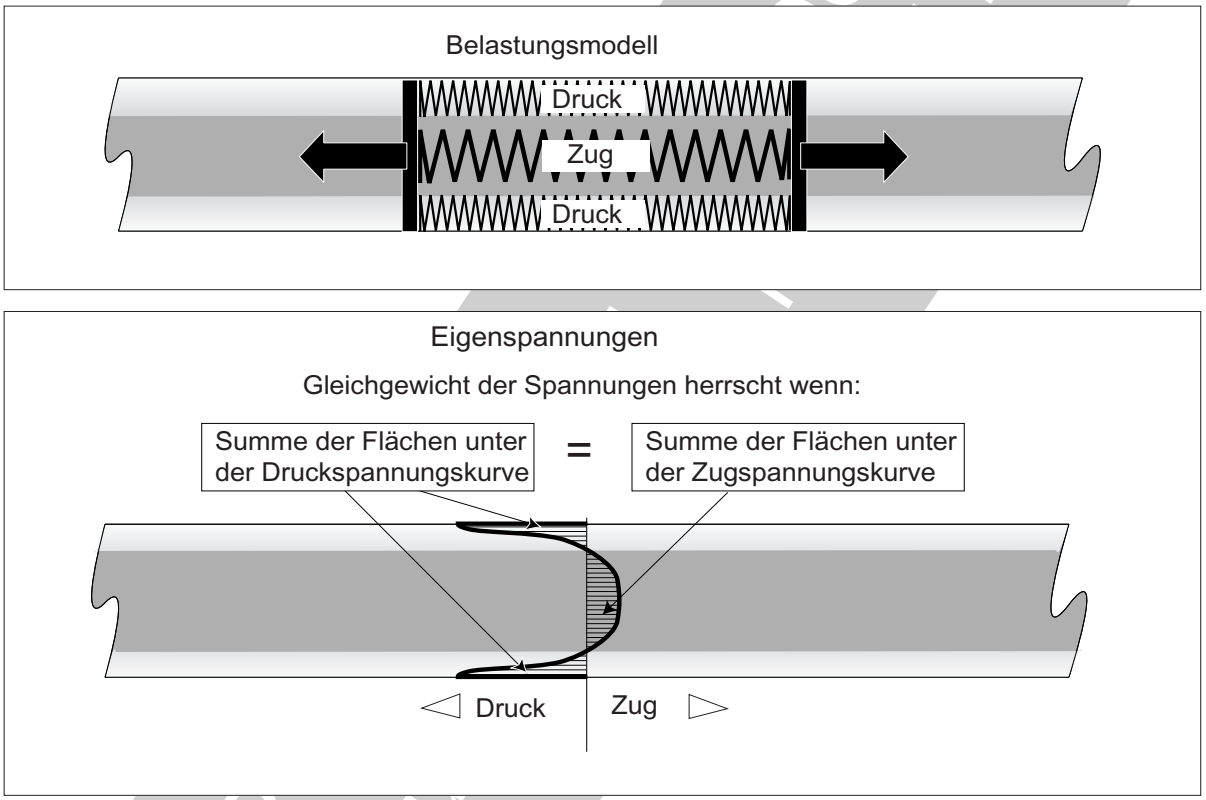


Bild 18.4-2

Spannungen, herzustellen. Dazu muss sich das Teil wie dargestellt elastisch verformen (verziehen). Erwärmt man die Scheibe, dass die Fließgrenze des Werkstoffs abfällt, wird dieser Verzug mit dem weiteren Abbau der Eigenspannungen noch ausgeprägter.

***Bild 18.4-2:** Dieses **Modell** zeigt den Eigenspannungszustand einer Platte mit symmetrischen Druckspannungen im Oberflächenbereich (Skizze unten). Man erkennt, dass sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, der an Hand von Federn (Skizze oben, Lit 18.4-11) anschaulich wird. Der **Gleichgewichtszustand** ist aus den gleich großen Flächen auf der Druck- und der Zugseite unter den Spannungskurven und durch die Symmetrie zu erkennen (Skizze unten).*

Bild 18.4-3:** Eigenspannungen, die von spanenden Bearbeitungsverfahren induziert werden, können **Betriebseigenschaften** entscheidend beeinflussen. Hierzu gehört zuerst die HCF- und LCF- Schwingfestigkeit (Bild 18.4-4). Die Vielzahl der Einflüsse auf Eigenspannungen können auch in Kombination wirken. Das zeigt die Problematik, definierte Eigenspannungszustände allein mit einer Zerspanung an hochbelasteten Bauteilen wie Rotorkomponenten zu gewährleisten. Voraussetzung sind erprobte Fertigungsparameter. Auch andere Einflüsse auf die Eigenspannungen wie Fertigungsfolgen und Werkstoffzustand müssen ausreichend festgeschrieben und reproduziert werden. Bereits der **Wechsel des Typs der Bearbeitungs-

Fertigung: Eigenspannungen

Eigenspannungen sind oft von den Verfahrensparametern und Werkzeugen der Fertigung beeinflusst. Bereits scheinbar kleine Abweichungen sind in der Lage, das Betriebsverhalten eines Bauteils gefährlich zu verändern.

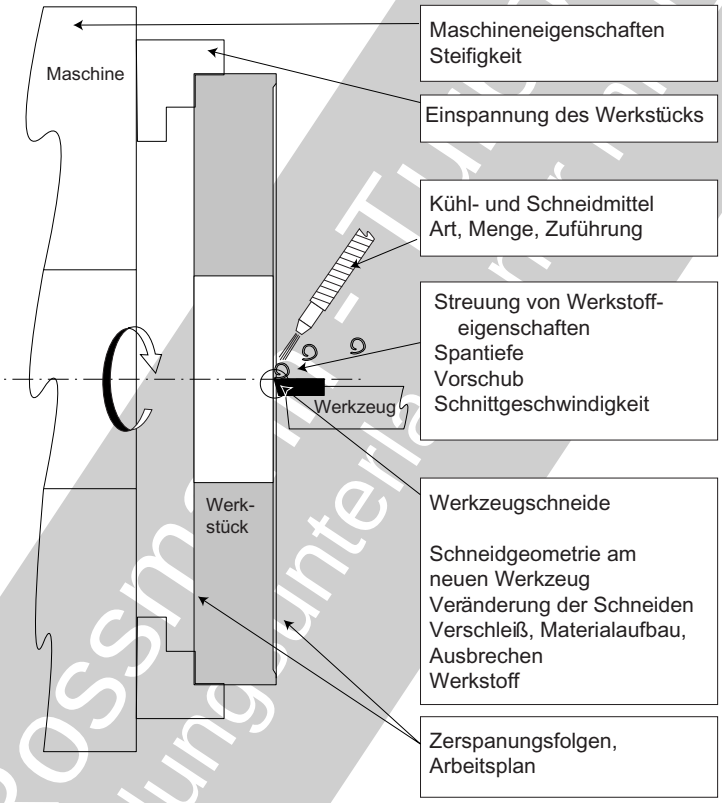
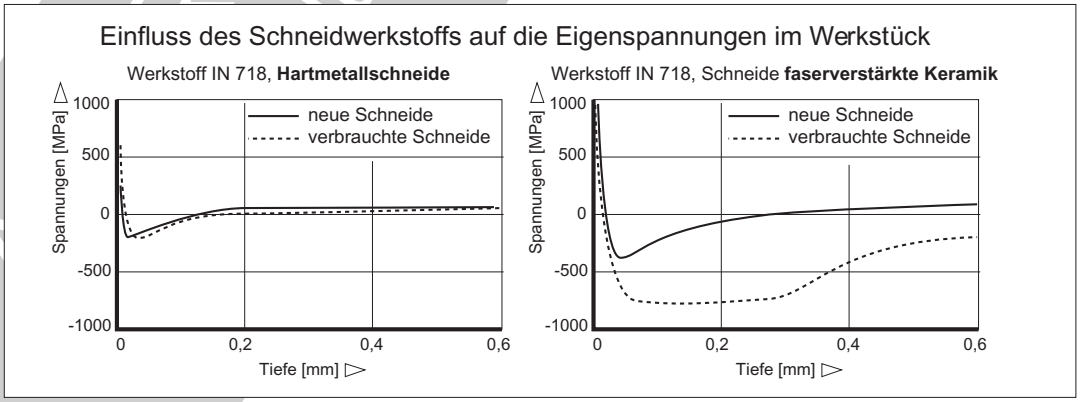


Bild 18.4-3



maschine *ist unter diesem Gesichtspunkt abzusichern.*

Eine Änderung des Schneidwerkstoffs kann beispielsweise, werkstoffabhängig, Höhe und Verlauf der Eigenspannungen, besonders abhängig von der Standzeit, beeinflussen (Diagramme unten, Lit. 18 .4-2) Wegen dieser Problematik bietet es sich an, in die Zerspanungsflächen nachträglich einen definierten Eigenspannungszustand mit Hilfe des Kugelstrahlens einzubringen.

Druckeigenspannungen heben die nutzbare Schwingfestigkeit an und tragen somit, ohne in die Auslegung einzugehen, zur Sicherheit bei.

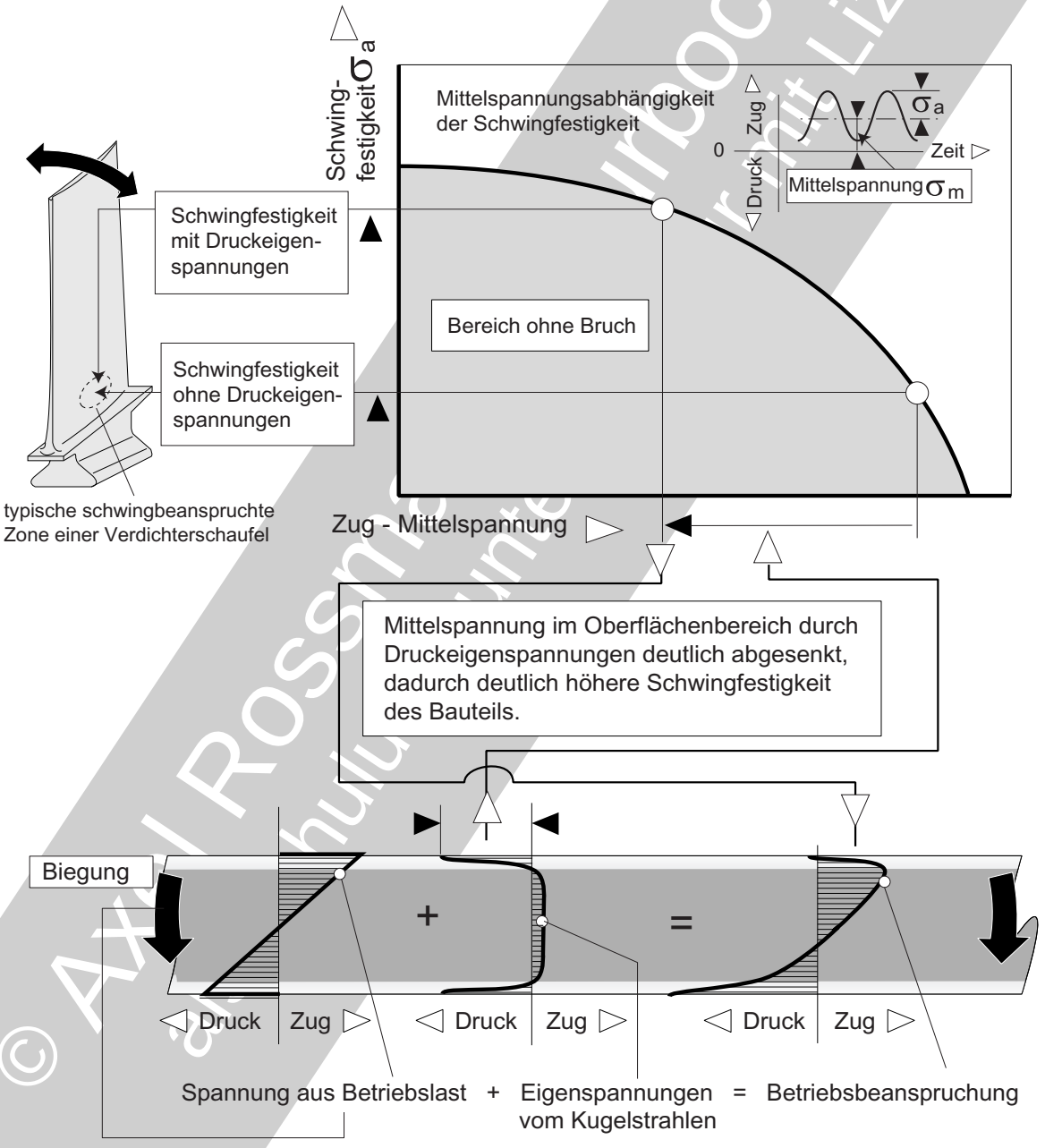


Bild 18.4-4

© Axel Rossmann Turboconsult
alle Rechte vorbehalten
mit Lizenz

Bild 18.4-4.: *Unter* ***Mittelspannung*** σ_m *versteht man die Verschiebung der Schwingbelastung (2* σ_a*) auf der Ordinate (Detail in Diagramm oben rechts). Eine solche Verschiebung tritt mit der Überlagerung (Addition (auf Vorzeichen achten!) Skizze unten) von Eigenspannungen und dynamischen Betriebsspannungen ein. Man erkennt, dass mit steigender Mittelspannung die nutzbare Schwingfestigkeit (Dauerfestigkeit!) bis Null abfällt, wenn die* ***Zugmittelspannung*** *die Fließgrenze erreicht hat.*

Betrachten wir das Beispiel einer in der Grundbiegung schwingenden Schaufel (Skizze links) im ermüdungsgefährdeten Bereich oberhalb der Fußplattform. Ist das Schaufelblatt kugelgestrahlt, wurden in die Oberfläche Druckspannungen induziert (Skizze unten). Zugspannungen der Biegebelastung (Druckspannungen sind nicht das Problem) werden den Druckeigenspannungen des Kugelstrahlens überlagert. Die (Zug-) Mittelspannung im Oberflächenbereich wird so deutlich abgesenkt und das Bauteil erträgt eine höhere Schwingbelastung. Im umgekehrten Fall wirken wegen ungünstiger Zerspanungsparameter hohe Zugspannungen in die Blattoberfläche. Sie addieren sich mit den dynamischen Betriebsspannungen zu einem Anstieg der Mittelspannung, was die Dauerfestigkeit des Bauteils absenkt.

In einem solchen Fall liegt die besondere „Gemeinheit“ darin, dass man Eigenspannungen, anders als Kratzer, einem Werkstück nicht ansieht.

So lässt sich verstehen, dass ***Änderungen der Fertigungsparameter*** *(Bild 18.4-3)* ***ohne absichernde Nachweise das Risiko von Schaufelbrüchen in Triebwerken gefährlich erhöhen*** *können. Das Risiko ist besonders hoch, wenn Schäden erst nach längeren Betriebszeiten auftreten und dann eine große Zahl von Triebwerken betroffen sind.*

Um das Risiko zu minimieren, werden den Produktionslosen von Schaufeln nach statistischen Überlegungen Teile entnommen und deren Schwingfestigkeit („axf-Wert“, Bild 17.3.2-3) wird im Labor mit Hilfe von Schwingversuchen ermittelt. Wird der vorgegebene Mindestwert erreicht, kann das Produktionslos zum Einbau freigegeben werden.

© AxPoint Turbocon Consult
Nur zur Unterlage mit Lizenz

Bild 18.4-5.0: *Fertigungsverfahren erzeugen oder verändern Eigenspannungen. Wie dies geschieht und welche Eigenspannungen entstehen, soll an typischen Beispielen aufgezeigt werden.*

„1“ Zerspanen*(Bild 18.5.1)****:*** *Im Mikrobereich laufen mit der Spanbildung plastische Verformungen ab (Lit. 18.4-4), die Eigenspannungen induzieren. Deren Größe und Art ist von vielen Einflüssen, in erster Linie vom Werkstoff und von Zerspanungsparametern abhängig (Bild 18.4-3). Entstehen beim Zerspanen, besonders beim Schleifen, ausreichend hohe Temperaturen, können in Stählen zusätzlich Gefügeumwandlungen mit Volumenänderungen und Eigenspannungsaufbau auftreten. (Lit 18.4-16).*

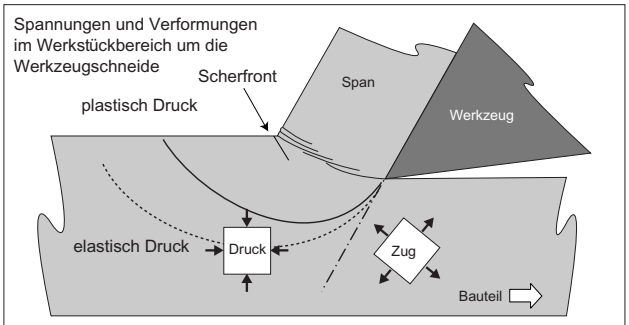
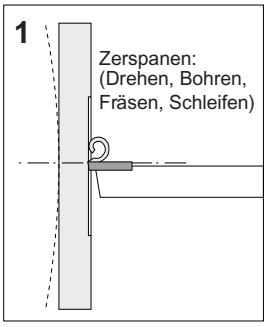


Bild 18.4-5.1

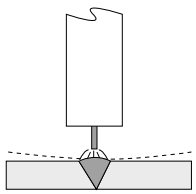
Fortsetzung auf Seite 18.4--9

Eigenspannungen entstehen oder verändern sich bei allen Fertigungsverfahren. Oft sind sie nur schwer gezielt zu beeinflussen.

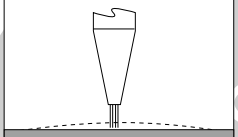
1 Zerspanen: (Drehen, Bohren, Fräsen, Schleifen)



2 Schweißen

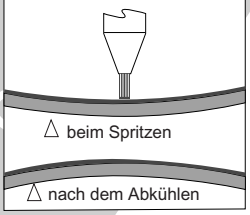


3 Strahlverfahren:
Reinigungsstrahlen
Verfestigungsstrahlen

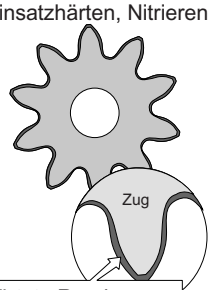


4 Thermische Spritzverfahren

Wärmedehnung der Schicht kleiner als vom Grundmaterial



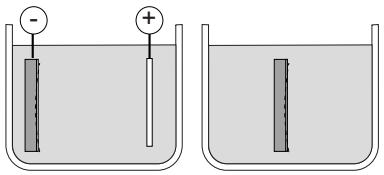
5 Diffusionsbeschichtungen: Einsatzhärten, Nitrieren



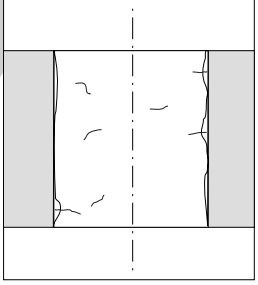
gehärtete Randzone mit Druckspannungen

6 Chemische und galvanische Beschichtungen

- verchromen
- vernickeln

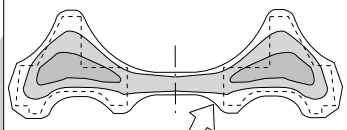


7 Funkenerosion
Laserbohren
EB-Bohren



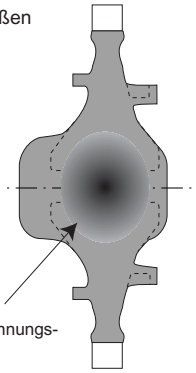
8 Wärmebehandlung, Glühen

Bereiche gleicher Temperatur



Schmiedekontur

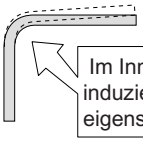
9 Gießen



Zugspannungs-bereich

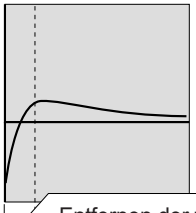
10

Verformungsverfahren Tiefziehen, Biegen, Richten. Durch Rückfedern drehen sich die Spannungen gegenüber dem Verformungsvorgang um!



Im Innenradius induzierte Zug-eigenspannungen

11



Auch abtragende Verfahren, die selbst keine Eigenspannungen erzeugen (z.B. ECM oder Ätzen), können bereits vorhandene (z.B. von einer Oberflächenbehandlung) unerwünscht beeinflussen. Werden größere Querschnitte abgetragen, können sich bereits vorhandene Eigenspannungen (z.B. vom Schmieden oder Gießen) gefährlich vergrößern und/oder verlagern.

Entfernen der für die Eigenspannungen verantwortlichen Oberflächenzone

Bild 18.4-5.0

Fertigung: Eigenspannungen

Fortsetzung von Seite 18.4--7

„2“ Schweißen *(Bild 18.4-5.2):* ***Wärmespannungen*** *auf Grund des Temperaturverlaufs führen zu plastischen und elastischen Verformungen. Die Spannungen verändern sich während des Schweißvorgangs und bei der Abkühlung (Bild 18.4-5.2, Lit 18.4-5) bis der Eigenspannungszustand bei Raumtemperatur erreicht ist. Erfahren die Werkstoffe während des Schweißens in den Wärmeeinflusszonen Gefügeumwandlungen mit Volumenänderungen (z.B. Stähle), kann der Spannungsverlauf von dem in Bild 18.4-5.1 dargestellten abweichen (Lit 18.4-17). Art, Höhe und Verlauf der Eigenspannungen hängt, außer von den Schweißparametern, entscheidend von der* ***Nachgiebigkeit bzw. der Steifigkeit*** *des Bauteils ab. Hohe Steifigkeit bedeutet zwar geringen Verzug, dafür aber hohe Eigenspannungen, weil sich diese nicht durch Verformung abbauen können.* ***Geringer Verzug nach einer Schweißung ist nicht unbedingt ein Zeichen für niedrige Schweißeigenspannungen****.*

„3“ Strahlbehandlung *(Bild 18.4-5.3): Strahlbehandlungen, besonders das* ***Kugelstrahlen*** *(engl.* ***Shot Peening****) bringt Druckspannungen in die Bauteiloberfläche ein. Eine symmetrische Behandlung beider Seiten löst keinen Verzug aus (Bild 18.4-2). Wird ein flächiges, ausreichend dünnes Werkstück einseitig kugelgestrahlt, müssen die Druckspannungen auf der einen Seite von einer elastischen Durchbiegung (Verzug) ausgeglichen werden (Bild 18.4-2, Lit. 18.4-6, Lit. 18.4-12 und Lit. 18.4-14). Strahlbehandlungen dienen der Gewährleistung einer ausreichenden Schwingfestigkeit, was auch für kleine Kratzer, die innerhalb der Druckspannungszone bleiben, gilt (Bild 18.4-8). Vergleichbare Effekte lassen sich auch mit anderen Verfestigungsverfahren wie Rollen und Laser Peening erzielen.*

Schematischer Temperatur- und Spannungsverlauf während einer Schmelzschweißung bei angenommenem ebenen Spannungszustand (über den Querschnitt gemittelt).

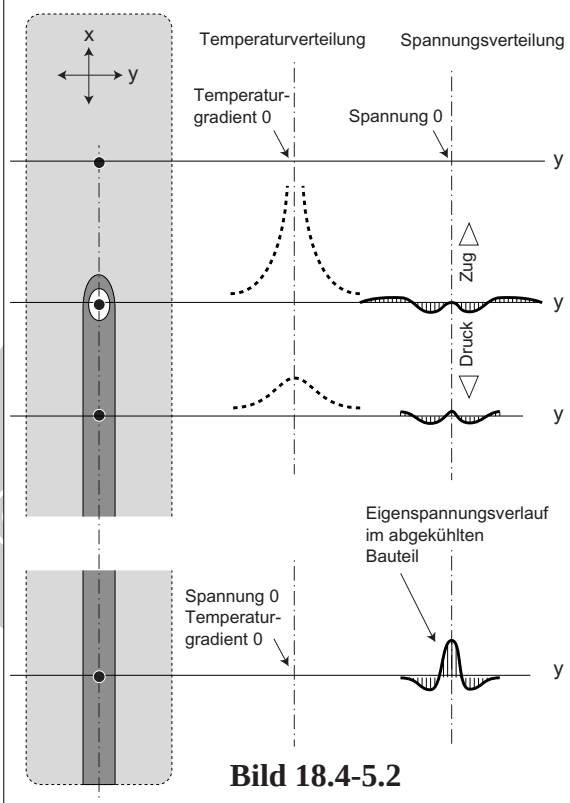


Bild 18.4-5.2

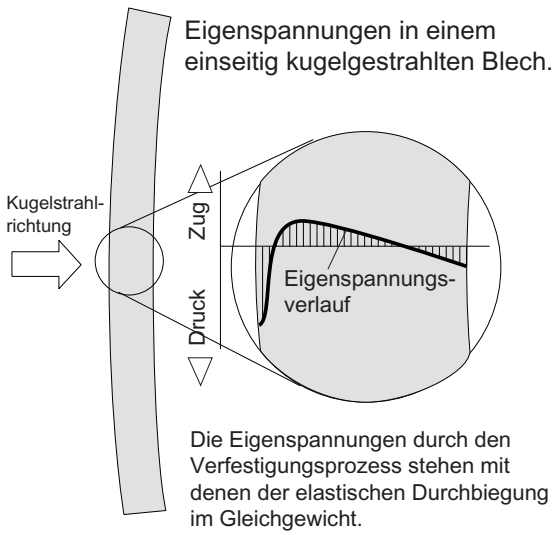


Bild 18.4-5.3

„4“ Thermisches Spritzen *(Bild 18-6): Eigenspannungen die thermisches Spritzen aufbaut, sind in besonderem Maß vom Unterschied physikalischer Eigenschaften zwischen Schicht und Grundwerkstoff abhängig. Hierzu gehören Wärmedehnung, Festigkeit und Elastizitätsmodul. Im Folgenden wird der Eigenspannungszustand nach dem Abkühlen aus dem Spritzprozess vereinfacht betrachtet:*

„A“*: Gegenüber einem metallischen Grundmaterial ist die vergleichsweise niedrige Wärmedehnung* ***keramischer Schichten*** *typisch. Die ebenfalls niedrige Wärmeleitfähigkeit ist für einen besonders großen Temperaturunterschied zwischen Schicht und kühlerem Grundwerkstoff verantwortlich. Während der Abkühlung entstehen deshalb, je nachdem wie hoch der Beschichtungsprozess das Grundmaterial aufgeheizt hat, Druckspannungen. Gewöhnlich ist der Elastizitätsmodul poröser Schichten niedrig und sorgt für ein niedriges Eigenspannungsniveau.*

„B“*: Mit einer geeigneten Temperaturführung im Grundmaterial lässt sich in der Schicht zumindest zeitweise eine Zugspannung erzeugen die zur Rissbildung führt. So lassen sich erwünschte* ***Segmentierungsrisse*** *in Wärmedämmschichten realisieren. Sie dienen dem Eigenspannungsabbau. Um einen auf das Betriebsverhalten eines Bauteils abgestimmten Eigenspannungszustand im Fertigungsprozess zu erhalten, ist also eine optimierte Temperaturführung notwendig. So ist es auch möglich, Druckeigenspannungen in der Schicht oder im Grundwerkstoff zu erzeugen.*

„C“*: Ist die* ***Wärmedehnung des Grundmaterials kleiner als die der Beschichtung****, entstehen bei der Abkühlung in der heißen Schicht Zugspannungen. Der gleiche Effekt lässt sich auch erzielen, wenn das Grundmaterial während des Beschichtungsprozesses auf niedriger Temperatur gehalten wird. Dies kann erwünscht sein, um im darunter liegenden Grundwerkstoff Druckspannungen aufzubauen und so die Schwingfestigkeit zumindest nicht abzusenken.*

„D“*: Weist die Schicht Druckspannungen und damit der Grundwerkstoff Zugspannungen auf, wird eine* ***Schwingrissbildung unter der*** *gewöhnlich schlecht rissprüfbaren (porösen)* ***Schicht*** *begünstigt. Diese Gefahr erhöht sich für Schichten mit sehr niedrigem Elastizitätsmodul. Solche, oft poröse Schichten, weisen bei gleicher Dehnung wie der mit ihnen verbundene Grundwerkstoff entsprechend niedrigere Spannungen auf.*

„5“ Härteschichten *(Bild 18.4-5.5): Eine Volumenvergrößerung führt bei Härtung von Oberflächen zu Druckspannungen. Das erhöht*

Verschiedene Eigenspannungen nach der Abkühlung in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften der **thermischen Spritzschicht** und des Grundmaterials.

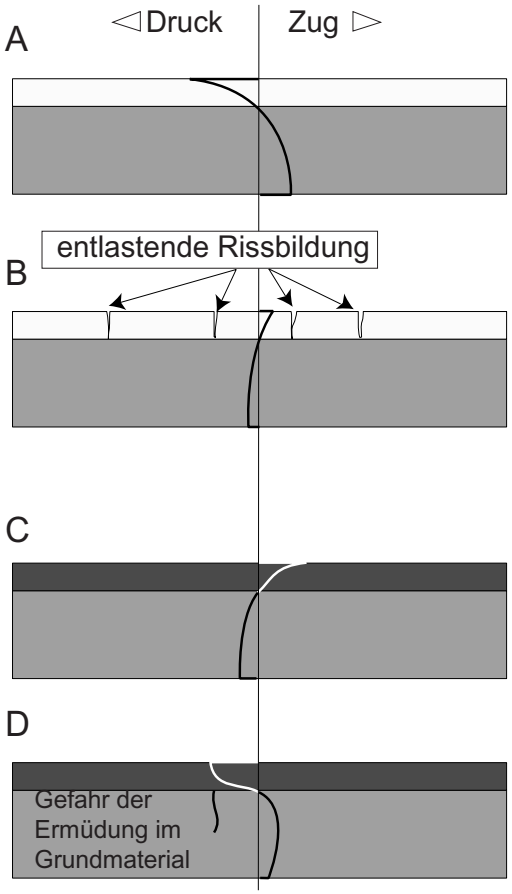


Bild 18.4-5.4

© Assessmann - Turboconsult
assessmann.com
mit Lizenz

zusammen mit einer Festigkeitssteigerung die Schwingfestigkeit deutlich. Dieser Effekt kann wie beim induktiven Härten, allein auf ein größeres Volumen des Härtegefüges zurückzuführen sein. Die Diffusion von Kohlenstoff (Einsatzhärten) oder Stickstoff (Nitrieren) vergrößert ebenfalls das Volumen und induziert erwünschte Druckspannungen. Bei dünnen Querschnitten wie kleinen Zahnradzähnen (Bild 18.4-6) können aus Gleichgewichtsgründen im Kern hohe Zugspannungen entstehen. Erfahrungsgemäß können diese bei Einsatzhärtungen eine innere Rissbildung in Verbindung mit einer Wasserstoffversprödung auslösen (Band 1, Bild 5.7.2-2). Die hohe Schwingfestigkeit der Oberflächenschicht begünstigt Schwingrisse vom Übergang der Härteschicht zum Grundmaterial. Sie können meist erst mit einer gefährlichen Größe kurz vor dem Bruch erkannt werden, gewöhnlich ist es dann schon zu spät.

Eigenspannungen im Bereich von Härteschichten wie Einsatz- und Nitrierschichten.

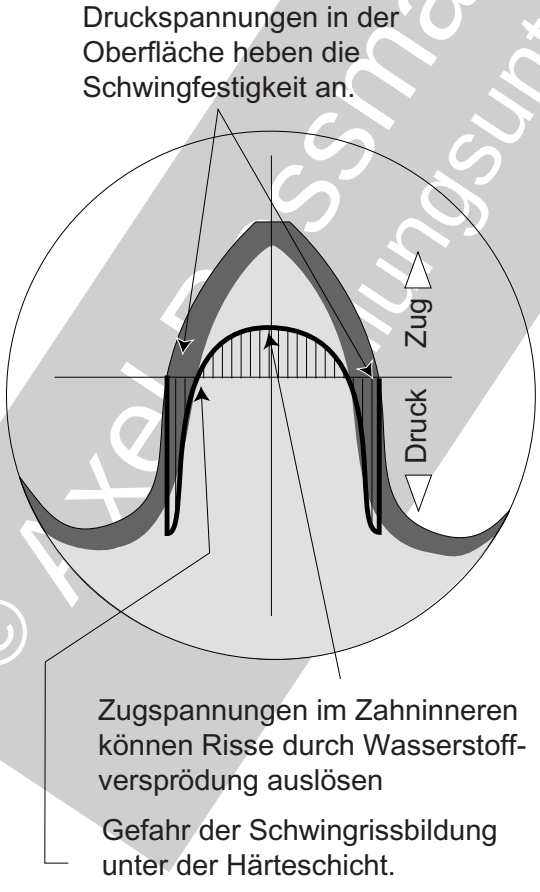


Bild 18.4-5.5

„6“ Chemische und galvanische Schichten *(Bild 18.4-5.6): Die Absenkung der Dauerfestigkeit durch* ***Cr- und Ni-Schichten*** *ist allgemein bekannt (Lit. 12.2.2.4-8). Der Schwingfestigkeitsabfall im Zusammenhang mit Ni-Schichten ist noch größer als bei Cr-Schichten. Dies dürfte mit dem* ***sehr hohen E-Modul der Nickelschichten*** *zusammenhängen. Bei gleicher Dehnung entstehen in Ni-Schichten entsprechend höhere Spannungen. Die Absenkung der Schwingfestigkeit wird auf Zugeigenspannungen in den Schichten zurückgeführt. Im Bild 18.4-5.6 ist die Eigenspannungsverteilung im Bereich einer Hartchromschicht auf Gusseisen dargestellt. Man erkennt, dass am Übergang der Schicht zum Grundwerkstoff die Zugspannungen ein Maximum erreichen. Wird diesen Eigenspannungen eine dynamische Belastung überlagert, hebt das die Mittelspannung stark an, die nutzbare Schwingfestigkeit wird abgesenkt (Bild 12.2.2.4-4). Auffällig ist das Zugspannungsminimum in der Schicht. Dieses dürfte im Zusammenhang mit dem Schichtaufbau und so mit den Prozessparametern stehen.*

„7“ Funkenerosion, Laserbohren, EB-Bohren *(Bild 18.4-5.7) schmelzen den Werkstoff, wenn auch auf unterschiedliche Weise, in sehr kurzer Zeit örtlich auf. Dabei entsteht eine sog.* ***wiedererstarrte Zone*** *(engl.* ***Recast Layer****). Zusätzlich wird der Grundwerkstoff in einer schmalen benachbarten Zone stark erhitzt. Dabei wird er gestaucht und bildet ebenfalls beim Abkühlen Zugspannungen. Im Recast Layer entstehen so sehr hohe Zug-Schrumpfspannungen. Gewöhnlich ist die wiedererstarrte Zone mit Kohlenstoff aus dem Dielektrikum angereichert, hart und versprödet. Das*

© Axel Fussmann - Turboconsult
Lizenz: Nur mit Lizenz

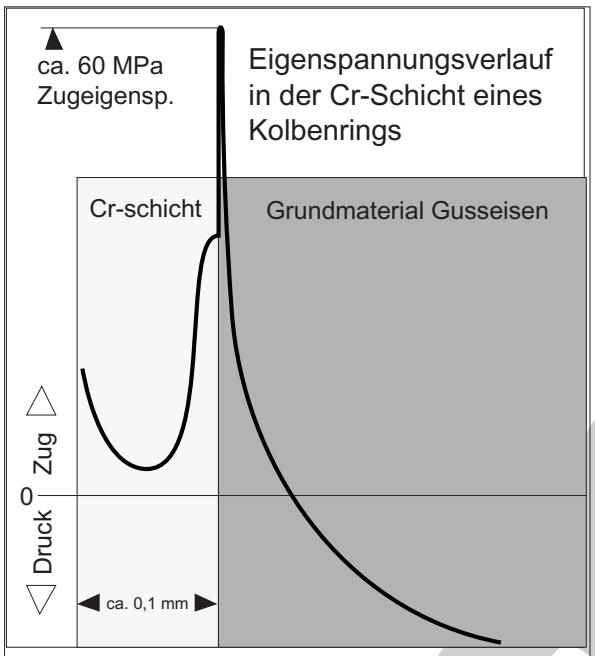


Bild 18.4-5.6

begünstigt Mikrorisse. Der Verlauf der Eigenspannungen ändert sich mit der Unregelmäßigkeit der Schicht (Band 3, Bild 12.2.1.2-1) über sehr kleine Distanzen und kann als Beispiel für Eigenspannungen II. Art dienen (Bild 18.4-1). Zugspannungen und/oder Mikrorisse senken die Schwingfestigkeit gravierender als andere Bearbeitungsverfahren, die ohne vergleichbare thermische Einwirkung ablaufen. Wechselt man zu einem Verfahren mit Wiederaufschmelzzone, erfordert das äußerste Vorsicht. In jedem Fall ist ein geeigneter betriebsnaher Nachweis der Anwendbarkeit erforderlich.

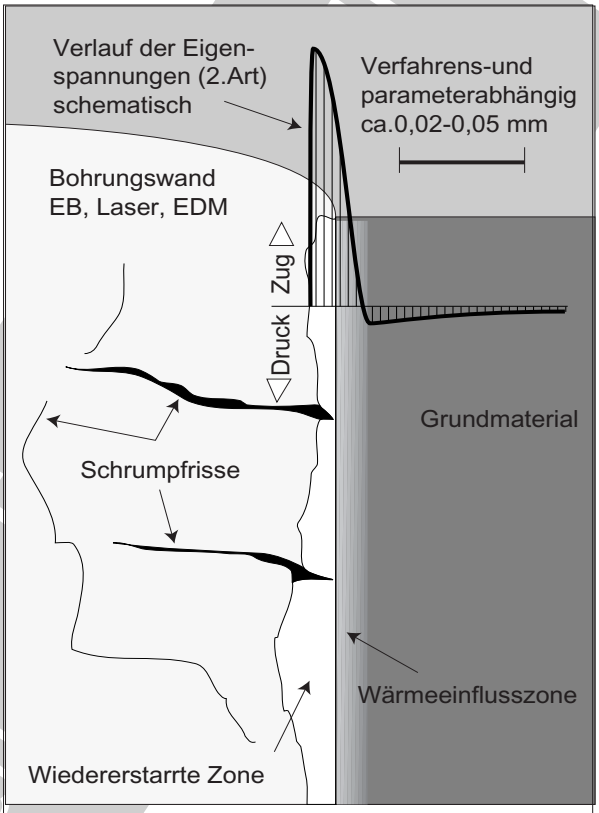


Bild 18.4-5.7

„8“ Wärmebehandlung, Glühen: *Diese Verfahren können nicht nur Spannungen abbauen (Spannungsarmglühen). Sie können auch Eigenspannungen erzeugen. Dies ist der Fall, wenn sich dicke und/oder sehr unterschiedliche, benachbarte Querschnitte schnell aufheizen oder abkühlen und so Wärmespannungen oberhalb der Fließgrenze im Bauteil entstehen. Werden beim Glühen Bereiche plastisch gestaucht oder gedehnt, bilden sich während des Abkühlens umgekehrt orientierte Eigenspannungen. In gedehnten Bereichen sind Druckspannungen, in gestauchten Zugspannungen zu erwarten. Die* ***Eigenspannungen bei Raumtemperatur sind also den Wärmespannungen bei Glühtemperatur entgegengesetzt****. Je warmfester der Werkstoff, umso schwerer ist es, Eigenspannungen mit erneutem Glühen, bei Temperaturen die keine Werkstoffschädigung befürchten lassen, abzubauen. Um möglichst wenig Eigenspannungen bei einer*

© Axel Rossmann - Technik als Schulungsunterlagen

Wärmebehandlung in ein Bauteil zu induzieren, sollten Rohteile einen möglichst günstigen Querschnittsverlauf (Wärmebehandlungskontur) aufweisen. Eigenspannungen können auch in anderen Fertigungsprozessen wie Schmieden, die ebenfalls unter erhöhten Temperaturen ablaufen, entstehen (Bild 11.1-14 und Bild 11.2-19).

„9“ Gießen: *In dicken Gussquerschnitten ist mit erheblichen Eigenspannungen zu rechnen. Typisches Beispiel sind* ***integral gegossene Turbinenräder*** *von Gasturbinen kleiner Leistung (z.B. Hubschrauberantrieb). Weil der Werkstoff im Inneren zuletzt erstarrt, entstehen dort hohe Schrumpfspannungen (Zug). Zusätzlich bewirkt der Temperaturanstieg nach innen beim Abkühlen Zugspannungen. Wenn man ein solches Rad mit einem radialen Schnitt zur Mitte trennt, schließen Zugspannungen den Trennschlitz. Erfahrungsgemäß kommt es dann zum Einklemmen der Trennscheibe oder des Sägeblatts. Hohe Warmfestigkeit und Wärmespannungen beim Aufheizen und Abkühlen lassen nur einen unbefriedigenden Abbau der Gusseigenspannungen zu.*

„10“ Verformungsverfahren *(Bild 18.4-5.8): Wird ein Bauteil plastisch verformt und nicht bei Temperatur über längere Zeit gehalten, federt es wieder zurück. Dabei kann übersehen werden, dass die Eigenspannungen nach dem Rückfedern denen der Formgebung entgegengesetzt gerichtet sind. Wird ein einseitig eingespanntes Blech auf Biegung belastet, entsteht eine Zug- und eine Druckseite. Überschreiten diese Spannungen die Fließgrenze kommt es an der höchstbelasteten Stelle (Einspannung) im Zugbereich zur plastischen Dehnung und im Druckbereich zum plastischen Stauchen. Nach dem Entlasten und Rückfedern liegen Zugspannungen im plastisch gestauchten Bereich und Druckspannungen im gedehnten Bereich vor. Dieser Effekt führt zu unerwarteten Schadensbildern. Beispielsweise zu Spannungsrisskorrosion am Innenradius gebogener Bauteilzonen.*

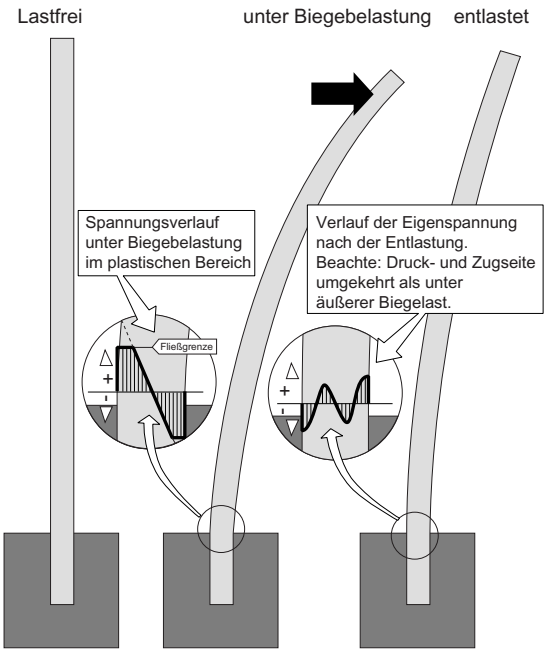


Bild 18.4-5.8

„11“ Umlagerung von Eigenspannungen durch nicht berührungslosen Abtrag: *Hierzu gehören elektrochemische Verfahren (ECM) und Ätzverfahren. Wird an einem Bauteil, das unter Eigenspannungen steht Material entfernt, wird das Gleichgewicht des Eigenspannungszustands gestört. Es kommt zur Veränderung der Höhe und/oder der Umlagerung mit einer Maßänderung bzw. Verzug. Sind die Eigenspannungen hoch genug, und ist ein ausreichend großer Querschnitt betroffen, überdecken diese Verzüge auch andere Effekte. Selbst Oberflächeneigenspannungen als Folge spanender Bearbeitung, bei denen ebenfalls merkliche Verzüge auftreten. Ein Zusammenwirken solcher Effekte kann den Fertigungsprozess sehr unangenehm stören.*

© Axel Rossmann - Technik als Schulungsunterlagen

Bild 18.4-6: *Eigenspannungen im Neuteil verändern sich auch bei* ***Montage und Betrieb****. Hierzu einige typische Beispiele:*

„A“: *Bereits die Montage kann Eigenspannungen im Bauteil induzieren. Die Spannungen stehen auch mit Fertigungstoleranzen in Zusammenhang. In solchen Fällen lässt sich das montierte System, vergleichbar einem homogenen Bauteil, als „abgeschlossenes System“ betrachten, auf das keine äußeren Kräfte und Momente wirken. Wird z.B. eine nicht genau passende Rohrleitung verbaut (****„A1“****), entstehen in dieser Spannungen, die man als Eigenspannungen bezeichnen kann. Das geschlossene System wird in diesem Fall von der Rohrleitung und den kraftübertragenden Triebwerkskomponenten gebildet.*
Im Fall ***„A2“*** *besteht das geschlossene System aus der Welle und der aufgeschrumpften Nabe. In der Nabe wirken tangentiale Zugspannungen und radiale Druckspannungen, die mit Spannungen in der Welle im Gleichgewicht stehen.*

„B“: *Betrachten wir das Blatt einer* ***Turbinenschaufel****, in diesem Fall einer Leitschaufel, werden die vergleichsweise dünnen Kanten vom Heißgas intensiver und schneller aufgeheizt als dickere und/oder gekühlte Blattzonen. Die gegenüber der Umgebung größere Wärmedehnung führt in den heißen Kanten zu hohen Druckspannungen. Die Kante wird durch Kriechen bzw. Fließen plastisch gestaucht. Kühlt die Schaufel ab, bauen sich in den gestauchten Zonen Zugeigenspannungen auf, die mit Druckspannungen in den nicht verformten Bereichen im Gleichgewicht stehen.*

„C“: *In LCF-beanspruchten Rotorscheiben oder Ringen wird an besonders hoch beanspruchten Zonen (z.B. Bohrungen) die Fließgrenze von Zugspannungen überschritten und es entstehen plastische Verformungen. In Ruhe stehen diese gedehnten Bereiche mit den umliegenden, lediglich elastisch beanspruchten Druckzonen im Gleichgewicht.*

„D“: *Die unterschiedlichen Wärmedehnungen zwischen einer thermischen Spritzschicht, insbesondere einer keramischen* ***Wärmedämmschicht****, und dem Grundmaterial führt im Betrieb zu Spannungen (Lit. 18.4-7). Übersteigen bei Temperatur Zugspannungen die Bruchfestigkeit der Keramik, kommt es zur klaffenden Rissbildung und damit zum Spannungsabbau (Segmentierungsrisse). Nach der Abkühlung vermeidet das Schließen der Risse zu hohe Druckeigenspannnungen und damit ein Abplatzen der Keramikschicht.*

„E“: *Während der Herstellung (HIP)* ***langfaserfaserverstärkter Titanlegierungen****, entstehen auf Grund der sehr unterschiedlichen Wärmedehnung in der Faserwicklung Druckspannungen. Die keramische Faser behindert mit ihrer vergleichsweise niedrigen Wärmedehnung die Titanmatrix beim Abkühlen. In der Matrix entstehen hohe Zugspannungen. Kriech- und Fließvorgänge in der Matrix unter Betriebsbedingungen (Temperatur, Spannung) können diesen, eigentlich unerwünschten Eigenspannungszustand verändern. Eigenspannungen zwischen Einzelfasern und Matrix lassen sich Eigenspannungen II.Art zuordnen (Bild 18.4-1). Sie sind von großer Bedeutung für das Festigkeitsverhalten des Verbunds. Diese prozessbedingten Eigenspannungen können mit Spannungsarmglühen nicht abgebaut werden. Im Gegenteil ist zu befürchten, dass Kriechvorgänge bei Temperatur die Eigenspannungen im abgekühlten Zustand weiter ansteigen lassen und so die LCF-Festigkeit bei relativ niedrigen Betriebstemperaturen (z.B. im Fanbereich) beeinträchtigen.*

„F“: *Kommen* ***Kunststoffe faserverstärkt*** *oder unverstärkt in Kombination mit metallischen Strukturen zum Einsatz (z.B. Einlaufschichten) bilden sich bereits bei der Herstellung durch*

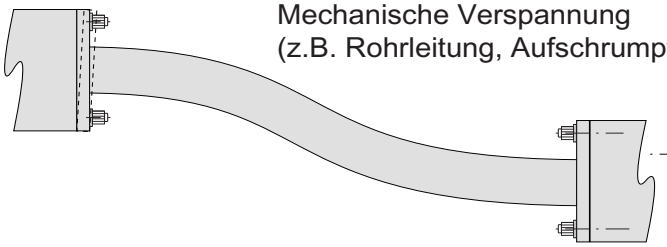
Fortsetzung auf Seite 18.4-16

© Axel Bassmann - Turbconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

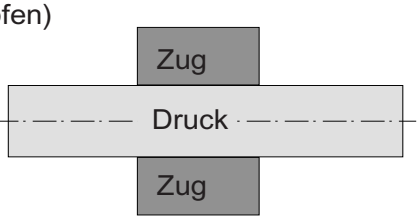
Fertigung: Eigenspannungen

Eigenspannungen entstehen oder verändern sich auch im Betrieb.

A1 Mechanische Verspannung (z.B. Rohrleitung, Aufschrumpfen)

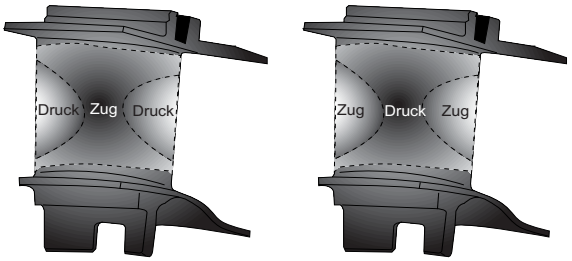


A2

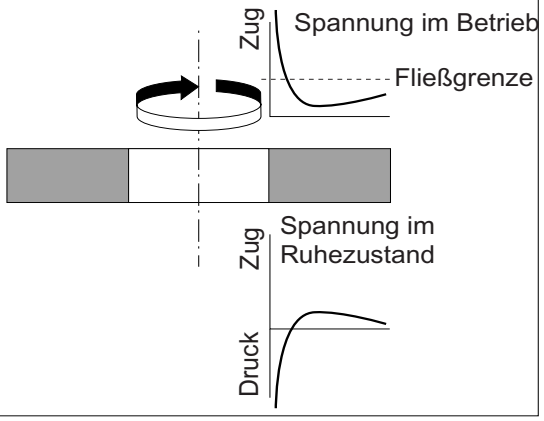


B Thermoermüdung

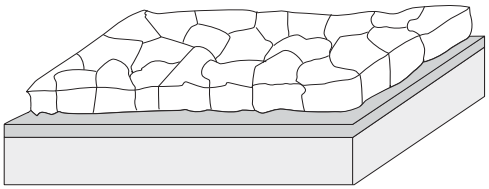
heiß im Betrieb — kalt im Stillstand



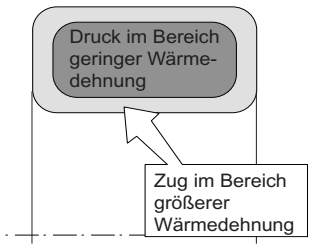
C Belastung im LCF-Bereich



D Wärmedehnungsunterschiede zwischen Schichten und Grundwerkstoff: z.B. keramische Wärmedämmschichten. Spannungsabbau durch Rissbildung.



E Inhomogene Strukturen (z.B. MMC)



F Volumenveränderungen bei Aufnahme eines Mediums, Alterung und Aushärten.

Bild 18.4-6

Fortsetzung von Seite 18.4-14

Schrumpfung beim Aushärten Zugeigenspannungen, die zu Ablösung und Rissbildung der Schicht führen können. Alterungsprozesse mit Volumenverlust wie Abdampfen von Bestandteilen oder Oxidation können im Betrieb Schrumpfspannungen (Zug) mit Ablösung an Rändern und/oder Rissbildung (Skizze rechts) erzeugen. Quellen Kunststoffe wie Silikongummi bei Kraftstoffeinwirkung, ist mit Druckspannungen zu rechnen, die zur Ablösung führen und sich in einer Blasenbildung zeigen (Skizze links).

Bild 18.8-7: *Auf die Eigenspannungen in einem Bauteil haben erstaunlich viele* ***Werkstoffeigenschaften*** *Einfluss. Im Folgenden sollen diese Einflüsse näher betrachtet werden.*

Festigkeit: *Bestimmend ist die temperaturabhängige Fließgrenze bzw. eine zeitabhängige Dehngrenze (Bild 18.4-15.1). Überschreiten Spannungen diese Grenzen, kommt es zur plastischen Verformung und damit zur Spannungsbegrenzung.*
Wird örtlich bei einem hohen Spannungsgradienten die Festigkeit überschritten, erfolgt Rissbildung mit Spannungsabbau (Bild 18.4-6). Die Festigkeit bestimmt Aufbau bzw. Höhe, Änderungen (z.B. bei Verformungsvorgängen) und Abbau (z.B. Spannungsarmglühen) von Eigenspannungen.

Verfestigungsneigung: *Wie stark sich ein Werkstoff bei einer plastischen Verformung verfestigt (Diagramm links) bestimmt mit die Höhe induzierter Eigenspannungen. Beim Kugelstrahlen entstehen in einem stark verfestigenden Werkstoff besonders hohe Druckeigenspannungen. Die Verfestigungsneigung hat auch Einfluss auf Eigenspannungen aus dem Rückfedern plastisch verformter Bauteile (Bild 18.4-5.10)*

Elastizität (E-Modul): *Je niedriger der E-Modul, umso niedriger sind die Spannungen die eine elastische Verformung hervorruft. Eigenspannungen in faserverstärktem Kunststoff werden so begrenzt. Die Matrix weist gegenüber Verstärkungsfasern wie Glasfasern und Kohlefasern einen sehr niedrigen Elastizitätsmodul auf. Mit der Temperatur fällt dieser üblicherweise weiter ab (Diagramm rechts). Das führt bei Ewärmung zum entsprechenden Absinken, bei Abkühlung zum Anstieg der Eigenspannungen (Bild 18.4-14). So ist ein Eigenspannungsabbau durch Erwärmung nicht effektiv.*

Wärmedehnung: *Bei der Entstehung von Eigenspannungen spielt die Wärmedehnung eine wichtige Rolle. Werkstoffe mit großem Wärmedehnungskoeffizienten neigen bei Thermozyklen zu entsprechend großen Dehnungsunterschieden bzw. Wärmespannungen. Führen diese Spannungen im Ablauf der Thermoermüdung zu plastischer Stauchung in den heißen Kanten, bauen sich Eigenspanungen auf. In abgekühlten Turbinenschaufeln stehen deshalb die Kanten unter Zugspannungen, die inneren Zonen unter Druckspannungen. Inhomogene Werkstoffe wie faserverstärkte Metalle bauen auf Grund deutlicher Wärmedehnungsunterschiede zwischen Matrix und Faser stark inhomogene Eigenspannungen auf (Bild 18.4-6).*

© Axel Rossmann - Turbinenconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Eigenspannungen

Mehr Werkstoffeigenschaften als auf den ersten Blick zu erkennen beeinflussen Eigenspannungen.

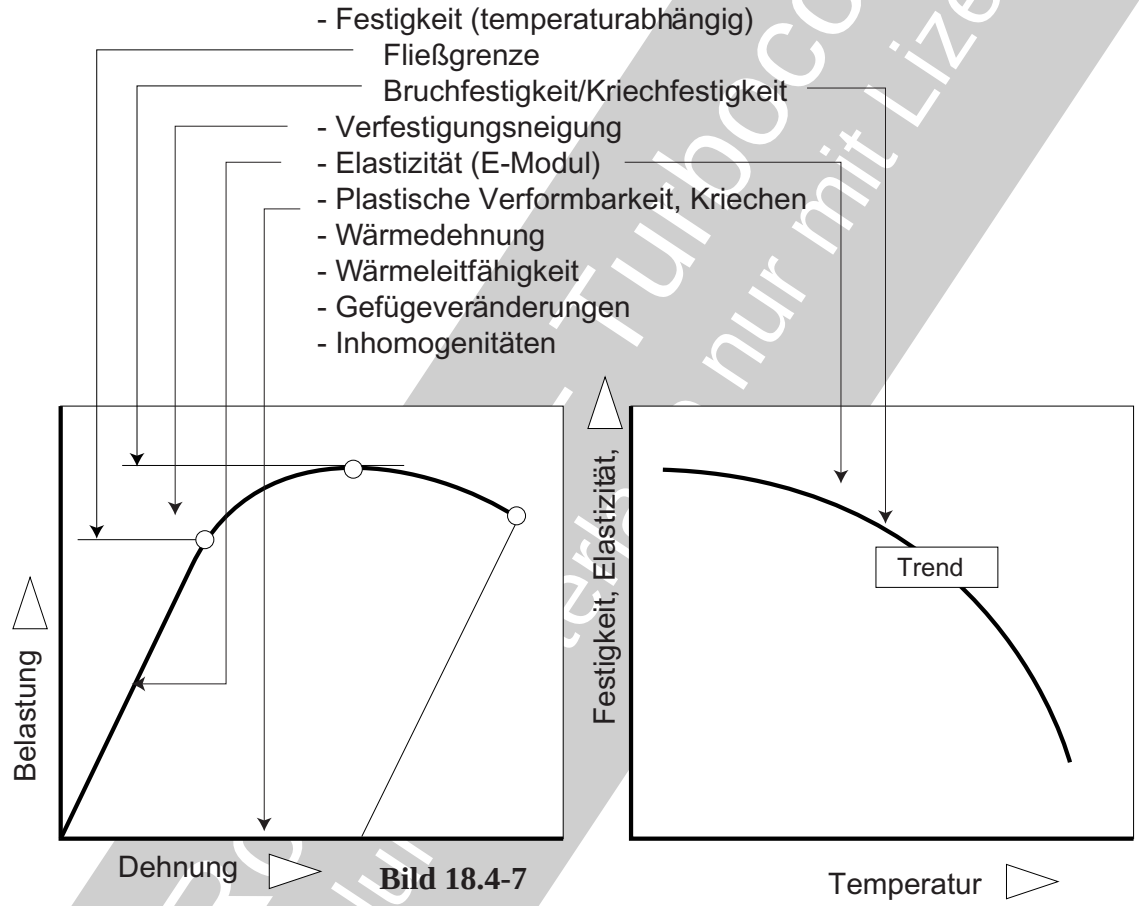


Bild 18.4-7

Das gilt besonders für Titanlegierungen die mit Keramikfasern (SiC) verstärkt sind.

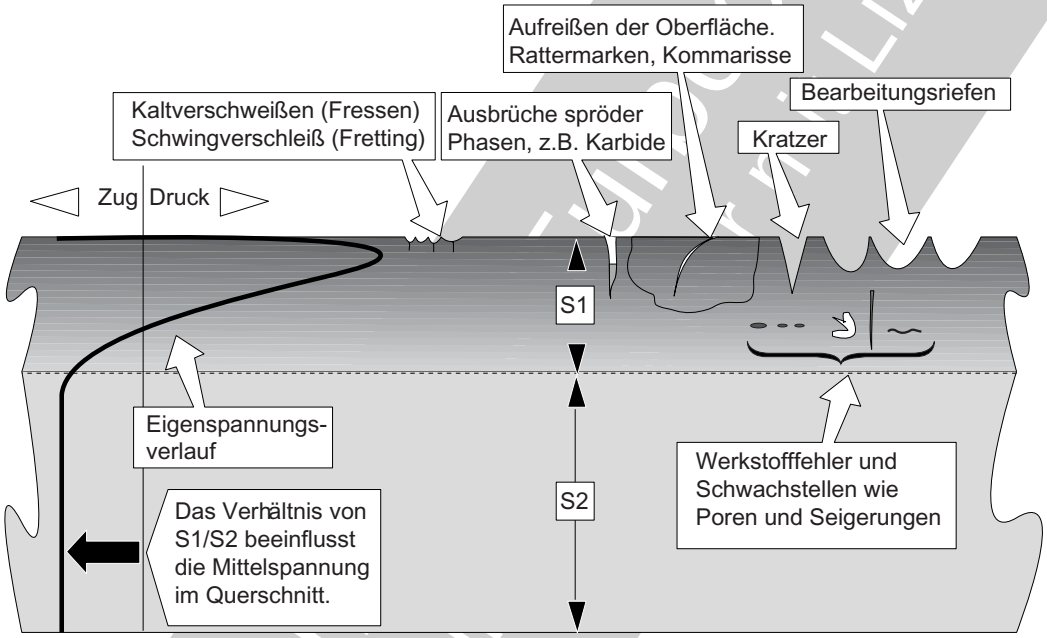
Wärmeleitfähigkeit: *Eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, wie sie für Titanlegierungen typisch ist, führt bei Temperaturänderungen im Aufheiz- und Abkühlvorgang zu großen Gradienten. Entsprechend hohe Spannungsspitzen und der Aufbau von Eigenspannungen sind die Folge (Bild 11.2-19). Für solche Werkstoffe ist eine langsame Abkühlung beim Spannungsarmglühen besonders wichtig, damit in dieser Phase nicht neue Eigenspannungen entstehen.*

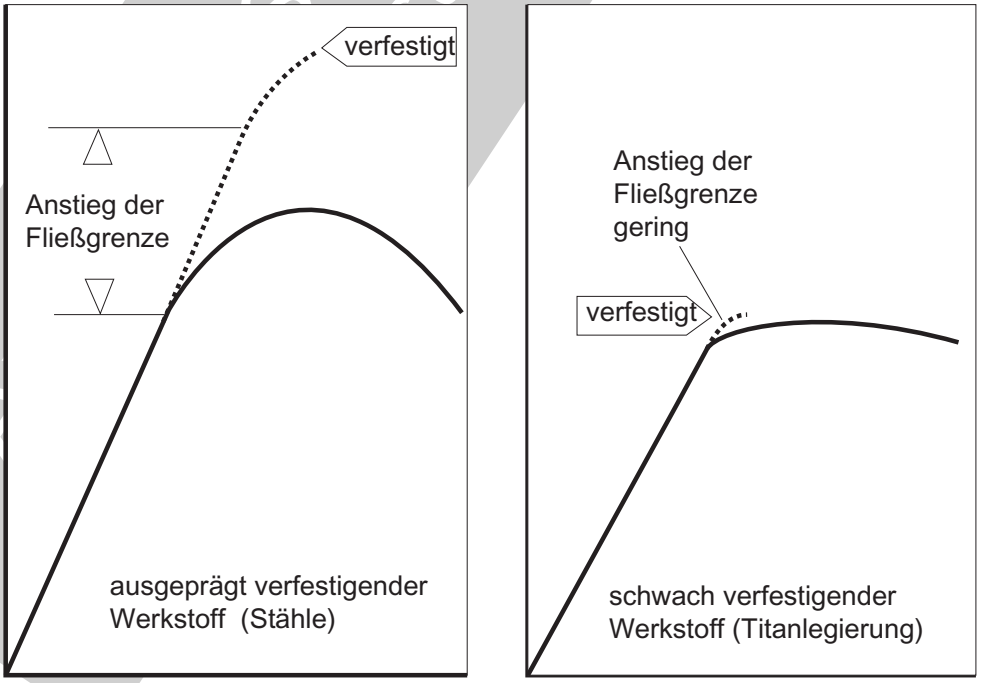
Gefügeveränderungen *beeinflussen auch im Mikrobereich wirkende Eigenspannungen III.Art (Bild 18.4-1) und so Eigenschaften wie das Kriechverhalten. In Stählen steht ein Härtegefüge an der Oberfläche (Induktionshärten, Flammhärten) auf Grund der Volumenvergrößerung unter Druckeigenspannungen was die Schwingfestigkeit deutlich erhöht. Ähnliches gilt auch für Härteschichten die auf Diffusion von Kohlenstoff (Einsatzhärtung) oder Stickstoff (Nitrieren) beruhen.*

Inhomogenitäten: *Dazu gehören sowohl Verstärkungen (z.B. Fasern) als auch Aushärtungspartikel (γ'-Phase) und Karbide. Sie beeinflussen über die bereits behandelten physikalischen Eigenschaften Eigenspannungen aller drei Arten.*

© Axel Kulbe Consult
Abschlussarbeiten
Nur mit Lizenz

Die Dicke der Druckspannungszone bestimmt Größe und Verteilung ertragbarer Oberflächenbeschädigungen und oberflächennaher Fehler.





Verfestigung ist nicht mit der Induzierung von Druckspannungen gleichzusetzen, obwohl der Vorgang gleichzeitig abläuft.

Bild 18.4-8

Bild 18-8: Druckeigenspannungen an der Bauteiloberfläche *senken bei Biegebelastung die Mittelspannung (Bild 18.4-4). Das hebt die nutzbare Schwingfestigkeit an. Ein Anstieg der Druckeigenspannungen infolge einer Überlagerung mit den Druck-Betriebsspannungen ist im Gegensatz zur Erhöhung der Zugspannungen unschädlich. Damit sind Druckeigenspannungen im Oberflächenbereich erwünscht. Aus diesem Grund werden dynamisch hochbelastete Bauteile wie Scheiben und Schaufeln kugelgestrahlt.*

Ein weiterer positiver Effekt besteht in einem gewissen Schutz gegen ***Oberflächenschädigungen****. Mit diesem Effekt ist zu rechnen, solange sich die potenziell schädigende Wirkung innerhalb der Druckspannungszone befindet (Skizze oben, Band 3, Bild 12.2.1.6-5). Je dicker die Druckspannungszone und je höher die Druckspannungen, umso ausgeprägter ist die Schutzwirkung.*

Weil Druckspannungen an der Oberfläche mit Zugspannungen im Querschnittsinneren im Gleichgewicht stehen, steigt die Zugmittelspannung im Bauteilinneren an. Dieser Anstieg ist bei ausreichend dicken Querschnitten gering. Für dünne Querschnitte und eine gleichmäßig hohe Zug-Betriebsspannung über den gesamten Querschnitt, kann eine zu ausgeprägte Druckspannnungszone problematisch werden. Das gilt für einen rotierenden Ring bzw. Ringsteg an einer Scheibe unter hohen Tangentialspannungen (Bild 18.4-9.1)

In Oberflächen werden gewöhnlich Druckeigenspannungen mit verfestigenden Verfahren (Rollen, Kugelstrahlen) oder Oberflächenhärten (z.B. Einsatzhärten, Induktionshärten, Nitrieren) eingebracht. Außer, dass Druckspannungen eingebracht werden, wird die oberflächennahe Werkstofffestigkeit erhöht wie der Begriff „verfestigende Verfahren“ anzeigt. Verfestigung und Druckspannungen sind zwei unterschiedliche Effekte die gemeinsam auftreten. Eine Verfestigung zeigt sich im Anstieg der Fließgrenze und damit auch der Schwingfestigkeit. Sie steht mit Änderungen im Metallgitter (Versetzungen) in Zusammenhang, welche die plastische Verformbarkeit behindern. Vom Werkstoff hängt es ab, ob ***Verfestigung*** *oder Eigenspannung in erster Linie für die Schwingfestigkeitssteigerung verantwortlich ist. Bei stark kaltverfestigenden Werkstoffen wie Stählen (Diagramm unten links) dürfte sich besonders die Festigkeitssteigerung positiv auswirken. Kaum kaltverfestigende Werkstoffe wie Titanlegierungen (Diagramm unten rechts) profitieren dagegen in erster Linie von Druckspannungen.*

Führt die Verfestigung zu merklicher Versprödung, kann der schützende Effekt von einer erhöhten Kerbempfindlichkeit gemindert werden.

Bild 18-9.1 *und* ***Bild 18.4-9.2:*** *Nicht in jedem Fall ist von hohen Druckspannungen in der Oberfläche eine deutliche Verbesserung der Schwingfestigkeit zu erwarten.*

Im Vergleich zum Gesamtquerschnitt sehr tiefe Druckspannungszonen (Detail oben), können sich mit Betriebsspannungen ungünstig überlagern. Addieren sich die bei der Verfestigung im Inneren induzierten Zugeigenspannungen (Bild 18.5-5.5) mit Zugspannungen im Betrieb, kann es ***unterhalb der Oberfläche zum frühen Schwinganriss*** *kommen. Diese Situation wird besonders ungünstig, wenn die Betriebsspannung einen sehr kleinen Gradienten aufweist. Für* ***dünne Ringstege*** *wie Labyrinthträger und Flanschansätze (linker*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

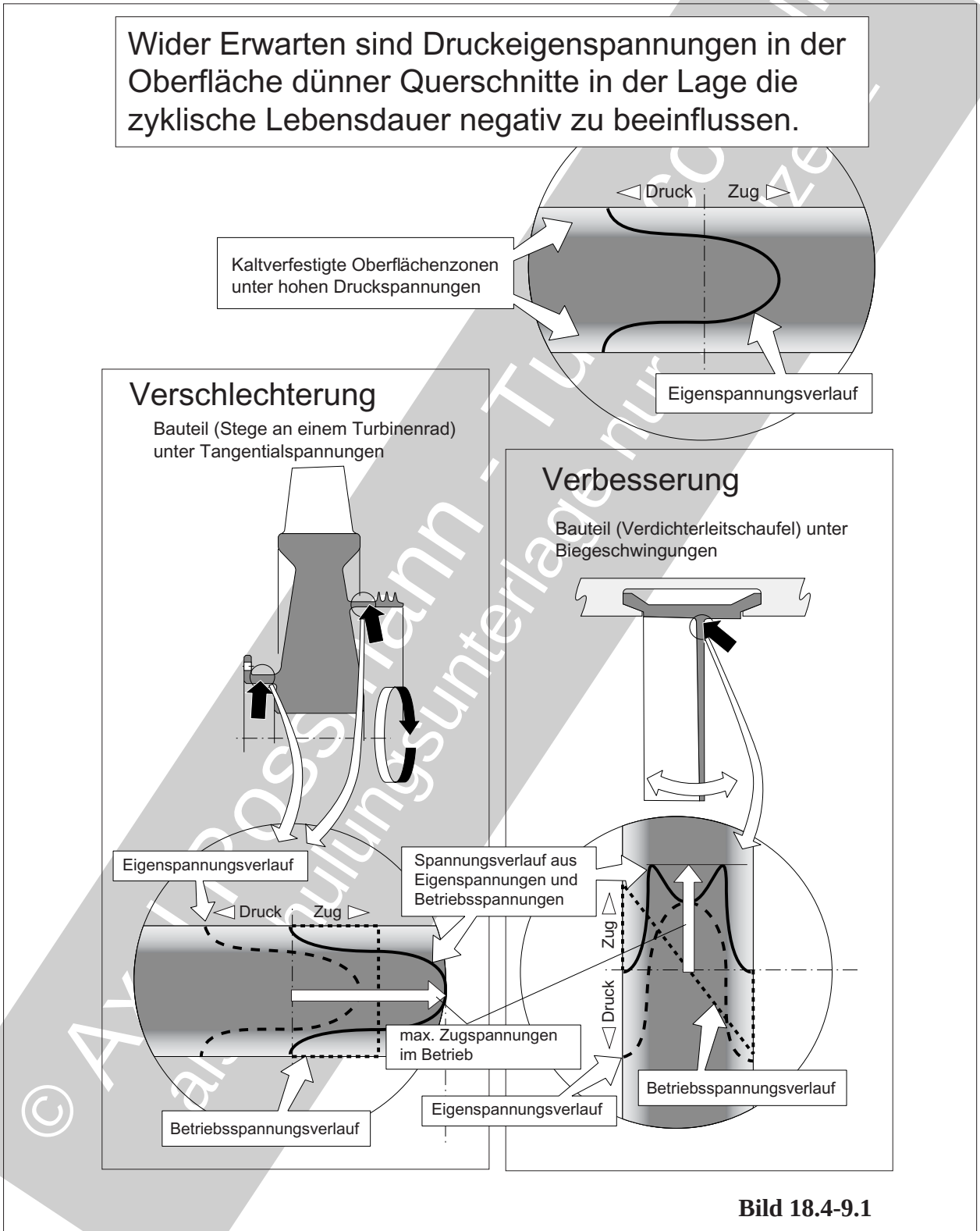


Bild 18.4-9.1

Rahmen) die unter einer Tangentialspannung stehen, ist das der Fall. Ähnliche Verhältnisse liegen für die ***Biegung dicker Querschnitte*** *vor. Auch sie weisen einen sehr flachen Spannungsverlauf auf (Bamd 3, Bild 12.2.1.6-7). Typisch sind Anrisse unter der Oberfläche bei Einsatzhärtungen und Nitrierschichten.*

Die Biegung dünner Querschnitte wie dem Blatt einer Verdichterschaufel (rechter Rahmen), führt dagegen zu einem steilen Spann-

Fertigung: Eigenspannungen

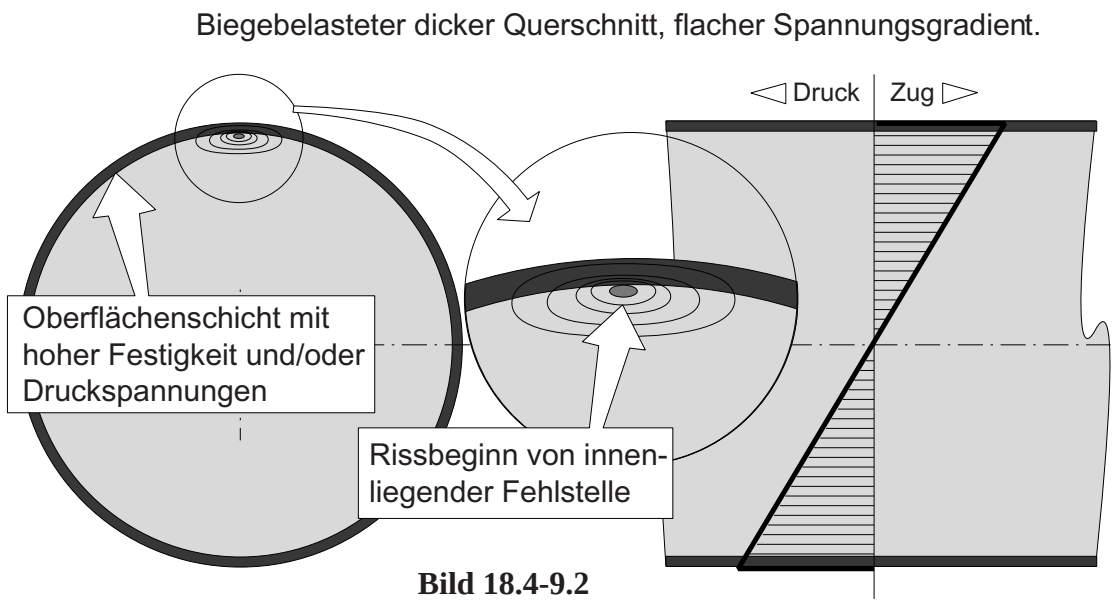


Bild 18.4-9.2

ungsgradienten. Dieser Zugspannungsanteil aus der Betriebsbelastung wird von den Druck-Eigenspannungen an der Oberfläche für die Schwingfestigkeit günstig abgebaut.

Bild 18.4-9.3: *Druckspannungen an der Oberfläche stehen mit entsprechenden Zugspannungen darunter im Gleichgewicht. An* ***Kanten*** *dürfte dieser Effekt, ähnlich wie in dünnen Querschnitten (Bild 18.4-5.5), besonders ausgeprägt sein. Werden diese Zugeigen-*

Auch für Druckeigenspannungen gilt: Viel bringt nicht immer viel. Das scheint sich beim Überstrahlen der Kanten von Schaufelnuten zu bestätigen.

Bild 18.4-9.3

© Axel Hausmann Schulungsunterlagen

spannungen von Zugspannungen aus dem Betrieb überlagert, ist mit einem deutlichen Absinken der Schwingfestigkeit unterhalb der Druckspannungszone zu rechnen. Eine solche Situation besteht für die Kanten von Scheibennuten, die unter einem hohen Tangentialspannungsniveau stehen. Das würde die ***besondere Empfindlichkeit überstrahlter Nutkanten*** *erklären. Bereits kleine Beschädigungen wie* ***PSEFs (Strahlüberlappungen)*** *oder Grate (****Elephant Tails****) können dann offenbar LCF-Risse leichter auslösen (Band 3, Bild 12.2.1.6-15).*

Bild 12.2.2.4-10: *Die Phasen Rissentstehung, Risswachstum und Restbruch (Diagramm oben links) können von Eigenspannungen entscheidend beeinflusst werden. Im Folgenden werden Schwingrisse beispielhaft betrachtet.*

Rissentstehung: *Ursache für einen Schwingriss ist eine* ***Fehlstelle****, d.h. die Schwingfestigkeit liegt unter den Auslegungsdaten, oder eine* ***Überlastung****. In einem solchen Fall kann der Riss an einer* ***Schwachstelle*** *beginnen, deren Einfluss in der Auslegung berücksichtigt wurde. Ob es sich um eine Schwachstelle oder eine Fehlstelle handelt, z.B. im Fall eines Kratzers, hängt nicht zuletzt vom Eigenspannungszustand ab. Liegen ausreichend hohe Zugspannungen, z.B. aus einem Schleifprozess vor, kann es früh zum Risswachstum kommen. Wirken dagegen ausreichend Druckspannungen, tritt auch an einer Fehlstelle kein Riss auf (Band 3, Bild 12.2.1.6-5), weil Schwingermüdung eine ausreichend hohe Zugphase benötigt. Üblicherweise erfolgt ein merkliches Risswachstum erst nach einer gewissen Inkubationszeit. In dieser Phase können plastische Verformungen im Mikrobereich Eigenspannungen im Gefüge und/oder um die Fehlstelle bilden (Eigenspannungen II. und III. Art, Bild 18.4-1) die das merkliche Risswachstum nach der Inkubationszeit einleiten. Unter LCF-Beanspruchung beginnt im Extremfall der Rissfortschritt beim ersten Lastwechsel. In diesem Fall ist keine Inkubationszeit vorhanden. Unterhalb einer bestimmten Fehlstellengröße bzw. Risslänge (Grenzlänge, engl. Threshold) ist abhängig von der Belastungshöhe nicht mit einem Rissfortschritt zu rechnen (Diagramm oben rechts). Treten jedoch im Mikrobereich um die Fehlstelle ausreichend hohe Zugeigenspannungen auf, die sich unter dynamischer Belastung bilden (Band 1, Bild 5.4-2), können auch Risse unter der Grenzlänge wachstumsfähig werden (Diagramm oben rechts). Wichtig für die Wachstumsfähigkeit von Fehlstellen sind Lage, Richtung und Gradient einwirkender Eigenspannungen. Wachstumsfähige Fehlstellen werden von Zugeigenspannungen begünstigt. Hierzu gehören Korrosionsanrisse (Spannungsrisskorrosion) und Wasserstoffversprödung. Bei Wasserstoffversprödung werden um Inhomogenitäten hohe Zugeigenspannungen II. und III. Art induziert (Band 1, Bild 4.3-15). Diese können nach einer Inkubationszeit Mikrorisse auslösen, von denen ein Schwingbruch ausgeht.*

Stabiler Rissfortschritt: *Es handelt sich um einen Rissfortschritt (zyklisch, kriechen) bevor es zum Restgewaltbruch kommt. Ein spontanes Versagen tritt also nicht auf. Die Fortschrittsgeschwindigkeit wird von Eigenspannungen deutlich beeinflusst. Entstehen im Bereich eines Kerbgrunds plastische Dehnungen unter Zugbeanspruchung, folgen bei der Entlastung Druckeigenspannungen. Diese verzögern anfangs einen Rissfortschritt. Zugeigenspannungen können auch von einer Rissbildung abgebaut werden, was einen Rissfortschritt verzögert. Dieses Verhalten lässt sich an* ***Thermoermüdungsrissen*** *gut beobachten (Band 1, Bild 5.4.2.1-2).*

Instabiler Rissfortschritt/Gewaltbruch: *Versprödung eines Werkstoffs verkürzt die kritische Risslänge, d.h. kürzere Risse lösen bereits den Bruch des Teils aus. Ausreichend hohe Makroeigenspannungen können bei sprödem Werkstoffverhalten einen Gewaltriss bis zum Bruch auslösen.*

© Axel Possmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Eigenspannungen

Wie Eigenspannungen die Schwingrissbildung und damit die Bauteillebensdauer beeinflussen.

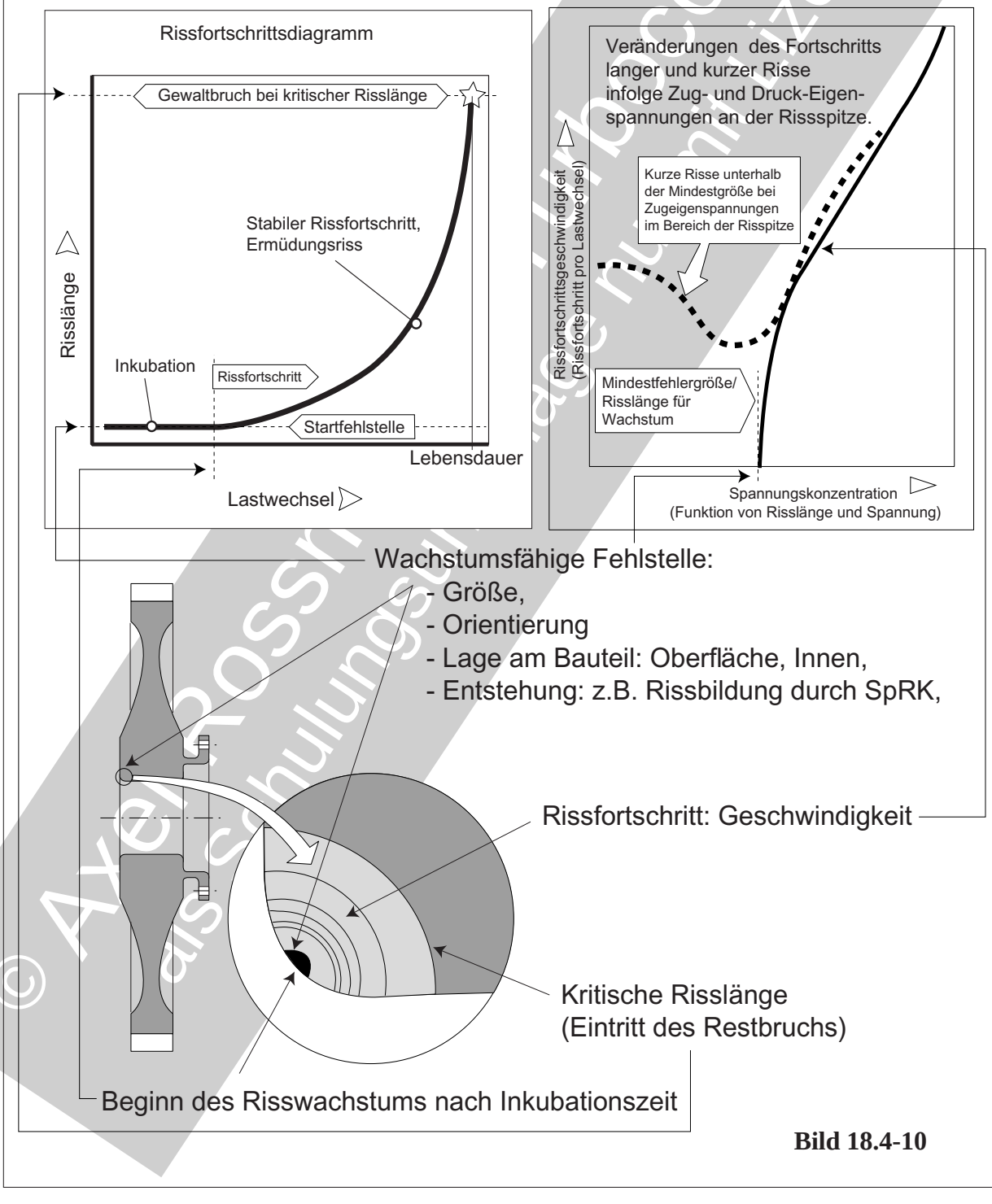


Bild 18.4-10

© Axel Rossmann Turbocomplt als Schulungsumlage nur mit Lizenz

Druckeigenspannungen sind für ein sicheres Bauteil von großer Bedeutung. Sie wirken sich auf unterschiedliche Art günstig aus

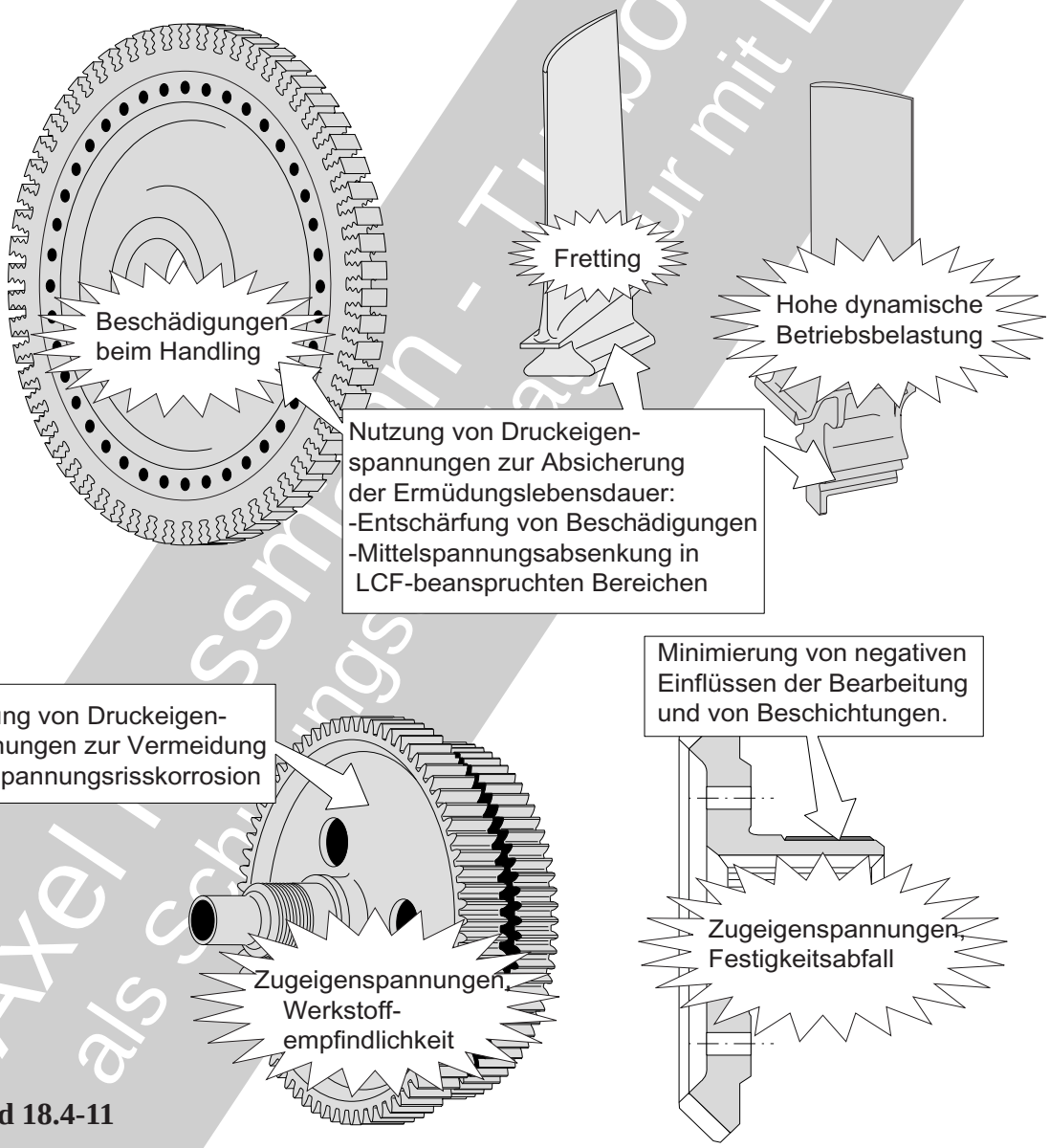


Bild 18.4-11

© Axel Nissmann - Turbo Consult
als Schulungsmaterial nur mit Lizenz

Bild 18.4-11: *Druckeigenspannungen können auf unterschiedliche Weise das* ***Bauteilverhalten sicherer*** *machen:*

- Anheben der nutzbaren Schwingfestigkeit: *Dieser Effekt wird mit dem* ***Absenken der Mittelspannung*** *bei Betriebsbelastung erzielt (Bild 12.2.2.4-4).*
Das gilt nicht nur für den Oberflächenbereich der z.B. einer Kugelstrahlbehandlung unterzogen wurde. Auch auf dicke Querschnitte, wie die Nabe von Rotorscheiben, lässt sich das Prinzip der Absenkung der Mittelspannung anwenden. Unter der Fliehkraft eines ***Überdrehzahlschleudern*** *lässt sich die besonders hoch belastete Nabe gezielt plastisch dehnen. Nach der Entlastung herrschen hier entsprechende Druckeigenspannungen (Bild 18.4-6). Baut* ***Kriechen*** *notwendige Druckeigenspannungen ab, sind diese erneut einzubringen. Ein typischer Fall sind* ***Schwalbenschwanzverbindungen*** *in Verdichtern und die relativ heißen Tannenbaumfüße in der* ***Turbine.*** *Hier ist eine regelmäßige* ***„Regeneration“*** *mit Kugelstrahlen bei der Überholung vorzusehen.*

- Schutz vor betriebsbedingten Schädigungen *wie Zonen unter* ***Schwingverschleiß*** *(****Fretting****, Band 3, Bild 12.2.1.6-8). Dabei kann die Oberfläche von Verschleißkerben, eingedrücktem Abrieb und Mikrorissbildung geschädigt werden. So ist ein inakzeptabler Abfall der Schwingfestigkeit möglich. Besonders* ***Titanlegierungen*** *sind für diese Art der Schädigung empfindlich (Band 1, Kapitel 5.9.3).*

- „Entschärfen“ von Oberflächenbeschädigungen: *Ein solcher Effekt ist bei Druckspannungen zu erwarten, die tiefer als die Oberflächenschädigung wirken.*
Damit sinkt die Gefahr einer von Oberflächenbeschädigungen ausgehenden Rissbildung an hoch beanspruchten Bauteilen wie Rotorkomponenten. Beispiele sind bei Handling, Lagerung oder Montage auftretende Kerbstellen wie Kratzer und Riefen.

- Druckeigenspannungen verhindern Spannungsrisskorrosion: *Weil ausreichend hohe Zugeigenspannungen eine Voraussetzung für Spannungsrisskorrosion (SpRK) sind, wirken Druckeigenspannungen schützend. Dies ist der Hauptgrund, warum zu brünierende Zahnräder kugelgestrahlt werden müssen. Das Brünierbad löst bei ausreichenden Zugeigenspannungen SpRK in Form der sog. „Laugensprödigkeit“ aus (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-11).*

- Gewährleistung eines definierten Oberflächenzustands: *Das gezielte Einbringen von Druckeigenspannungen mit Hilfe einer Verfestigung wie dem Kugelstrahlen ermöglicht einen definierten Oberflächenzustand. Bereits geringfügige Abweichungen der Parameter spanender Bearbeitung können zu unerwünschten Zugeigenspannungen führen (Bild 18.4-5.1). Für die Bauteilsicherheit ist es aber von großer Bedeutung, dass der Oberflächenzustand dem der Proben entspricht, die zur Ermittlung der Auslegungswerte dienten. Beschichtungen mit gefährlichen Zugspannungen (z.B. Cr-Schichten) erfordern bei Zutritt des Brünierbads durch Risse eine Kugelstrahlbehandlung des Grundmaterials. So lässt sich SpRK unter der Schicht verhindern (Bild 18.4-13).*

- Galvanische und chemische Beschichtungen *weisen hohe Zugeigenspannungen auf (Bild 18.4-5.6). Ziel ist es, einen unakzeptabel großen Schwingfestigkeitsabfall (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-2) zu verhindern. Dazu werden vor dem Beschichten oder, in vielen Fällen besser, nach dem Beschichten Druckspannungen mit Kugelstrahlen in das Grundmaterial und/oder in die Beschichtung eingebracht.*

Bild 18.4-12: *Eigenspannungen aus dem Fertigungsprozess können in sehr unterschiedlicher Weise schädigen bzw.* ***Schäden*** *auslösen. Risse können sowohl während dem Fertigungsprozess als auch danach auftreten. Diese Möglichkeit besteht während der Lagerung als verzögerte Rissbildung (Bild 18.7-8) oder*

© Axel Grossmann - TurboConsult
als Schulungsunterlage in Lizenz

unter Betriebseinflüssen. Solche Schäden stehen sehr häufig im Zusammenhang mit Zugeigenspannungen.

Rissbildung durch Relaxation (engl. Stress Relief Cracking): *Während einer Wärmebehandlung können in verformungsbehinderten Bereichen wie Kerben Zugeigenspannungen durch Rissbildung abgebaut werden, wenn die Kriechdehnung nicht zur Entlastung ausreichte.*

Schwingfestigkeitsabfall: *Erhöhen Zugeigenspannungen die Mittelspannung merklich, fällt die nutzbare Schwingfestigkeit ab (Bild 18.4-4).*

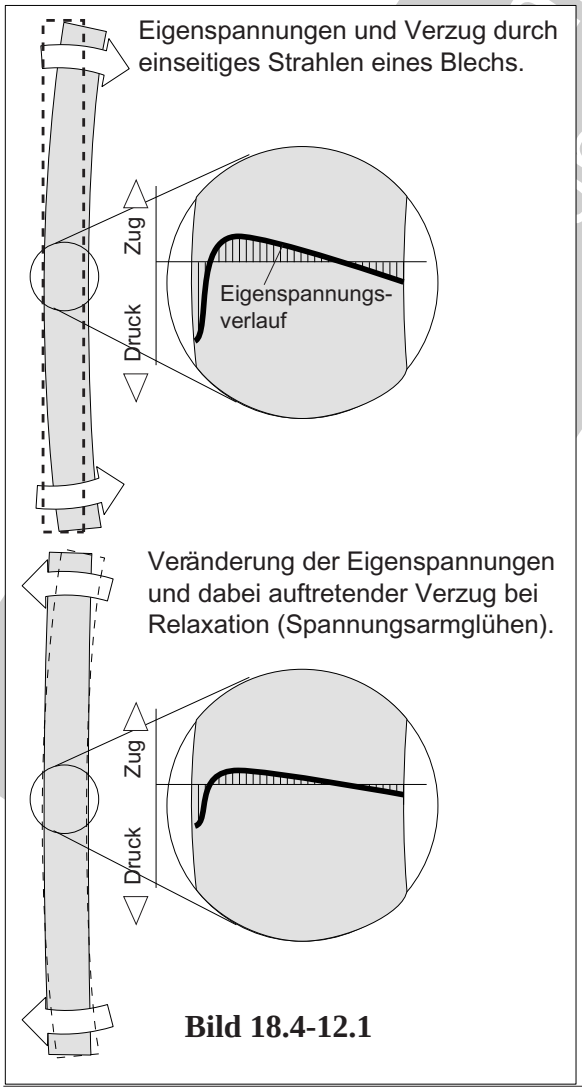


Bild 18.4-12.1

Verzug: *Wird das Gleichgewicht der Eigenspannungen und inneren Momente gestört, verformt sich das Bauteil bis ein neuer Gleichgewichtszustand hergestellt ist. So ist ein Verzug bei Relaxation bzw. beim Spannungsarmglühen ein Erfolgshinweis (Bild 18.4-15.1).*

Rissbildung unter Schichten: *Für Cr-Schichten sind Risse auf Grund hoher Zugeigenspannungen typisch. Unterhalb dieser Schichten kann Spannungsrisskorrosion im Grundmaterial ausgelöst werden. Das ist der Fall, wenn die Rissbildung in der Cr-Schicht den Zutritt eines Korrosionsmediums (Brünierbad, Bild 18.4-13 und Band 3, Bild 12.2.1.8-3) ermöglicht. Unterstützend wirken Zugeigenspannungen aus einem Schleifprozess.*

Wasserstoffversprödung: *Wasserstoffatome im Metallgitter diffundieren in Richtung ansteigender Zugspannungen. Im Fall von Schweißungen kommt es häufig zur verzögerten Rissbildung. Besonders gefährlich ist Feuchtigkeit in Kontakt mit dem Schmelzbad (Bild 18.4-13 und Band 3. Bild 12.2.1.3-18). In dünnen einsatzgehärteten Querschnitten wie kleinen Zahnradzähnen (Band 3, Bild 12.2.1.8-5) stehen Zugspannungen im Kern mit hohen Druckspannungen in der Härteschicht im Gleichgewicht (Bild 18.4-5.5). Im Härteprozess eindiffundierter Wasserstoff löst unter diesen Zugspannungen im Kern Rissbildung aus.*

Spannungsrisskorrosion *(SpRK): Ist die Voraussetzung eines für ein Medium empfindlichen Werkstoffs gegeben, lösen ausreichend hohe Zugspannungen SpRK aus. Typisches Beispiel sind mit Halogenen verschmutzte Titanbauteile im Bereich von Schweißungen (Bild 18.3-16 und Band 3, Bild 12.2.1.7-8) oder Schmiedeeigenspannungen.*

Haftfestigkeitsabfall und Ablösung von Beschichtungen: *Hohe Zugeigenspannungen wie sie auf Grund unterschiedlicher Wärmedehnung zwischen keramischen Wärmedämm-*

Turboconsult
Unterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Eigenspannungen

Unerwünschte Auswirkungen von Eigenspannungen aus dem Fertigungsprozess.

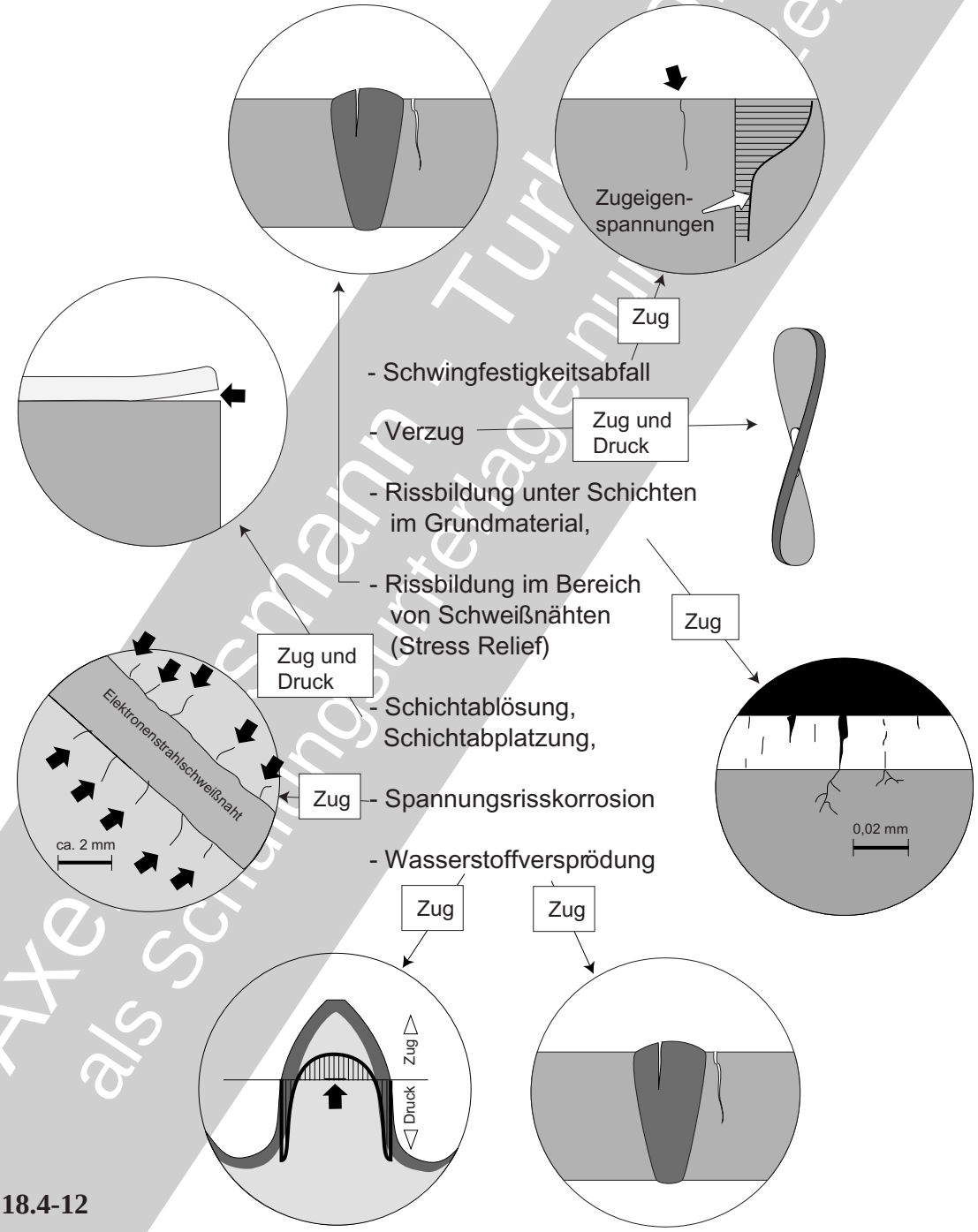


Bild 18.4-12

schichten und dem Grundmaterial auftreten, können zur Rissbildung quer zur Schicht (Segmentierungsrisse, Band 3, Bild 12.2.1.8.2-3 und Bild 12.2.1.8.2-4) und/oder Ablösung der Schicht an den Kanten führen.

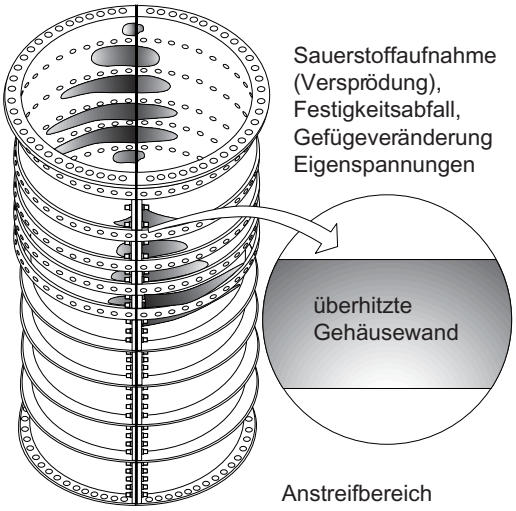
Auch zu hohe ***Druckeigenspannungen*** *können sich schädigend auswirken. Auf* ***konvexen Flächen*** *bringen sie Schichten zum Abheben (Bild 18.8-4.3).*

© Axel Hermann - Turbomilit
als Schulungsunterlage nur zu Lehrzeiten

Gefahren durch Eigenspannungen.

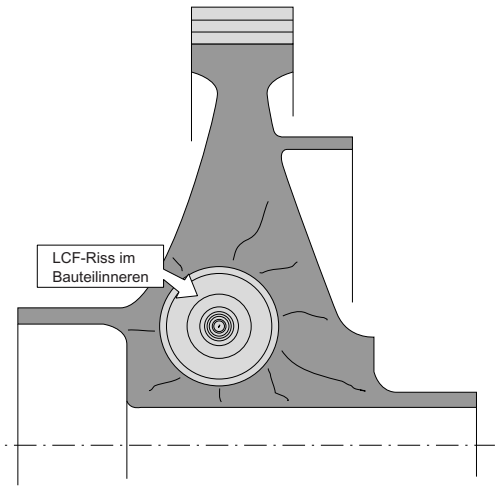
Verzug

Anstreifen eines Verdichtergehäuses durch den Verzug der Neuteile beim ersten Start.



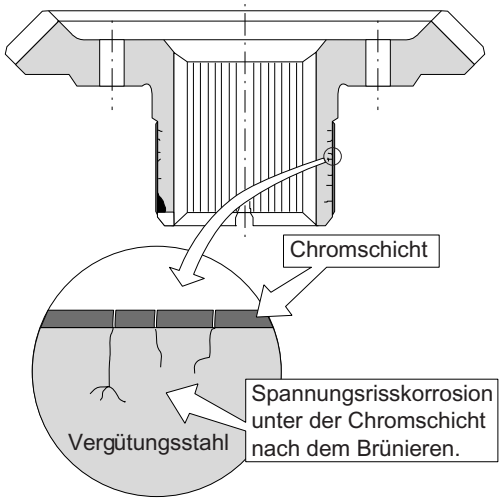
Schwingermüdung im LCF-Bereich

Schwingriss in einem Turbinenrad, unterstützt durch hohe Eigenspannungen.



Spannungsrisskorrosion

Risse in der Schleiffläche eines Zahnrads durch hohe Zugeigenspannungen beim Brünieren.



Wasserstoffversprödung und verzögerte Rissbildung.

Reparaturschweißungen eines Verdichteraustrittsgehäuses.

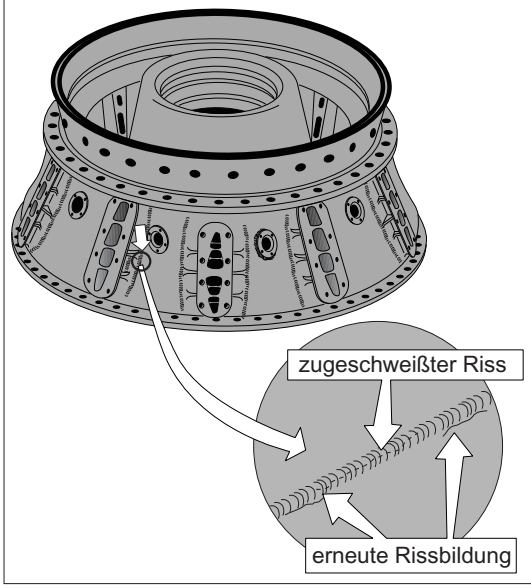


Bild 18.4-13

Fertigung: Eigenspannungen

Bild 18.4-13: *Fertigungsbedingte Eigenspannungen können die* ***Betriebseigenschaften*** *der Bauteile gefährlich beeinflussen. Wie folgende Beispiele zeigen:*

Gehäuse*:* ***Längsgeteilte Verdichtergehäuse*** *eines Wellenleistungstriebwerks aus einer hochfesten Titanlegierung zeigten nach dem ersten Hochfahren unzulässig starke* ***Anstreifspuren****. Im Bereich der Längsflansche (Skizze oben links) waren Überhitzungsmerkmale mit* ***Anlauffarben*** *und* ***Versprödung*** *erkennbar, die eine Weiterverwendung ausschlossen. Die Anstreifvorgänge wurden von einem Verzug ausgelöst, der offenbar auf frei werdende Eigenspannungen in den Neuteilen zurückzuführen war. Diese standen anscheinend mit der Zerspanung der äußeren Kontur in Zusammenhang. Der Anstreifvorgang lief unter den von den Wärmespannungen verstärkten Verformungen selbstverstärkend ab. Erst eine gezielte* ***Kugelstrahlbehandlung der Flanschzonen*** *konnte das Problem entschärfen.*

Die Skizze rechts unten zeigt ein aus Stahlblech und Schmiedeteilen ***geschweißtes Gehäuse,*** *wie in älteren Triebwerkstypen üblich. Die Schmelze nahm* ***aus feuchter Umgebungsatmosphäre Wasserstoff*** *auf. Das führte in Kombination mit hohen Zugeigenspannungen im Bereich der Schweißnaht zu verzögerter* ***Rissbildung*** *(Bild 18.4-12).*

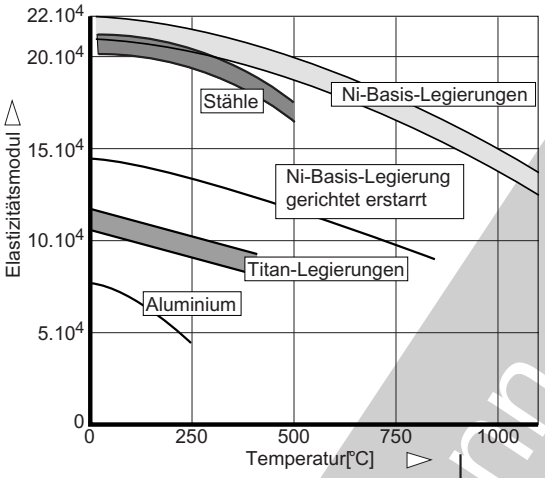
Turbinenrad: *Der* ***im Inneren liegende LCF-Anriss*** *führte in einem zyklischen Schleuderversuch zum Bersten einer Scheibe aus hochwarmfester Schmiedelegierung (Skizze oben rechts). Die innere Risslage weist auf hohe* ***Zugeigenspannungen im Querschnitt*** *hin. Der Schmiedeprozess und/oder eine zu hohe Abkühlgeschwindigkeit können im heißeren inneren Teil solche Zugspannungen induzieren. Es ist anzunehmen, dass sie mit* ***Druckspannungen im Bereich der Oberfläche*** *im Gleichgewicht standen. Sie schützten offenbar die Oberfläche vor einem Anriss. Eigentlich war dieser auf Grund der Auslegung von hier zu erwarten. Eine festigkeitsoptimale Glühtemperatur und die extreme Warmfestigkeit erlaubten es anscheinend nicht, die Eigenspannungen ausreichend abzubauen.*
Einen weiteren, durchaus vergleichbaren Fall der Schmiedeeigenspannungen zugerechnet wird zeigt Band 3, Bild 11.2-19. Es handelte sich um den Betriebsbruch von Fanscheiben aus einer Titanlegierung.

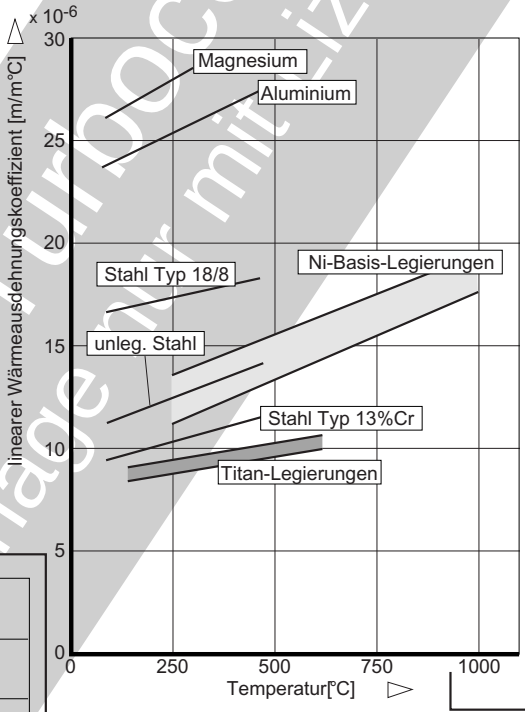
Zahnräder: *Hohe Zugeigenspannungen in geschliffenen Gleitflächen von Dichtungen und in Lagesitzen lösten beim* ***Brünieren von Zahnradwellen Spannungsrisskorrosion*** *aus (Skizze unten links). Die Risse entstanden unterhalb der üblicherweise rissigen Cr-Schicht (Band 3, Bild 12.2.1.8-3). Auch im Bereich unbeschichteter zerspanter Oberflächen mit hohen Zugspannungen, insbesondere in Vielkeilverzahnungen, wurden Brünierrisse beobachtet, die auch zu Radbrüchen führten (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-11).*
Bild 18.4-14: *Das am häufigsten angewandte Verfahren um Eigenspannungen abzubauen ist eine* ***Glühbehandlung****. Damit ist jedoch ein* ***vollkommener Spannungsabbau, also ein Spannungsfreiglühen nicht möglich****.*
Beim Spannungsarmglühen wird das Bauteil auf eine Temperatur gebracht, bei welcher die Fließgrenze des Werkstoffs bereits möglichst weit abgefallen ist (Diagramm unten, Lit. 18.4-9). Man geht davon aus, dass die plastische Verformung beim ***Überschreiten der Fließgrenze bzw. einer Dehngrenze*** *(Kriechgrenze, Bild 18.4-15.1)* ***für die Eigenspannungen ursächliche elastische Dehnungen abbaut****. Mit* ***steigender Warmfestigkeit*** *steigt somit das nach der Glühbehandlung* ***verbleibende Eigenspannungsniveau****. Die maximale Temperatur darf jedoch den* ***Werkstoff nicht schädigen****. Die Anlasstemperatur vergüteter Stähle darf nicht überschritten werden, weil sonst die Festigkeit bleibend abfällt. Hochlegierte Stähle können bei einer ungünstigen Glühtemperatur* ***korrosionsempfindlich*** *(****Sensibilisierung*** *für*

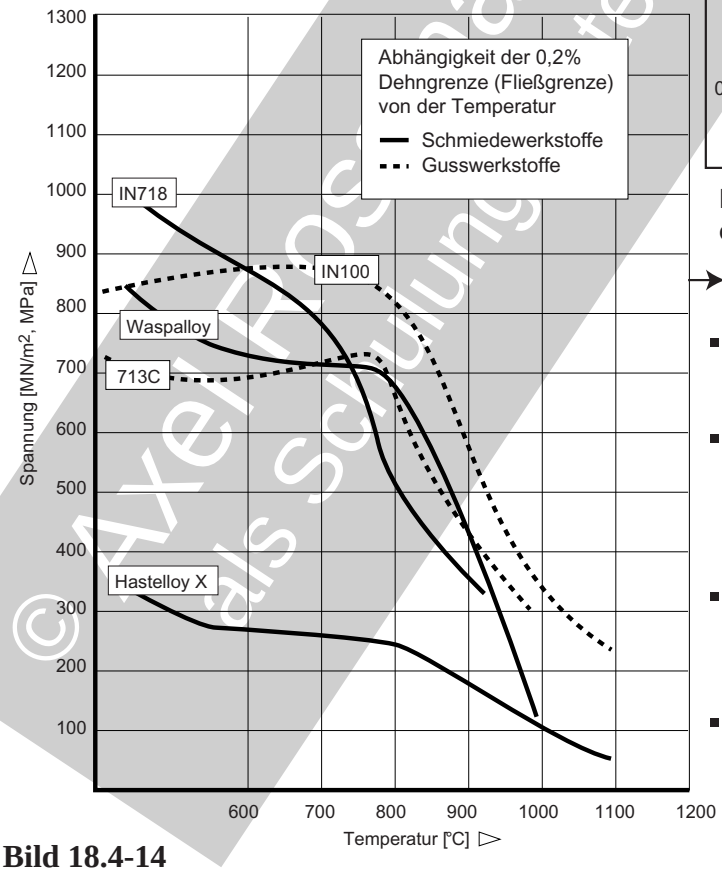
Fortsetzung Seite 18.4-31

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

"Spannungsfrei Glühen" ist nicht möglich, jedoch ein "spannungsarm Glühen". Das heisst ein Rest an Eigenspannungen bleibt.







Einflüsse auf den Spannungsabbau durch Glühen:

→ **Abbau wird unterstützt:**

- Festigkeit fällt ab: Spannungsabbau entsprechend dem Abfall der Dehngrenze.
- Längere Glühzeit: Kriecheffekt bzw. Relaxation

Abbau kann behindert werden:

- Elastizitätsmodul fällt ab: Eigenspannungsabsenkung bei Temperatur und Wiederanstieg beim Abkühlen.
- Wärmedehnungskoeffizient steigt an: Temperaturgradienten beim Aufheizen und Abkühlen begünstigen die Bildung von Eigenspannungen beim Glühen

Bild 18.4-14

© Axel Rossmann - Turbocoupling
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Eigenspannungen

Fortsetzung von Seite 18.4-29

Korngrenzenangriff) werden, niedriglegierte Stähle können ***verspröden****. Glühtemperaturen von Nickellegierungen werden von unzulässigen Gefügeveränderungen wie die Beeinflussung von Aushärtungsphasen, thermomechanisch erzielter Festigkeitseigenschaften und Kornwachstum bestimmt. Gewöhnlich benötigen hochwarmfeste Werkstoffe wie Scheibenwerkstoffe ein besonders optimiertes Gefüge. Das grenzt Glühtemperatur und Glühzeit ein. Somit besteht die* ***Gefahr hoher, nicht entfernbarer Eigenspannungen*** *(Bild 18.4-13).*

Eigenspannungen sind nach Möglichkeit bereits im Produktionsprozess der ***Rohteil- bzw. Halbzeugherstellung*** *zu minimieren. Dringend ist die* ***Bestimmung unvermeidlicher Eigenspannungen auch im Querschnitt von Ausfallmustern*** *zu empfehlen. Gegebenenfalls müssen diese Ergebnisse in* ***Festigkeitsauslegung*** *einfließen.*

Scheinbar kleine Besonderheiten der Rohteilherstellung können das Eigenspannungsniveau bedenklich beeinflussen. So ist verständlich, wenn ein optimierter Herstellungsablauf, insbesondere der Halbzeugherstellung, den ***Wechsel des Lieferanten*** *(z.B. aus Kostengründen oder Lieferfähigkeit)* ***ohne eine eingehende Zulassungsprozedur verbietet****.*

Der ***Abbau der Eigenspannungen hängt entscheidend von der Glühzeit ab****. Dabei wird nicht die Kurzzeitdehnung wie beim Warmzugversuch genutzt, sondern das Kriechen. Der Dehnungsmechanismus wird bei Kriechverformung als* ***Relaxation*** *bezeichnet (Bild 18.4-15.1 und Bild 18.4-16).*

Die Steifigkeit eines metallischen Werkstoffs bzw. dessen ***Elastizitätsmodul fällt*** *üblicherweise mit der Temperatur ab (Diagramm oben links). Dies führt dazu, dass bei Glühtemperatur Dehnungen niedrigeren Eigenspannungen entsprechen. Beim Abkühlen von der Glühtemperatur steigen dann die verbliebenen Resteigenspannungen mit dem E-Modul wieder an. Deshalb ist es nicht möglich, die Eigenspannungen im abgekühlten Bauteil auf das Niveau bei Glühtemperatur zu senken.*

Mit steigender Temperatur ***erhöht sich der Wärmeausdehnungskoeffizient*** *(Diagramm oben rechts). Damit können sich Wärmespannungen aus Temperaturgradienten beim Aufheizen auf Glühtemperatur und beim Abkühlen unerwartet deutlich bemerkbar machen. Ein zu* ***schnelles Abkühlen****, besonders* ***dicker Querschnitte*** *und/oder von Bauteilen mit* ***Querschnittssprüngen,*** *induziert in kälteren oberflächennäheren Zonen Zugspannungen. Diese stehen mit Druckspannungen im heißeren Inneren im Gleichgewicht. Je nach Spannungshöhe und -verlauf kann es zu plastischen Verformungen kommen. So sind in der, bei Temperatur gedehnten Oberfläche nach dem Abkühlen Druckspannungen,* ***im Querschnittsinneren dagegen Zugspannungen*** *zu erwarten. Diese Zugspannungen können* ***innen liegende Ermüdungsanrisse*** *(LCF, Bild 18.4-13) begünstigen.*

Weniger heikel ist ein zu ***schnelles Aufheizen****. Haben dabei Wärmespannungen zu plastischen Verformungen geführt, dürfte Relaxieren während der anschließenden Glühzeit die Situation entschärfen. Denkbar ist jedoch, dass sich* ***Spannungsverlauf und Spannungsrichtung*** *der Resteigenspannungen von den ursprünglichen Eigenspannungen unterscheidet. Natürlich sind die Wärmespannungen in der Aufheiz- und Abkühlphase unterhalb einer Rissbildung zu halten.*

Die ***Glühzeit ist in jedem Fall so zu wählen, dass sich eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung einstellen kann****. Das kann, querschnittsabhängig, kostspielig lange Glühzeiten erfordern.*

© Arbeitsmappe Technische Universität Clausthal Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit

***Bild 18.4-15.1: Eigenspannungen können mit einer Glühung abgebaut werden, indem es zum plastischen Fließen** kommt. Man nutzt dazu die sog. **Relaxation** (Bild 18.4-14). Es handelt sich um einen zeitabhängigen **dehnungsgesteuerten Vorgang**. Dafür müssen die Eigenspannungen ausreichend hoch, bzw. die Festigkeit des Werkstoffs bei Glühtemperatur niedriger als die Eigenspannungen sein. Weil die **Festigkeit mit der Temperatur werkstoffabhängig abfällt** (Band 1 Bild 5.3.2-2 und Bild 5.3.2-4) können die Eigenspannungen bei den Glühtemperaturen deutlich reduziert werden. Bei **kurzen Glühzeiten** bestimmt die **Fließgrenze** das Niveau der verbleibenden Eigenspannungen (obere Kurve). Während längerer Glühzeiten kriecht der Werkstoff (Band 1 Bild 5.3.2-3). Hier ist die **Kriechgrenze** für die verbleibenden Eigenspannungen verantwortlich.*

Mit steigender Glühzeit senkt Kriechen das Eigenspannungsniveau deutlich unter die Fließgrenze bei Glühtemperatur ab.

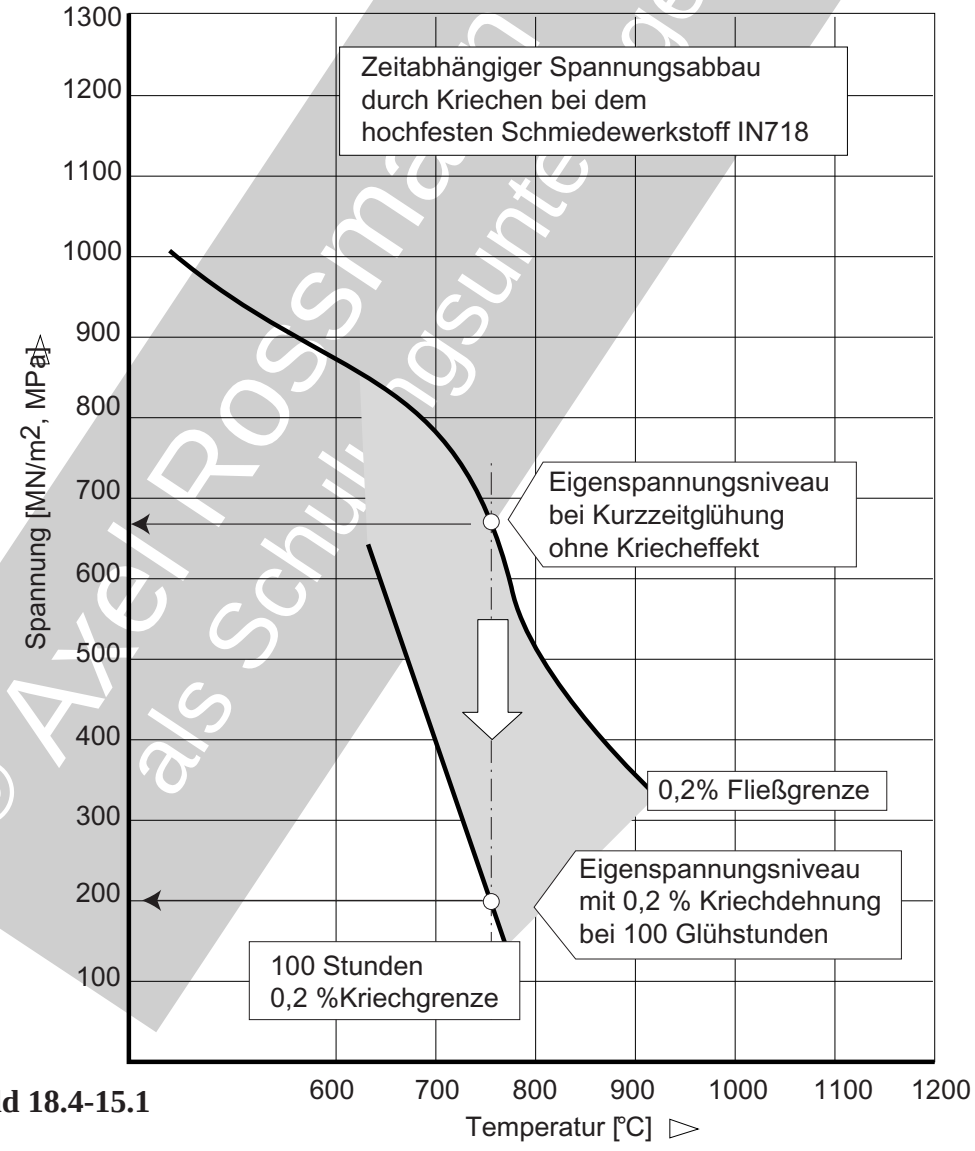


Bild 18.4-15.1

© Axel Rossmann - Carboconsult als Schulungsunterlage mit Lizenz

Diese lassen sich so ***deutlich unter die Fließgrenze absenken*** *(untere Kurve). Gewöhnlich dient die* ***Warmfließgrenze****, also die Fließgrenze bei erhöhter Temperatur, als* ***Grenzwert*** *für die Höhe der möglichen Resteigenspannungen nach der Wärmebehandlung.*
Das Diagramm zeigt, dass die entscheidende Einflussgröße auf die Festigkeit bzw. den Beginn merklicher plastischer Verformung die ***Glühtemperatur*** *ist. Befindet man sich im, bei vielen warmfesten Werkstoffen ausgeprägten,* ***Steilabfall,*** *bedeutet bereits eine wenig angehobene Glühtemperatur einen sehr deutlichen Eigenspannungsabbau. Leider kann die Glühtemperatur nicht beliebig hoch angesetzt werden. Insbesondere die hochfesten Schmiedewerkstoffe des Triebwerksbaus erfahren sonst unzulässige Festigkeitseinbußen durch Gefügeveränderungen (Bild 18.4-14).*
Das Diagramm zeigt dies am Beispiel des hochfesten wärmebeständigen geschmiedeten Scheibenwerkstoffs IN 718. Mit relativ hohen verbleibenden Eigenspannungen ist bei kurzer Glühzeit, in der es zu keiner merklichen Kriechverformung kommt, zu rechnen. Natürlich ist die Glühzeit nicht zuletzt eine Kostenfrage. Verlängere ich jedoch die Glühzeit, können die Eigenspannungen durch Relaxation (Bild 18.4-16) auf einen Bruchteil (Pfeil) abgebaut werden.
Ist die maximale Glühtemperatur nicht ausreichend um das Eigenspannungsniveau wunschgemäß zu reduzieren, bleibt nur die Verlängerung der Glühzeit.
Durch ausreichende Glühzeiten lassen sich also die Resteigenspannungen deutlich unter die Warmfließgrenze senken*.*

Bild 18-15.2 *(Lit. 18.4-20): Dieses Diagramm einer hochfesten* ***Titanlegierung*** *zeigt den Abfall der mit verfestigenden Verfahren eingebrachten* ***Druckeigenspannungen*** *bei Temperatur. Auf der Abszisse ist der Larson- Miller-Parameter aufgetragen. Er fasst den kombinierten Zeit-Temperatureinfluss auf das Kriechen zusammen. Man erkennt, dass niedrigere Druckspannungen erst bei höheren Temperaturen oder längeren Zeiten so deutlich abfallen wie hohe Druckspannungen, die bereits im Bereich der Fließgrenze liegen dürften.*
Daraus ist zu schließen, dass bei Betriebstemperaturen anfangs hohe Druckeigenspannungen wie sie für ein Kugelstrahlen der Schaufelfüße üblich sind, schnell abgebaut werden. Dieser Abbau verlangsamt sich jedoch und dürfte sich nach einer gewissen Zeit so weit stabilisieren, dass auch die heute üblichen langen ***Überholintervalle*** *ohne Nachstrahlen möglich werden.*

Abfall von Druckeigenspannungen aus einer Oberflächenverfestigung durch Einwirkung von Temperatur und Zeit (Spannungsarmglühen).

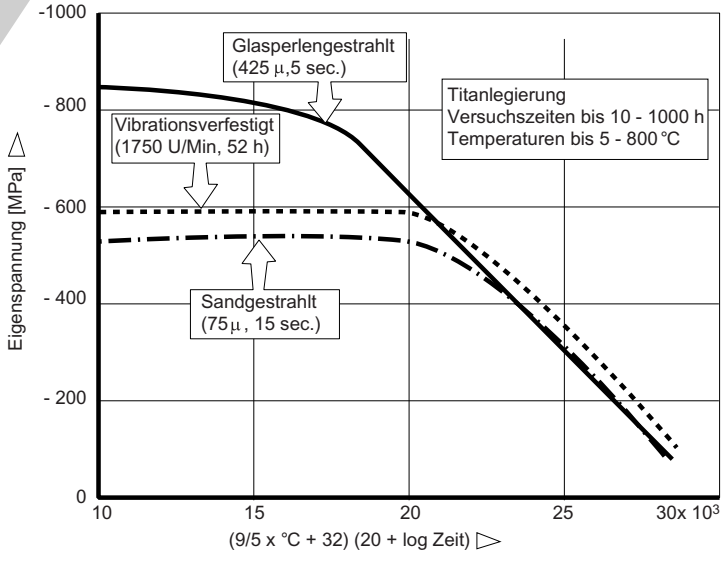


Bild 18.4-15.2

© Arnold Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Der Eigenspannungsabbau beim Spannungsarmglühen erfolgt als Relaxation, ein Kriechvorgang.

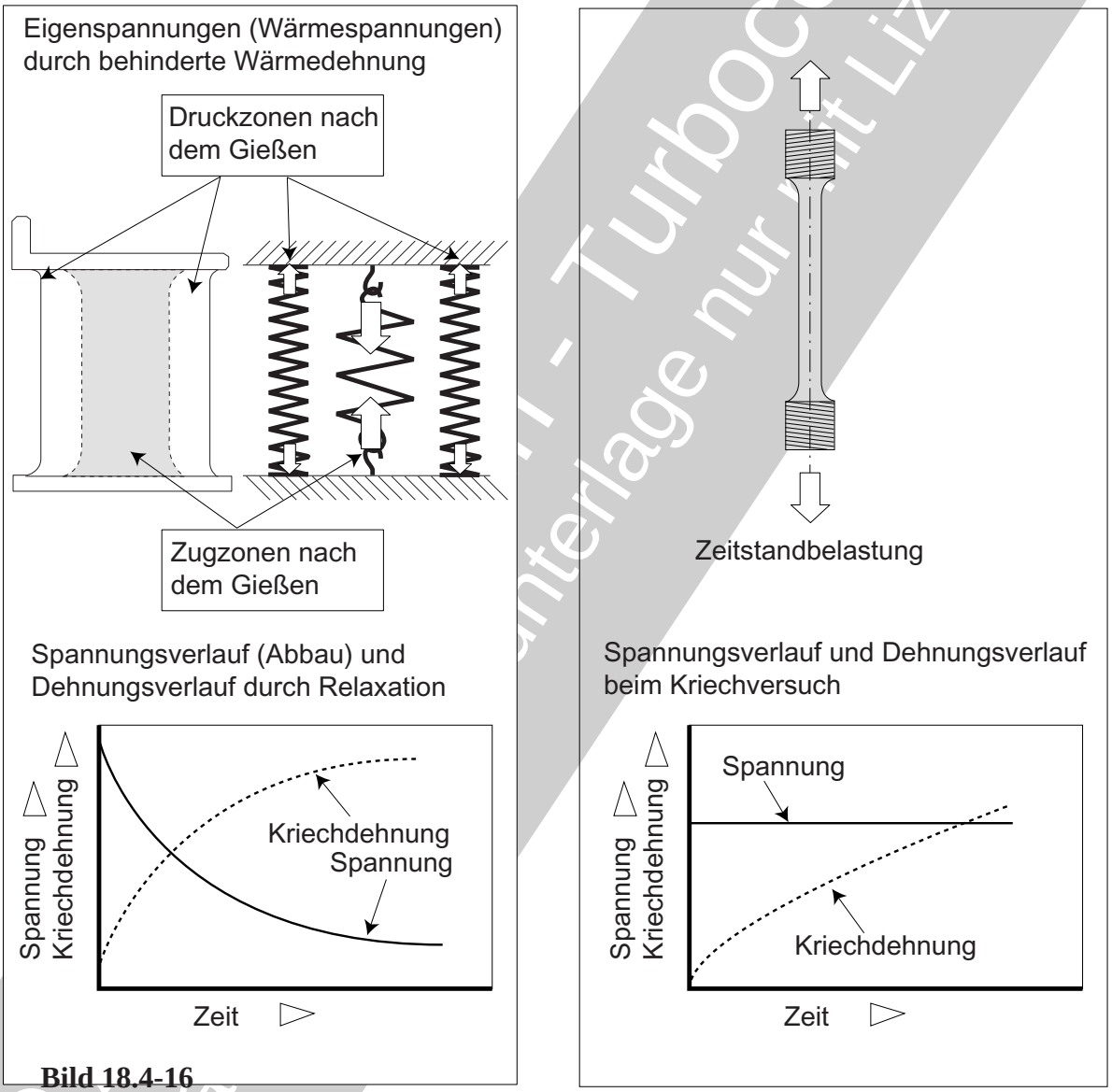


Bild 18.4-16

Bild 18.4-16: *Der* ***Eigenspannungsabbau beim Spannungsarmglühen*** *erfolgt gewöhnlich nicht in einem kurzzeitigen Vorgang, dem Warmzugversuch vergleichbar, sondern durch* ***Kriechen****. Man bezeichnet diesen Vorgang als* ***Relaxation****.*

Relaxation tritt in geschlossenen Systemen wie ***dehnungsbehinderten*** *Strukturen mit* ***Eigenspannungen*** *auf. Jedes homogene Bauteil wie eine Turbinenschaufel oder Scheibe kann in diesem Sinn als* ***geschlossenes System*** *betrachtet werden. Auch geschlossene Systeme aus mehreren gegeneinander verspannten Einzelkomponenten können relaxieren. Es kann sich um Schrumpfverbindungen oder verspannte Wärmebehandlungsvorrichtungen zur Minimierung des Verzugs von Bauteilen handeln. Der Begriff Relaxation wird auch für die Be-*

schreibung des Abfalls einer Schraubenvorspannung bei erhöhter Temperatur über längere Zeiten, mit Belastungen unterhalb der Fließgrenze (Kurzzeitwert), verwendet (Lit. 18.4-10).

In der Skizze links oben ist am Beispiel einer Turbinenleitschaufel der Relaxationsvorgang erklärt. Angenommen im Schaufelblatt traten beim Gießen nach dem Erstarren an den schneller abkühlenden Kanten hohe Zugspannungen mit plastischen Dehnungen auf. Nach der Abkühlung sind dann in den Kanten Druckeigenspannungen vorhanden. Diese stehen mit Zugeigenspannungen im dickeren, langsamer abgekühlten Schaufelquerschnitt im Gleichgewicht.

Kommt es nun beim Glühen des Gussteils zur plastischen Verformung, verringert sich die elastische Dehnung, die innere Spannung wird abgebaut (Bild 18.4-15.1). Entsprechend ***verlangsamt sich die Kriechdehnung*** *(Diagramm unten links). Es liegt also nicht wie bei einem Zeitstandversuch (Skizze rechts) eine gleichbleibende Spannung vor, die eine ansteigende Kriechdehnung zur Folge hat.*

Bild 18.4-17: *Um das auslegungsgemäße Betriebsverhalten eines Bauteils zu gewährleisten, muss der Einfluss von Eigenspannungen beherrscht werden. Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen:*

- ***Begrenzung oder Abbau unerwünschter*** *(meist Zug-)* ***Eigenspannungen:*** *Meist handelt es sich um eine Wärmebehandlung bzw. ein Spannungsarmglühen (Bild 18.4-16, Skizze Mitte rechts).*

- ***Begrenzung des Aufbaus von Eigenspannungen beim Fertigungsprozess:*** *Mit einer Erprobung und Optimierung lässt sich ein Fertigungsprozess bezüglich der entstehenden Eigenspannungen optimieren. Beispiele sind zerspanende Verfahren oder Beschichtungen (z.B. thermisches Spritzen, galvanisches Abscheiden). Um die Reproduzierbarkeit dieses Eigenspannungszustands zu gewährleisten, sind selbstverständlich alle relevanten Verfahrensparameter festzuschreiben und einzuhalten.*

- ***Einbringen definierter erwünschter (Druck)-Eigenspannungen*** *mit Verfahren zur Oberflächenverfestigung wie Kugelstrahlen, Aufdornen oder Rollen.*

Eine weitere Möglichkeit besteht in einer Überlastung durch äußere Kräfte. Wird eine Bauteilzone plastisch verformt, z.B. gedehnt, treten nach der Entlastung an dieser Stelle Druckeigenspannungen auf (Skizzen oben). Beim Überdrehzahlschleudern nutzt man diesen Effekt, um im Nabenbereich von Scheiben Druckeigenspannungen zu induzieren (Bild 18.4-6). Kaltrichten wirkt nach dem gleichen Prinzip. Mit plastischem Biegen wird ebenfalls ein Eigenspannungszustand mit Hilfe örtlicher plastischer Verformung induziert oder überlagert. Dabei tritt der Effekt der ***Rückfederung*** *auf (Bild 18.4-5.10).*

Mit Hilfe von Wärmespannungen (Skizze Mitte links) lässt sich zum Richten ein Eigenspannungszustand geeignet verändern. Man nutzt dafür einen großen Temperaturgradienten mit plastischer Verformung im Bereich behinderter Dehnung. Typische Beispiele sind örtliche Wärmespots auf einer Blechplatte.

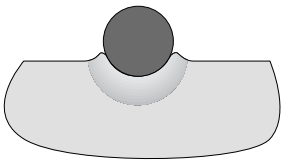
In der Skizze unten links hat eine unsymmetrische Eigenspannungsverteilung Verzug ausgelöst, beispielsweise mit einseitigem Verfestigen oder einseitiger Beschichtung einer dünnen, flächigen Bauteilzone. Ein solcher Verzug lässt sich vermeiden, wenn die Behandlung symmetrisch erfolgt (Skizze unten rechts).

© Axel Possmann - Turbconsult
als Schulungsunterlage ohne Lizenz

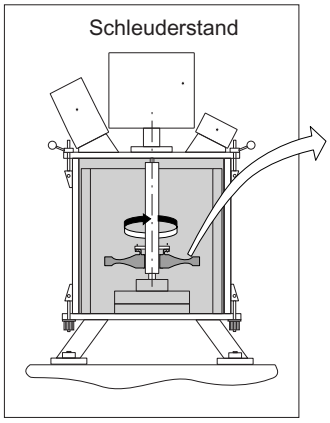
Abbau unerwünschter Eigenspannungen, Aufbau erwünschter Eigenspannungen.

Plastische Verformung

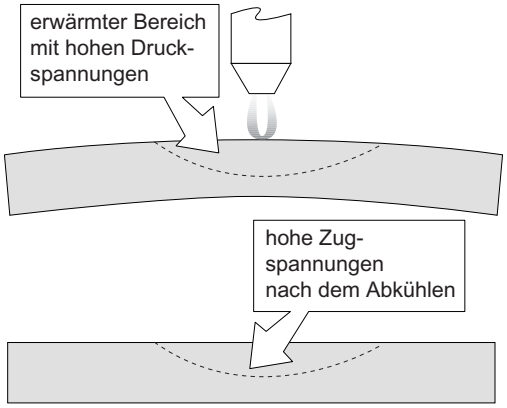
Kugelstrahlen/Rollen



Überdrehzahlschleudern

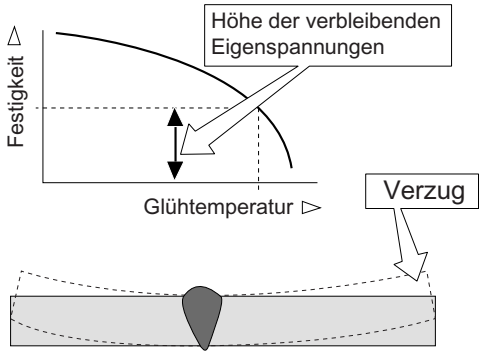


Richten durch örtliche Erwärmung



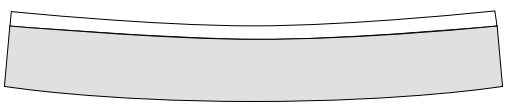
Zeitweiser Festigkeitsabfall

Wärmebehandlung / Spannungsarmglühen



Entfernen von Bauteilzonen

- Beschichtung entfernen
- Verformungsfreies Abtragen



Symmetrische Eigenspannungen zur Verzugsminimierung einbringen.

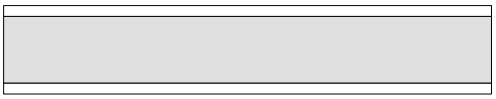


Bild 18.4-17

Bildbeschreibung vorhergehende Seite.

Fertigung: Eigenspannungen

Mit geeigneter Gestaltung lassen sich Schäden durch Eigenspannungen begrenzen oder vermeiden. Beispiel: Chargiergestell für Wärmebehandlung

- **Elastisches Verhalten:** Gleichmäßig dünne Querschnitte, möglichst keine Verformungsbehinderung, nachgiebige Gestaltung.
- **Vermeidung von Temperaturgradienten:** Dünne Querschnitte,keine Querschnittssprünge, keine örtliche Wärmezu- oder abfuhr. Möglichst auf der gesamten Oberfläche Zugang der Ofenatmosphäre und Wärmestrahlung.
- **Symmetrische Anordnungen:** Möglichst in allen Symmetrieebenen.

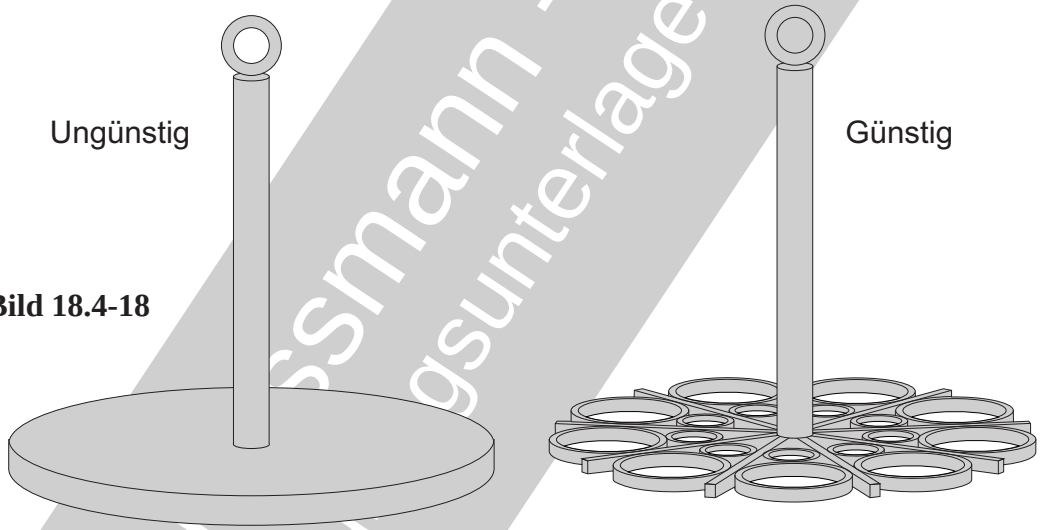


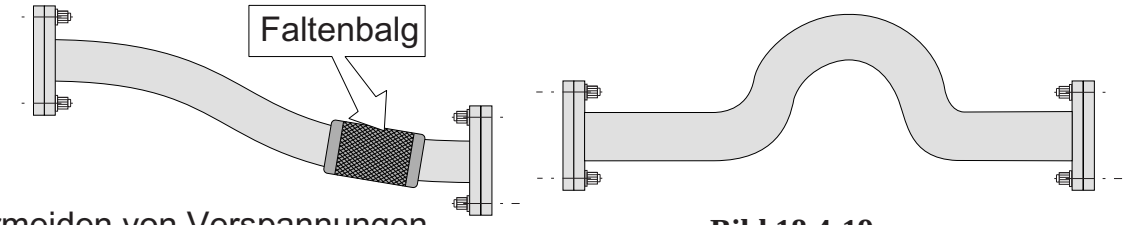
Bild 18.4-18

Bild 18.4-18: *Der Konstrukteur kann mit zielgerichteter Gestaltung eines Bauteils dessen* ***Lebensdauer*** *entscheidend verlängern. Solche Bedingungen treten bei großen Temperaturgradienten und entsprechend hohen, als Eigenspannungen anzusehenden* ***Wärmespannungen*** *auf. Typisches Beispiel sind* ***Chargiergestelle****, wie sie zum Einbringen der Werkstücke in einen Wärmebehandlungsofen dienen. Die häufigen Thermozyklen führen erfahrungsgemäß zu lebensdauerbestimmendem Verzug und Rissbildung in den Böden. Je massiver diese gestaltet sind (Skizze links), umso intensiver sind Eigenspannungen und Rissbildung.*

Ein deutlich besseres Verhalten zeigen dagegen „filigrane“ elastische Strukturen (Skizze rechts). Deren dünne Querschnitte heizen sich schnell auf und kühlen entsprechend schnell ab, ohne schädigende Thermogradienten im Querschnitt. Zusätzlich versetzt sie die Elastizität in die Lage, Wärmespannungen elastisch nachzugeben. So können sich Eigenspannungen nicht schädigend aufbauen. Die durchbrochene Struktur ermöglicht der Ofenatmosphäre und der Strahlung den Zugang zu den Teilen. Damit können diese eine ausreichend gleichmäßige Aufheizung erhalten. Eine symmetrische Anordnung der Struktur erschwert einseitigen Verzug, der auch die aufliegenden Teile beeinflussen könnte.

© Axel Hassmann - Turbocomputer
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Eigenspannungen treten auch innerhalb eines geschlossenen gebauten Systems auf. Mit maßlich passenden Bauteilen und/oder elastischen Konstruktionen lassen sie sich minimieren.



Vermeiden von Verspannungen

Bild 18.4-19

Bild 18.4-19: *Auch in geschlossenen gefügten Systemen wie* ***Rohrleitungen*** *kann es zu bedenklichen Eigenspannungen kommen. Sie setzen die nutzbare Schwingfestigkeit herab. Typische Ursachen sind:*

- ***Verspannung infolge Maß- und oder Montageproblemen****. Diese können mit Eigenspannungen aus* ***Richtvorgängen*** *der Fertigung und/oder der Montage überlagert sein.*

- ***Verzug unter Betriebsbeanspruchungen*** *wie Wärmedehnung und Betriebsdruck der Rohre.*

Eigenspannungen aus Betriebsbeanspruchung und Verspannungen lassen sich mit einer geeigneten Elastizität der Rohrleitung minimieren. Typische Maßnahmen sind flexible Faltenbälge (Skizzze links) oder Kröpfungen.

Bild 18.4-20 *(Lit 12.2.2.4-3, Lit. 12.2.2.4-11):* ***Spannungsarmglühen*** *beginnt mit dem Erwärmen, dann folgt eine Haltezeit und anschließend die Abkühlung. Spannungen nach dem Aufheizen können sich in der Haltezeit durch Relaxation abbauen (Bild 18.4-16). Eine zu schnelle Abkühlung birgt jedoch die Gefahr erneuter Eigenspannungen. Als Folge der Wärmeabfuhr über die Oberfläche und der Leitung aus dem Querschnittsinneren entsteht zu einem bestimmten Zeitpunkt eine maximale Temperaturdifferenz (Diagramm oben). Überschreiten die dabei auftretenden Wärmespannungen (Diagramm in der Mitte) die Warmfließgrenze (= Warmstreckgrenze) kommt es zu plastischen Verformungen (Skizze unten links). Die relativ dünne Randzone wird im dargestellten Fall plastisch gedehnt. Dies führt während der Abkühlung zu einer Spannungsumkehr. Der gestauchte Kern erfährt Zugeigenspannungen, die mit Druckeigenspannungen der vorher gedehnten Randzone im Gleichgewicht stehen (Skizze unten rechts). Das Spannungsniveau ist nach der Abkühlung höher, weil der E-Modul mit sinkender Temperatur ansteigt.*

© Axel Rossmann - alle Schulungsunterlagen sind urheberrechtlich geschützt

Fertigung: Eigenspannungen

Während einer Wärmebehandlung verändern sich die Eigenspannungen in komplexer Weise.
Hier das Beispiel eines abkühlenden Zylinders.
Spannungsarmglühen sollte langsam ablaufen.

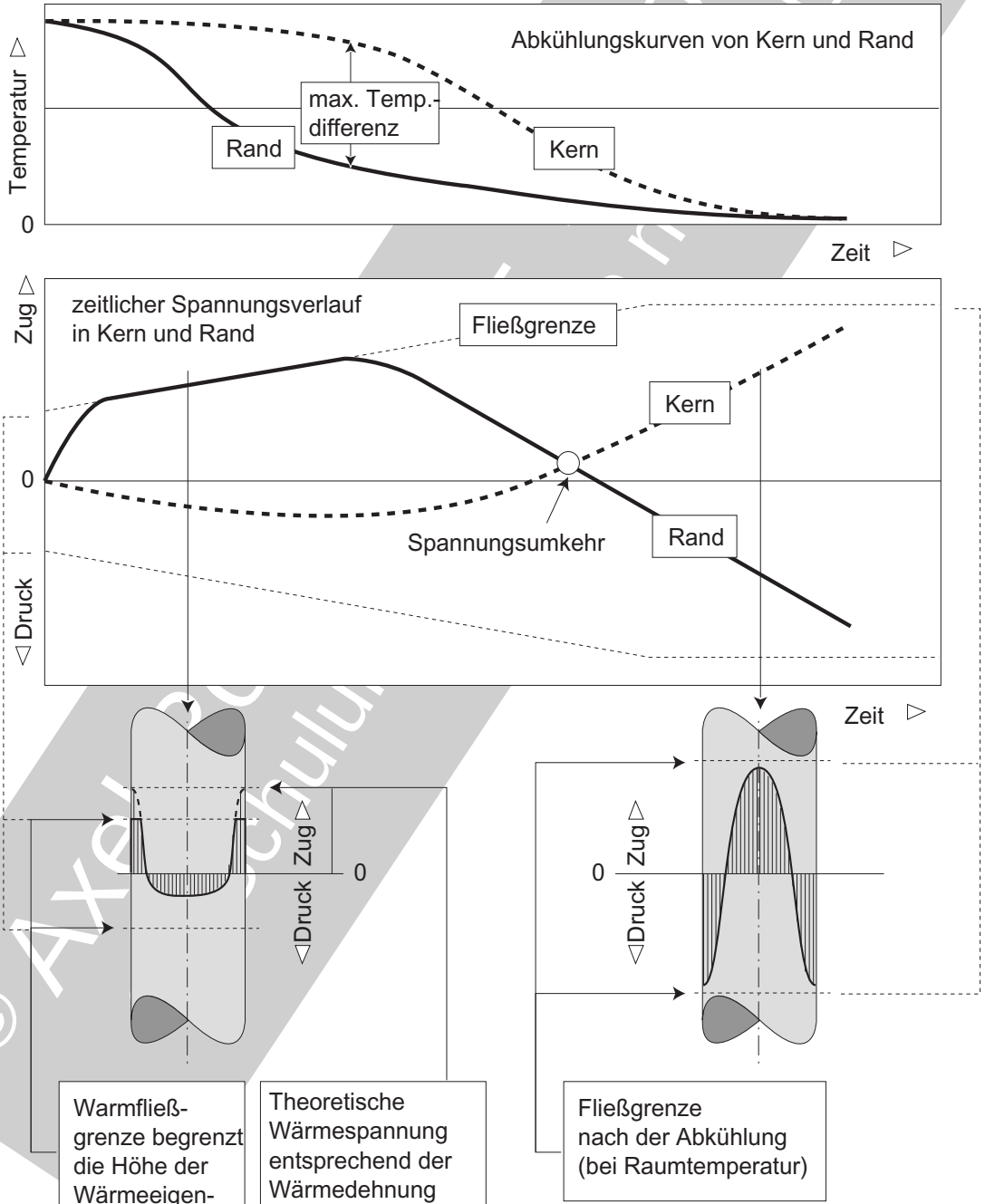


Bild 18.4-20

Bild 18.4-21*(Lit 18.4-2)**: Die Wirkung von Eigenspannungen auf das Betriebsverhalten der Bauteile, sei sie positiv oder schädigend, ist von großer Bedeutung. Das erfordert die* ***Bestimmung der Eigenspannungen****, um das gewünschte Bauteilverhalten zu gewährleisten. Dieses Vorgehen bietet sich zu folgenden Gelegenheiten an:*

- *Überwachung von Fertigungsverfahren,*
- *Optimierung von Fertigungsverfahren und Reparaturen,*
- *Qualitätssicherung,*
- *Verständnis des Bauteilverhaltens,*
- *Auswahl von Verfahren, Werkstoffen, Beschichtungen usw.,*
- *Risikoabschätzungen,*
- *Schadensklärung .*

Praxisrelevante Messmethoden sind:

Röntgenografische Messung: *Genutzt wird die Beugung von Röntgenstrahlen. Damit lässt sich auf den Atomabstand im Metallgitter rückschließen. Die Gitterabstände werden von mechanischen Spannungen beeinflusst und mit einem sog. Goniometer bestimmt. Zugspannungen weiten das Gitter, Druckspannungen verengen es. Leider lassen sich mit diesem zerstörungsfreien Verfahren nur Spannungen in einer 0,01 mm dicken Oberflächenschicht bestimmen. Ist ein Spannungsverlauf über eine größere Tiefe zu ermitteln, muss schrittweise abwechselnd abgetragen und gemessen werden.*
Die ***geringe Messtiefe macht die Ergebnisse schwer interpretierbar****. Gewöhnlich ist bei spanend bearbeiteten Oberflächen mit plastischer Verformung zu rechnen. Es sind also Eigenspannungen in Höhe der Fließgrenze zu erwarten (Bild 18.4-5.1 und Bild 18.4-23). Nicht selten tragen die Messergebnisse zur Verwirrung über eine Aussage zum Betriebsverhalten und Konsequenzen bei.*

Bohrlochmethode *(Skizze oben): Diese Messung erfordert eine kleine (0,8-1,5 mm Durchmesser) Bohrung. Deshalb kann nicht bei fertiger Bauteilkontur von einem zerstörungsfreien Verfahren gesprochen werden. Gewöhnlich wird ein diamantbesetzter „Zahnarztbohrer“ verwendet. Wichtig ist, dass der Bohrvorgang nicht verfälschende Eigenspannungen einbringt. Das erfordert ein vorsichtiges Vorgehen mit geringer Wärmeeinbringung. Dazu arbeitet der Bohrer eher einem Fräser vergleichbar, der in einer Orbitalbewegung die Bohrungswände und den Bohrungsgrund ausarbeitet. Bei einem Spiralbohrer müsste mit unerwünschter Verfestigung und Eigenspannungen an der Bohrerspitze gerechnet werden. Die Bohrung verändert mit der Entnahme von Material das Gleichgewicht der Eigenspannungen im umgebenden Oberflächenbereich. So kommt es zum Spannungsumbau mit messbaren Dehnungen. Dafür werden spezielle Dehnungsmessstreifen verwendet. Ein Messwert erfordert ca. 1 Stunde. Während der Bohrer eindringt, werden die Messdaten schrittweise von einem Computerprogramm ausgewertet. So lässt sich eine Aussage über die Spannungsverteilung in der Tiefe treffen.*

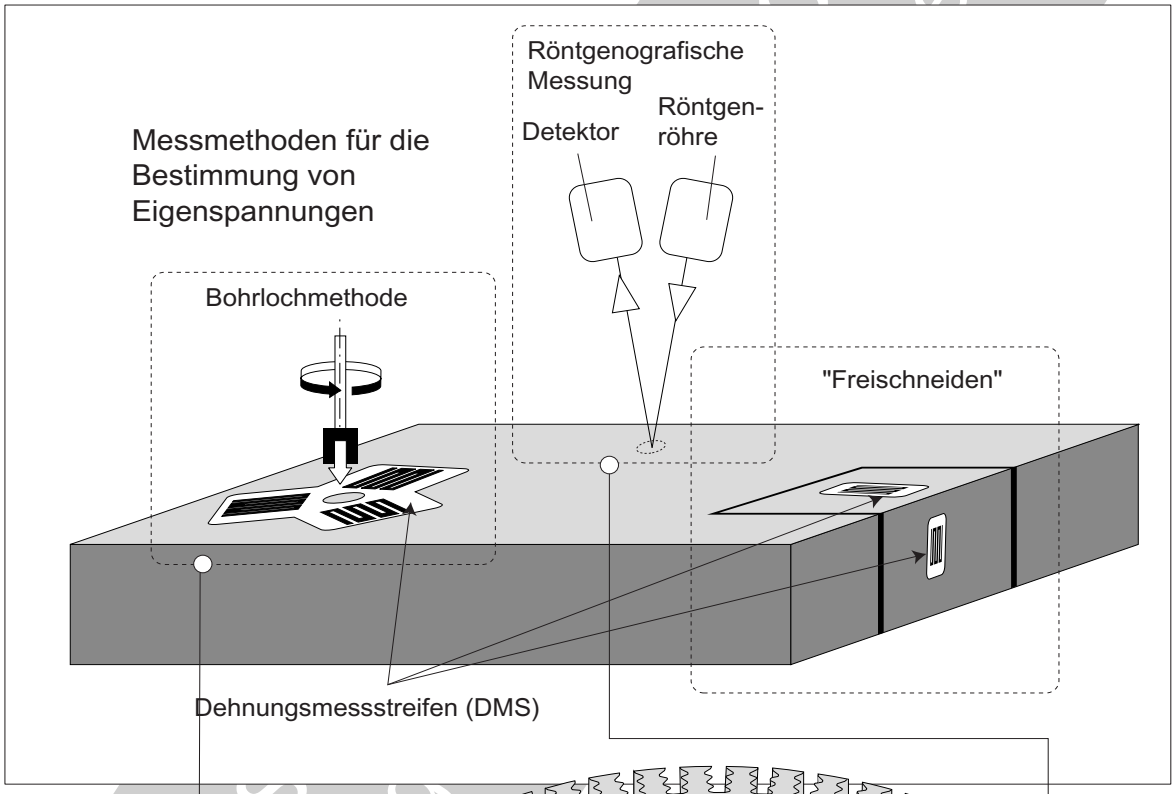
Almenintensität: *Es handelt sich um ein indirektes Messverfahren. Aus dem Verzug (Durchbiegung, Band 3, Bild 12.2.1.6-2) eines einseitig gestrahlten (Kugelstrahlen) Blechplättchens (Skizze unten links) wird die sog. „Strahlintensität“ bestimmt (Lit 18.4-12 und Lit 18.4-13). Das Material des Plättchens ist ein niedrig legierter Stahl und nicht der jeweilige Bauteilwerkstoff. Die Strahlintensität steht im Zusammenhang mit dem Eigenspannungsniveau. Dieses Verfahren ermöglicht es, während des Strahlvorgangs ein Messplättchen an geeigneter, d.h. aussagefähiger Position am Bauteil mitzustrahlen und so den gewünschten Strahleffekt zu dokumentieren.*

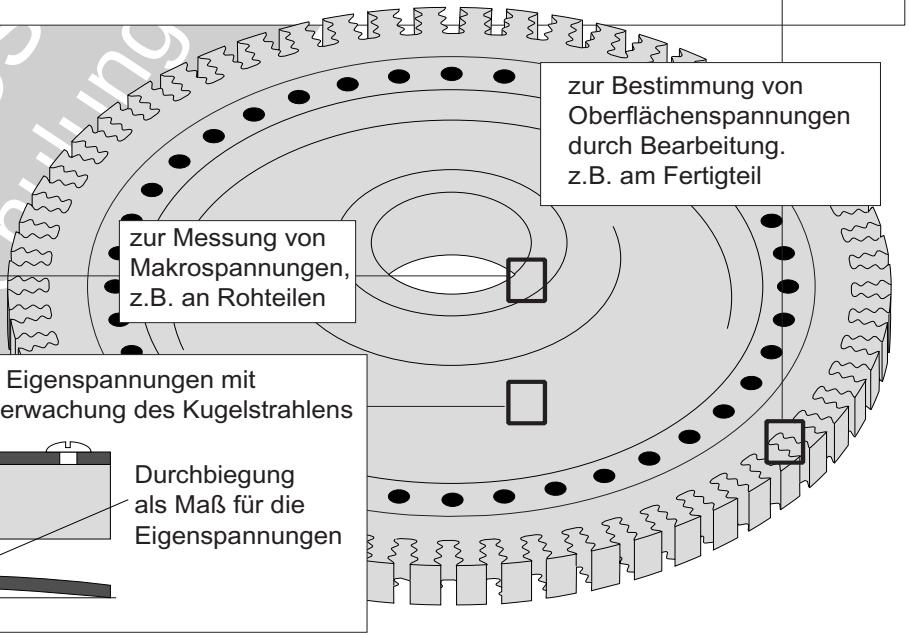
Ein Messverfahren für ***Eigenspannungen in galvanisch und chemisch aufgebrachte Schichten*** *zeigt Bild 18.4-22.*

© Axel Bossmann - Tribosconsult
als Schulungsunterlage nicht zur Verfügung

Fertigung: Eigenspannungen

Eigenspannungen lassen sich messen. Interpretation und Bewertung der Messergebnisse sind *die* "Kunst".

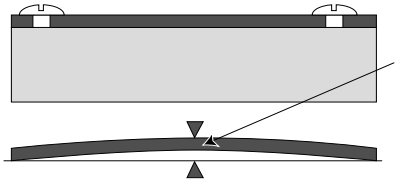




zur Bestimmung von Oberflächenspannungen durch Bearbeitung. z.B. am Fertigteil

zur Messung von Makrospannungen, z.B. an Rohteilen

Indirekte Messung von Eigenspannungen mit Almenplättchen zur Überwachung des Kugelstrahlens



Durchbiegung als Maß für die Eigenspannungen

Bild 18.4-21

© Axel Ros Schulung

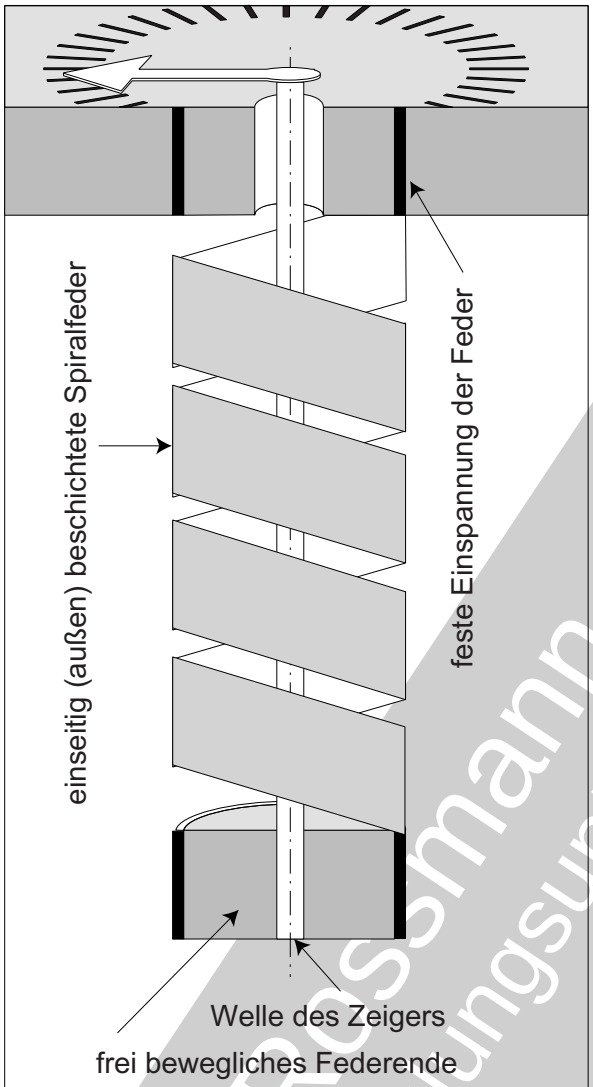


Bild 18.4-22

Bild 18.4-22: *Insbesondere galvanisch abgeschiedene* ***Schichten aus Chrom und Nickel*** *können hohe Zugeigenspannungen aufweisen (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-2). Sie senken die Schwingfestigkeit des Bauteils deutlich ab. Aus dem Gesichtspunkt der Eigenspannungen lassen sich diese Prozesse mit Messverfahren optimieren. Gewöhnlich arbeiten diese Verfahren nach dem Prinzip, dass sich ein einseitig beschichteter, elastischer (dünner) Querschnitt unter den Eigenspannungen der Schicht verformt. Diese Verformung (Biegung, Torsion) wird mechanisch gemessen. Es handelt sich also nicht um eine Messung am Bauteil, sondern um ein indirektes Verfahren für die Optimierung des Beschichtungsprozesses.*
Direkte Messungen am Bauteil sind mit in Bild 18.4-21 beschriebenen Verfahren der röntgenografischen Messung und der Bohrlochmethode, nach dem Beschichtungsprozess durchgeführt, möglich.

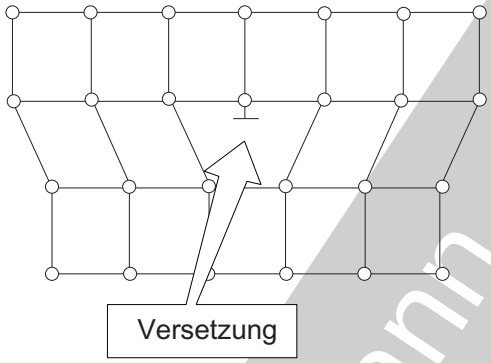
Bild 18.4-23: *Mit einer plastischen Verformung lassen sich* ***Druckeigenspannungen*** *und eine* ***Verfestigung*** *in eine Oberfläche einbringen (Bild 18.4-24). Beide Effekte wirken schwingfestigkeitserhöhend. Der* ***Verfestigungseffekt*** *ist auf Störungen im Atomgitter (****Versetzungen****) zurückzuführen, die mit der plastischen Verformung auftreten (Skizze oben links). Diese Störungen* ***behindern Gleitebenen*** *in denen die plastische Verformung abläuft. Das führt zu einem Anstieg der Fließgrenze (****Kaltverfestigung****) und einer Reduzierung der Zähigkeit. Dieser Effekt lässt sich gut bei einem stufenweisen Zugversuch beobachten (Skizze oben rechts). Das Diagramm zeigt den Verlauf der„wahren“ Spannungs-Dehnungs-Kurven. Dabei wird die Einschnürung während eines Zugversuchs, anders als üblich, berücksichtigt. Das* ***Zusammenwirken von Druckeigenspannungen und Kaltverfestigung*** *zeigt das Diagramm unten rechts (Lit. 18.4-18). Der positive Einfluss auf die Schwingfestigkeit fällt bei Werkstoffen mit ausgeprägter Verfestigung*

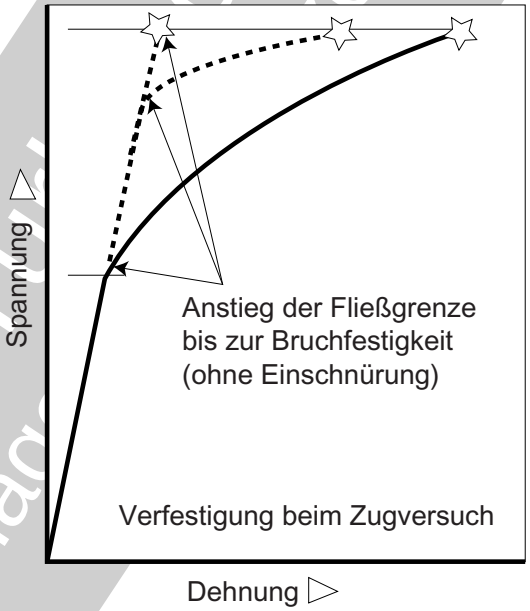
© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage unentgeltlich

Fertigung: Eigenspannungen

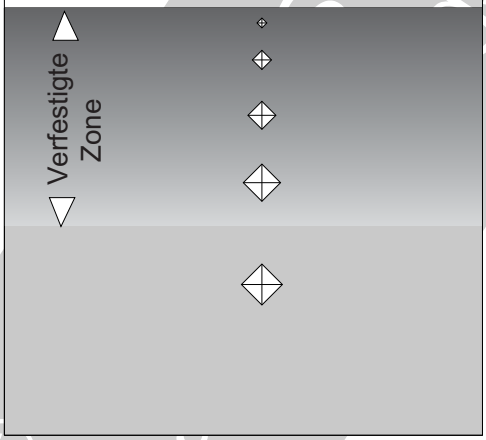
Nicht nur Druckeigenspannungen sondern auch eine Verfestigung erhöht die Schwingfestigkeit.

Die Verfestigung eines metallischen Werkstoffs beruht auf Veränderungen im Metallgitter (Versetzungen), welche die plastische Verformbarkeit (Gleitebenen) blockiert.





Eine Verfestigung kann durch die Messung des Härteverlaufs bestimmt werden.



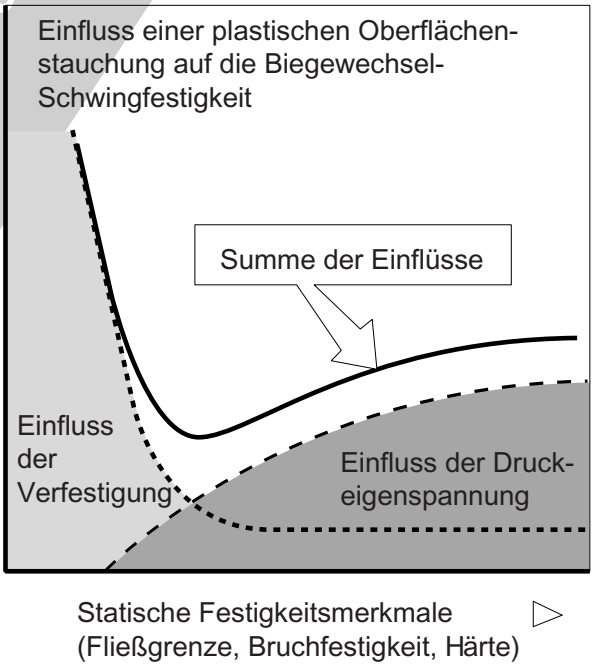


Bild 18.4-23

mit der Festigkeit ab, der Eigenspannungseinfluss nimmt zu. Werkstoffe wie ***Titanlegierungen*** *die relativ wenig kaltverfestigen, profitieren verständlicherweise von Druckeigenspannungen, die eine gezielte Oberflächenverformung (z.B. Kugelstrahlen) einbringt.*

Der ***Nachweis einer Kaltverfestigung erfolgt über eine Mikrohärtemessung****. So lässt sich auch der Verlauf senkrecht zur Oberfläche ermitteln (Skizze links unten).*

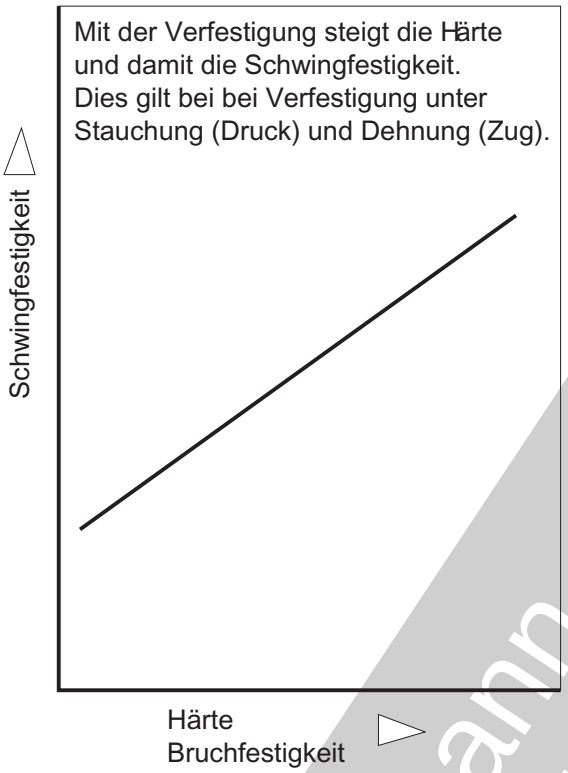


Bild 18.4-24

Bild 12.2.2.4-24: Plastische Verformung verfestigt einen Werkstoff *(Bild 18.4-23). Verfestigend wirkt sowohl eine plastische Stauchung (unter Druck) als auch eine plastische Dehnung (unter Zug). Die Verfestigung zeigt sich in einem Härteanstieg, der in linearem Zusammenhang mit einer Steigerung der Schwingfestigkeit steht (Lit 18.4-19). Damit unterscheidet sich die Verfestigung vom Einfluss der Eigenspannungen. Überwiegt der Eigenspannungseinfluss, heben Druckeigenspannungen die nutzbare Schwingfestigkeit an, Zugeigenspannungen senken sie ab.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 18.4

18.4-1 E. Macherauch, H. Wohlfart, U. Wolfstieg, „Zur zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen“,Zeitschrift „HTM 28“, Heft 3, 1973, Seite 201-211.

18.4-2 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“,Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 102, 103, 108, 212-217.

18.4-3 H.Kloos, „Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen“, Zeitschrift „Werkstofftechnik“, 10.Jahrgang, September 1979, Heft 9, Seite 293-332.

18.4-4 ASM Metals Handbook, Ninth edition, Volume 16, „Machining“, ISBN 0-87170-007-7 (v.1)t , 4. Ausgabe April 1999, Seite 8, 19-36.

18.4-5 ASM Handbook, Volume 6, „Welding, Brazing and Soldering“, ISBN 0-87170-377-7 (v.1)t, 4. Ausgabe April 1997, Seite 1094.

18.4-6 J.Campaigne, „Shot Peening Overview“, Fa. Electronic Inc.January 18, 2001, 1997, Seite 1-34.

18.4-7 T.W.Clyne, S.C.Gill, „Residual Stresses in Thermal Spray Coatings and Their Effect on Interfacial Adhesion: A Review and Recent Work“,Zeitschrift: „Journal of Thermal Spray Technology“, Volume 5(4) December 1996, Seite 401- 417.

18.4-8 A. Buch, „Cr- und Ni-Schichten beeinflussen Dauerfestigkeit“,Zeitschrift: „Maschinenmarkt“, Jahrgang 70 (1970) Nr. 104-FK123, Seite 2383-2388.

18.4-9 „High Temperature High Strength Nickel Base Alloys“,Prospekt der Fa. „International Nickel Company,Inc. (INCO), 3rd Edition, 1977, Seite 11,22, 28 und 42.

18.4-10 Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 11, „Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-007-7 (v.1)t , 1986, Seite 542.

18.4-11 A.Erker, „Entstehung und Bedeutung der Eigenspannungen“, Zeitschrift „VDI-Z“ 194 (1962) Nr. 27, 21. September, Seite 1377-1386.

18.4-12 , „Shot-Peening“ , Verfahrensbeschreibung der Fa. Metal Improvement Company, 1980, 6th Edition, Paramus New Jersey.

18.4-13 Ch.W.Fabry, „Kugelstrahlen, Theorie-Versuche-Praxis“, Zeitschrift „Konstruktion“, 17(1965) Heft 4, Seite 141-153.

©Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.4-14 J.Horowitz, „Das ‘Shot-Peening’-Verfahren, Grundlagen, Begriffe und zugehörige Meß-Methoden“, Zeitschrift „Metalloberfläche“, 32 (1978)Seite 285-292.

18.4-15 E.Schreiber, „Die Werkstoffbeeinflussung weicher und gehärteter Oberflächenschichten durch spanende Bearbeitung“, „VDI-Berichte Nr. 256“, (1976) Seite 67-79. Publ.-Nr. 51 125/99/5/76.

18.4-16 E.Schreiber, „Eigenspannungsausbildung beim Schleifen gehärteten Stahls“, FAG Kugelfischer Georg Schäfer & Co. Schweinfurt, Publ.-Nr. 51 121.

18.4-17 H.Christian, F.-X.Elfinger, „Eigenspannungen in Schweißnähten“, Allianz Versicherung, Zeitschrift „Der Maschinenschaden“ 51 (1978) Heft 3, Seite 124-130.

18.4-18 K.H.Illgner, „Einfluss örtlicher Kaltverfestigung auf die mechanische Bauteilhaltbarkeit“, VDI Jahrbuch 1976, Seite 35-44.

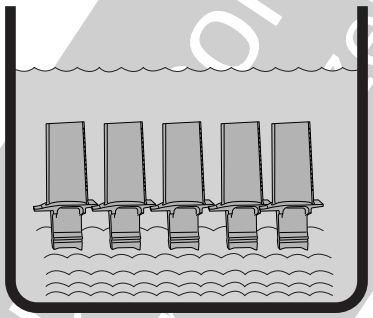
18.4-19 H.Huff, „Die zulässige Beanspruchung bei Ermüdungsbeanspruchung“, Zeitschrift „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik“, 32, 1-6, 2001.

18.4-20 A.E.Lobb, D.V.Lindh, B.M.Wahlin, D.T.Lovell, „Titanium Alloy Welding“, SST Technology Follow-On Program-Phase I, Report No. FAA-SS-72-09, D6-6029, July, 1972, Seite 65.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.5 Mechanische Überlastung und Beschädigung

Entstehung von Schwingrissen im Ultraschallbad



Unter fertigungsbedingten, mechanischen **Überlastungen** und Beschädigungen werden im Folgenden Einflüsse im Ablauf eines Fertigungsprozesses verstanden, die mit Krafteinwirkung das Betriebsverhalten der Bauteile unzulässig beeinflussen. Typisches Beispiel für eine Schädigung infolge dynamischer Krafteinwirkung ist die Schwingrissbildung beim Überschleifen von Schaufelspitzen oder in einem Ultraschallbad, das mit falschen Parametern betrieben wird (Bild 18.5-9).

Bereits das **Spannen** eines Werkstücks kann es überlasten (Bild 18.5-1). Spanende Vorgänge wie Räumen, Fräsen und Drehen können **Bauteiloberflächen aufreißen**. Typische Mechanismen sind „**Rattern**“ (Bild 18.5-2) und Kommarisse Band 3, (Bild 12.2.1.1-2).

Neue und alternative Verfahren bergen auch immer neue Gefahren und Herausforderungen. Ein Beispiel ist das Gleitschleifen in vibrierenden Gefäßen, bei dem sich z.B. die Werkstücke gegenseitig schädigen können (Bild 12.8.5-6)

Werden **Späne** nicht ausreichend abgeführt, können sie mit der Werkstückoberfläche **verschweißen**, sich **eindrücken** oder **Riefen und Kerben** verursachen (Bild 12.2.2.5-3).

Als besonders schädigend gilt **Werkzeugbruch** (Bild 18.5-5) und **intensiver Gleitkontakt** mit dem Werkzeug (Bild 18.5-4).

Eine **Schwingüberlastung** der Werkstücke bis zur Makrorissbildung kann in vielen Fertigungsprozessen auftreten (Bild 18.5-7.1). Geraten geschädigte Werkstücke in Triebwerke, besteht ein Potenzial umfangreicher sicherheitsrelevanter Betriebsschäden (Bild 18.5-8).

Beschädigungen eines Werkstücks können entstehen, wenn es beispielsweise beim Zerspanen aus seiner Halterung gerissen wird, undefinierten Kontakt mit dem Werkzeug hat, oder beim Handling eine Stoßbelastung erfährt. **Plastische Deformationen wie ein Verbiegen** von Schaufeln sind eine typische Folge (Bild 18.5-11). Hier stellt sich, insbesondere für die teuren Werkstücke des Triebwerksbaus, die Frage nach einem Richtvorgang und dessen Risiken (Bild 18.5-13 und Bild 18.5-14).

Neben der eigentlichen Verformung besteht bei Bauteilen mit **spröden Beschichtungen die Gefahr einer schwer nachweisbaren Rissbildung** (Bild 18.5-11).

Eine besondere Herausforderung stellt die ausreichend **sichere und seriengeeignete Vermeidung** der genannten Schädigungen. Zuerst müssen sie erkannt werden. Dann erfordern gezielte Abhilfen die Identifizierung der Ursachen (Bild 18.5-10 und Bild 17-11). Wird eine **Nacharbeit** erwogen, müssen die damit verbunden Risiken abgewogen werden (Seite 18.5-22). Bei großflächigen Verformungen ist gegebenenfalls ein **Richtvorgang** notwendig, der jedoch ebenfalls Risiken birgt (Bild 18.5-12 und Bild 18.5-13).

© Axel Kaesemann - TU Clausthal - consult
Alle Rechte vorbehalten, auch für Text und Data Mining, Vervielfältigung und Weitergabe an Dritte, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung

Fertigung: mechanische Beschädigung

Bild 18.5-1:*Das* ***Spannen der Werkstücke*** *auf Bearbeitungsmaschinen und Vorrichtungen kann Bauteile plastisch verformen und so gefährlich schädigen. Dafür sind besonders filigrane Bauteile wie Rotorkomponenten in Form von Ringen, Scheiben und Blisks empfindlich. Sie unterliegen höchsten Sicherheits- und Festigkeitsanforderungen und repräsentieren einen hohen Wert. Mit ausreichender Sicherheit lassen sich geometrische Abweichungen von den Zeichnungsvorgaben bemerken. In diesem Fall steht das Kostenproblem im Vordergrund. Ein noch deutlich höherer Aufwand kann erforderlich werden, wenn sicherheitsrelevante Schädigungen nicht erkannt wurden und in die Triebwerke gelangten. Typische Szenarien für die Schädigung eines Bauteils beim Einspannen sind:*

Mechanisches Spannen mit Hilfe einer verstellbaren Vorrichtung: *Typisches Beispiel ist ein Dreibackenfutter (Skizze oben links). Zu hohe Spannkräfte im Bereich von Auflagen bzw. Krafteinleitungen können das Werkstück* ***elastisch oder plastisch deformieren****. Das zeigt sich an nicht zerspanten Spannflächen als* ***Eindrücke****. Eigenspannungen aus dem Zerspanungsvorgang können Werkstück und Vorrichtung zusätzlich gegeneinander verspannen. Dann verzieht sich das Werkstück beim Ausspannen infolge eines Auffederns.*
Lassen sich sehr filigrane Werkstücke nicht fest genug einspannen, besteht die Gefahr, dass sie ganz oder teilweise ***vom Werkzeug herausgerissen*** *werden. In einem solchen selbstverstärkenden Vorgang ist erfahrungsgemäß mit einer Überlastung und Zerstörung des Werkstücks zu rechnen.*
Sind Anlageflächen einer Spannvorrichtung mit Spänen oder Partikeln verschmutzt, können sie in das Werkstück gedrückt werden. So wirken sie als gefährliche Kerbe.

Aufschieben von Zentrierflächen: *Große Durchmesser neigen* ***beim Aufschieben*** *zum Verkanten und damit zu einer Beschädigung (Skizze unten links). Ist die Kontaktkraft zu groß, kann sowohl beim* ***Einschieben und/oder beim Herausziehen Fressen (Kaltverschweißen)*** *auftreten.* ***Schmutzpartikel*** *begünstigen diese Schädigung. Als besonders gefährlich können Fressspuren angesehen werden, die in Riefenform auftreten (Detail unten). Auch von härteren Schmutzpartikeln wie* ***Metallstaub oder Strahlgut sind ausgeprägte Riefen*** *zu erwarten.* ***Verkanten*** *kann in den Passflächen als Kerben wirkende Eindrücke zurücklassen. Alle diese Beschädigungen können die zyklische Bauteillebensdauer entscheidend verkürzen. Außer in kleinen Bohrungen sind sie gewöhnlich ausreichend sicher erkennbar. Weil die genannten* ***Schädigungen den Werkstoff auch unter der Oberfläche beeinflussen*** *können, ist an lebensdauerbestimmenden Werkstückbereichen wie der Nabenbohrung (Skizze unten rechts) die Möglichkeit einer* ***Nacharbeit*** *eingehend zu prüfen (Kapitel 13.5).*
Ein weiteres Problem ist der ***Anstieg der Fügekraft*** *bei einem Fressvorgang. So kann z.B. eine vorgegebene Kraft eine axiale Anlage in einer Vorrichtung, als Voraussetzung der späteren Maßhaltigkeit, nicht mehr gewährleisten.*
Ein ähnliches Problem tritt beim ***Aufschrumpfen oder Aufpressen von Sitzen*** *auf. Bereits kleine Toleranz- und Temperaturabweichungen machen große Aufpresskräfte notwendig. Damit besteht ein hohes Schädigungspotenzial durch Fressen. Weil Schmiermittel fehlt wird dieses Risiko noch erhöht. Hier sind Fressspuren nachträglich abgedeckt und nicht mehr erkennbar. Das ist besonders bedenklich, wenn sich solche Fügungen an hochbeanspruchten Bauteilzonen wie Nabenverbindungen auf Wellen befinden.*

Eingießen: *Dieses großflächige Spannen erfolgt mit einer niedrig schmelzenden Legierung oder thermoplastischen Kunststoffen. Es wird bei Werkstücken mit komplexer Geometrie (z.B. Schaufelblättern, Skizze oben rechts) angewendet. Hier ist darauf zu achten, dass kein* ***Abrieb der Einbettlegierung*** *auf dem Bauteil verbleibt, um eine Schädigung bei Betriebstemperaturen zu vermeiden (Bild 18.3-10.1 und*

© Axel Rossmann - Turbosolut
Lizenz unterlagen nicht

Fertigung: mechanische Beschädigung

Das Spannen von Werkstücken hat potenziell schädigende Einflüsse auf das Betriebsverhalten des Bauteils.

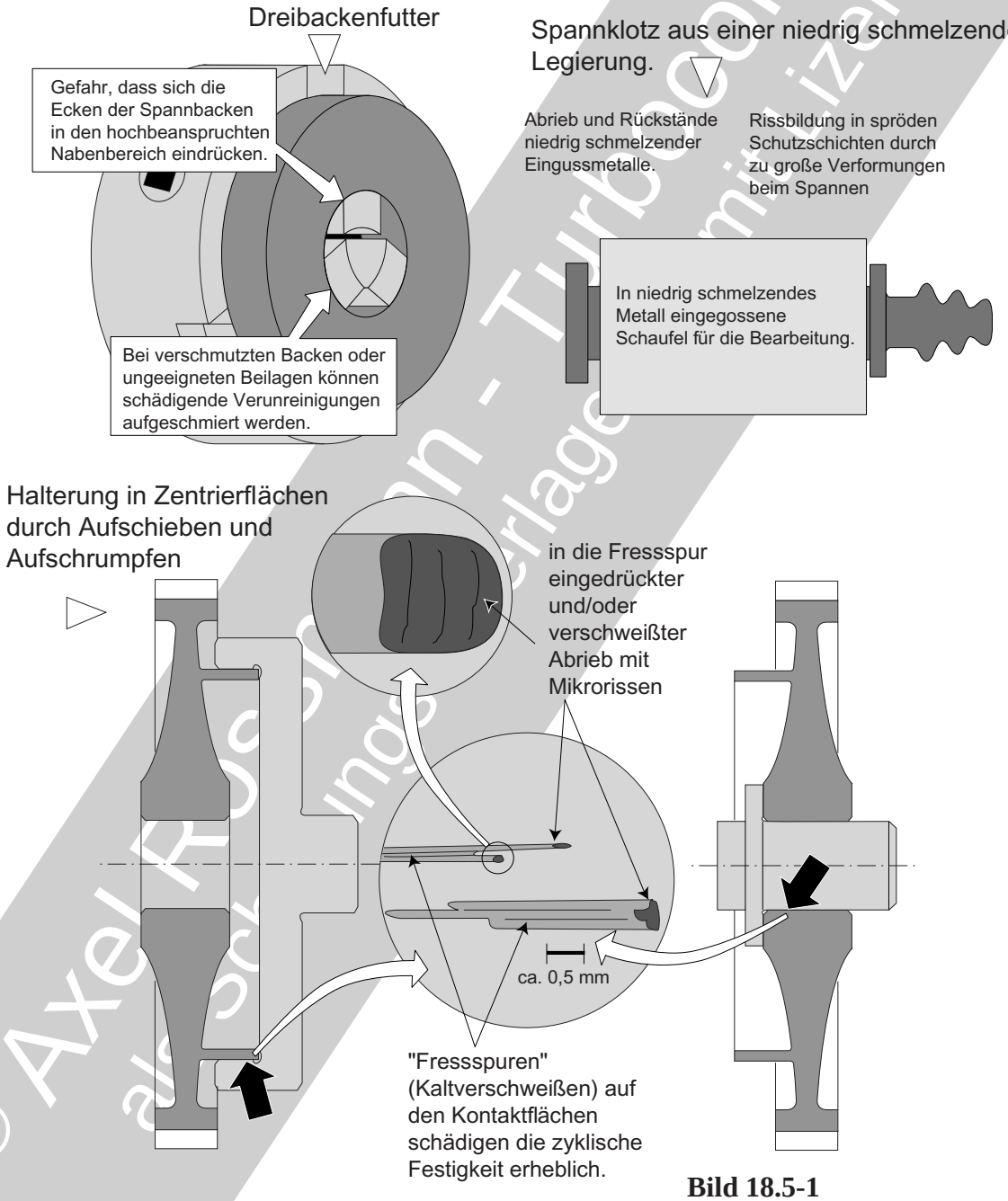


Bild 18.5-1

Bild 18.3-14). Kommt es beim Ausschmelzen zu ausreichend hohen Wärmespannungen zwischen dem sich stärker ausdehnenden massiven Eingussblock und einem filigranen Werkstückbereich (z.B. Schaufelblatt mit innerer Kühlkonfiguration) besteht die Möglichkeit, dass spröde Diffusionsschichten anreißen (Bild 18.5-11). Solche äußerst feinen Risse sind schwer erkennbar und können die Oxidationslebensdauer deutlich herabsetzen sowie die Schwingfestigkeit beeinträchtigen.

© Axel Rossmann - Turbocontult als Schulungsverlage mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

"Rupfen" schädigt die Schnittfläche eines Zerspanungsvorgangs stärker als "Rattern".

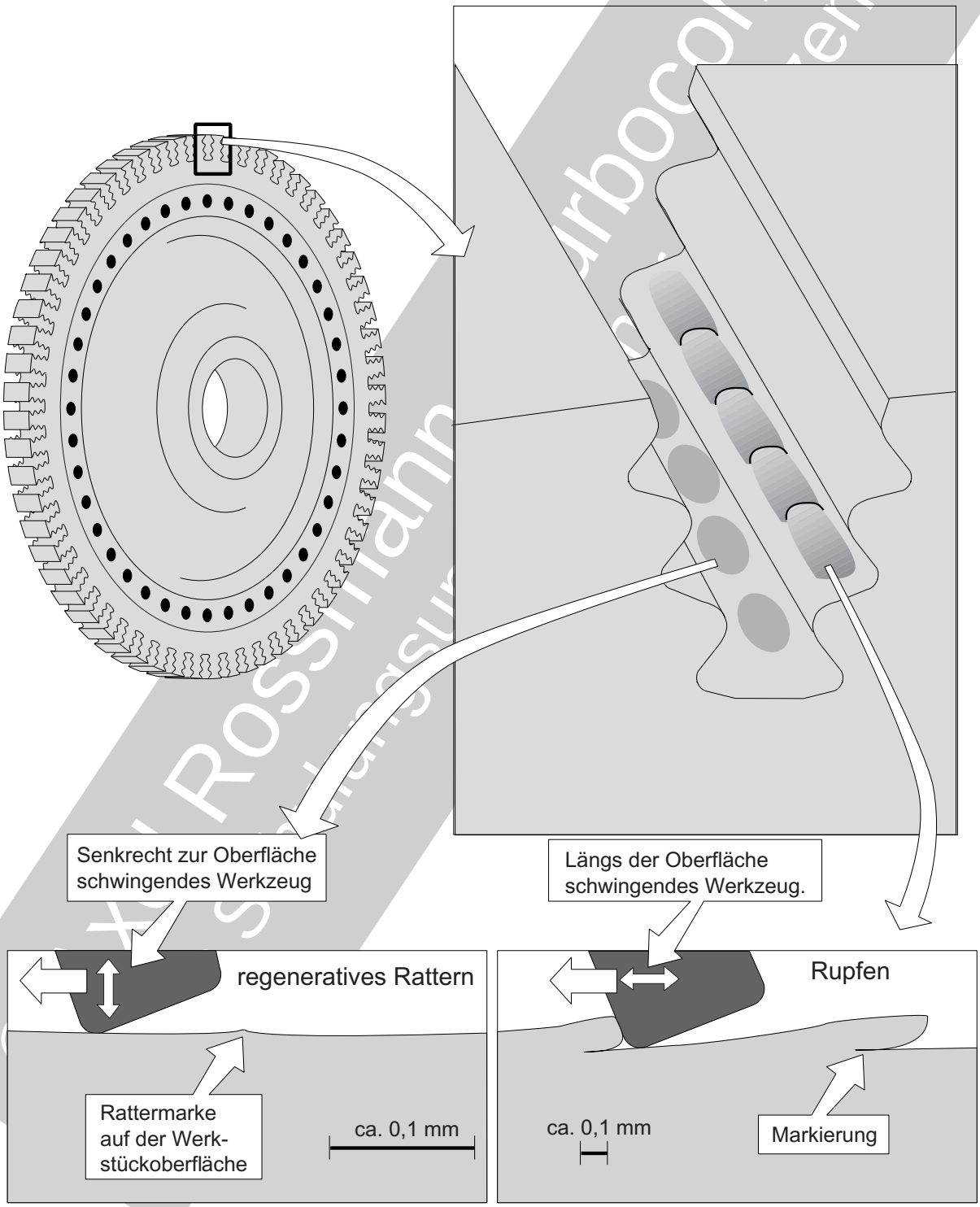


Bild 18.5-2

Fertigung: mechanische Beschädigung

Bild 18.5-2 *(Lit 18.5-6 und Lit. 18.5-7):* ***Rattermarken*** *(engl.* ***chatter marks****) können die Schwingfestigkeit gefährlich absenken. Sie entstehen bei Zerspanung mit definierter Schneide (Drehen, Fräsen, Räumen, Bohren). Besonders beim Räumen werden immer wieder in den* ***hochbelasteten Räumnuten für die Schaufelaufnahme*** *Rattermarken erzeugt. Die Ursache ist eine selbsterregende Schwingung. Dabei wird mehr Energie beim Zerspanungsvorgang zugeführt als von dämpfender Reibung verzehrt. Derartige Vorgänge kennt man auch aus anderen Bereichen der Technik, z.B. dem Quietschen von Bremsen. Ursache ist ähnlich dem „****Stick-Slip-Effekt****“ mit einer vorzugsweisen Bewegung parallel zur Oberfläche. Dabei baut sich eine Reibkraft zyklisch auf, während Bremsenergie eingespeist wird. Im Fall des Ratterns handelt es sich jedoch vorzugsweise um eine Bewegung senkrecht zur Oberfläche. Rattern ist ein instabiler dynamischer Vorgang, dessen Amplitude plötzlich sprunghaft ansteigt. Rattern kann eine Werkzeugmaschine schädigen, und Werkzeuge frühzeitig verschleißen. Der Sicherheitsaspekt macht jedoch die potenzielle direkte oder indirekte (Werkzeugverschleiß) Schädigung des Werkstücks vorrangig.*

Für Ratterschwingungen an Werkzeugmaschinen sind gewöhnlich mehrere, gleichzeitig wirkende Phänomene verantwortlich. Neben der Steifigkeit der Werkzeugmaschine sind die Zerspanungsparameter, der Zustand des Werkzeugs und die Kühlung bzw. Schmierung von Bedeutung. Bei der Optimierung des Zerspanungsprozesses wird die sog. ***Grenzschnitttiefe*** *ermittelt. Es ist diejenige Schnitttiefe unterhalb der noch kein Rattern auftritt. Sie gilt natürlich nur für den jeweiligen,erprobten Werkzeugzustand. Hat Verschleiß diesen verändert, kann gefährliches Rattern auftreten. Man erkennt, dass* ***eigenmächtiges Verändern des Zerspanungsprozesses****, z.B. auch der Einsatz unerprobter aber billiger Werkzeuge, die Sicherheit der Werkstücke bzw. der Bauteile gefährdet.*

Man unterscheidet zwei Hauptarten von Ratterschwingungen an Werkzeugmaschinen:

*„****Rupfen****“ ist ein Rattern mit fallender Schnittkraftcharakteristik: In diesem Fall (Skizze unten rechts), verläuft die Schwingbewegung in Richtung der Schnittgeschwindigkeit. Erfahrungsgemäß schädigt diese Art des Ratterns die Oberfläche besonders. Sie wird aufgerissen und Mikrorisse entstehen. Ein Stick-Slip-Effekt bildet sich aus, weil beim nach vorne schwingenden Werkzeug auf Grund thermisch bedingter Reibverhältnisse geringere Schnittkräfte wirken als beim Zurückschwingen. In diesem Fall ist die niedrigere effektive Schnittgeschwindigkeit die Ursache.*

Regeneratives Rattern *läuft mit einer Schwingbewegung senkrecht zur Oberfläche (Vorschubrichtung) ab (Skizze unten links). Die Schwingung baut sich beim Zerspanen einer welligen Oberfläche auf und beeinflusst sich mit der Spanstärke wechselseitig.*

Bei zerspanenden Verfahren mit nicht definierter Schneide wie Schleifen, dürfte sich die Schwingung in Vorschubrichtung schädigender auswirken. In den Phasen des tieferen Eingriffs ist mit einer stärkeren Aufheizung zu rechnen. Möglicherweise wird auch der Zutritt von Kühlschmierstoff (KSS, Band 3, Kapitel 12.2.1.1.1) beeinträchtigt. So ließen sich Anlauffarben in einem Streifenmuster erklären.

© Keine Weitergabe ohne Genehmigung des Autors

Eingedrückte und/oder verschweißte Späne sind in der Lage, die Schwingfestigkeit des Bauteils unzulässig zu beeinflussen.

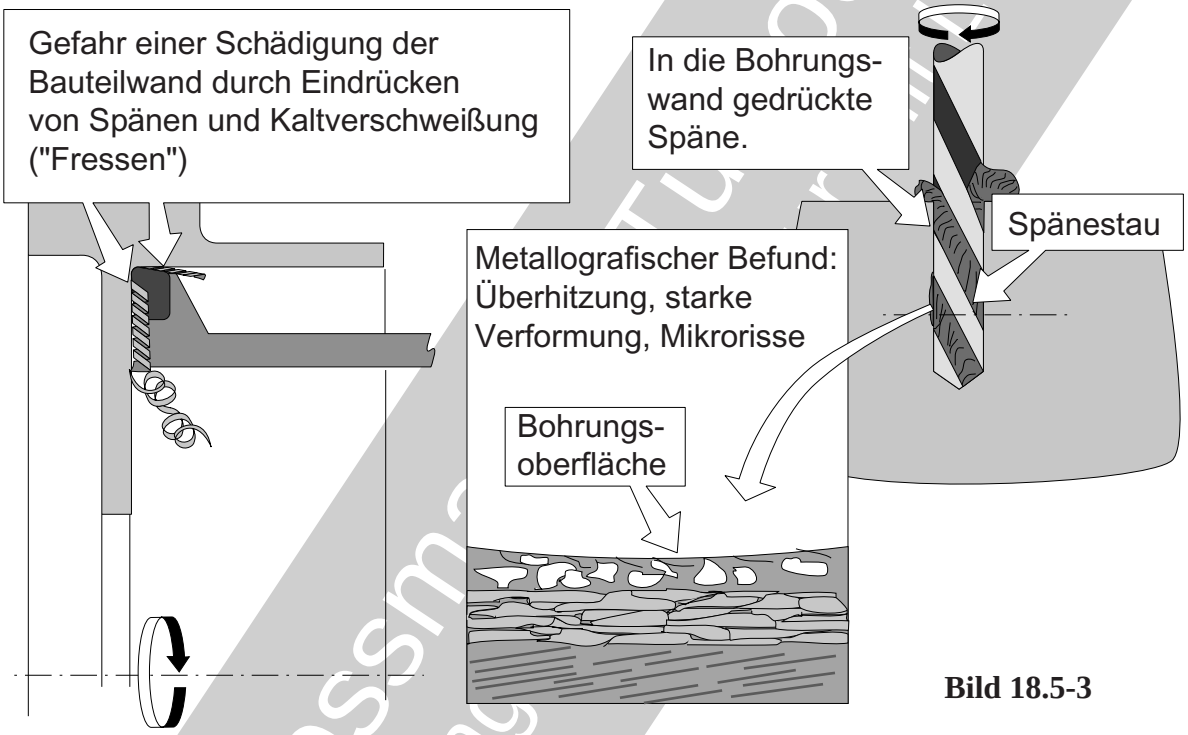


Bild 18.5-3

Bild 18.5-3 *(Lit 18.5-5): Wie gefährlich eine* ***unzureichende Späneabfuhr*** *bei Zerspanungsprozessen für die Betriebssicherheit der Bauteile sein kann, ist häufig nicht ausreichend bewusst. Der „****Pensacolaunfall****“ (Band 3, Bild 12. 2.1.1.-9.1 bis -9.5), bei dem eine Fanscheibe infolge fertigungsbedingter Rissbildung barst, zeigt das besonders deutlich. Die Ursache für den Spänestau einer Drehbearbeitung sind meist ungünstige räumliche Gegebenheiten (Skizze links). Dies gilt besonders für* ***Hohlräume,*** *die bei schlechter Einsicht auch das* ***nachträgliche Erkennen einer Schädigung erschweren****. Bei Bearbeitungen wie Bohren oder auch Fräsen kleiner Öffnungen lässt sich ein Spänestau manchmal nur mit Hilfe eines kurzzeitigen Herausfahrens des Werkzeugs vermeiden (Skizze rechts). In diesen Fällen erschwert die schlechte visuelle Zugänglichkeit der zerspanten Fläche die Bewertung. Der* ***Spänestau*** *wirkt auf mehrfache Weise schädigend:*

- *Fressen der Späne mit der Werkstückoberfläche (Band 3, Bild 12.2.1.1-3.1).*
- *Aufheizen als Folge intensiver Reibung und/oder behinderter Kühl- und Schneidmittelzufuhr.*
- *Beeinflussung des Schneidvorgangs: Verschleiß des Werkzeugs mit hohen Schnittkräften erhöht die Gefahr einer Schädigung durch Rattern (Bild 18.5-2).*

So löst Spänestau Schädigungen aus:
- *Rissbildung,*
- *Zugspannungen,*
- *Oxidation, Versprödung,*
- *Festigkeitsabfall als Folge einer Gefügeveränderung.*

© Axel Rossmann Technologie GmbH als Schulungsmaterial

Fertigung: mechanische Beschädigung

Gleitkontakt mit nichtschneidenden Werkzeug- und Spannmittelflächen.

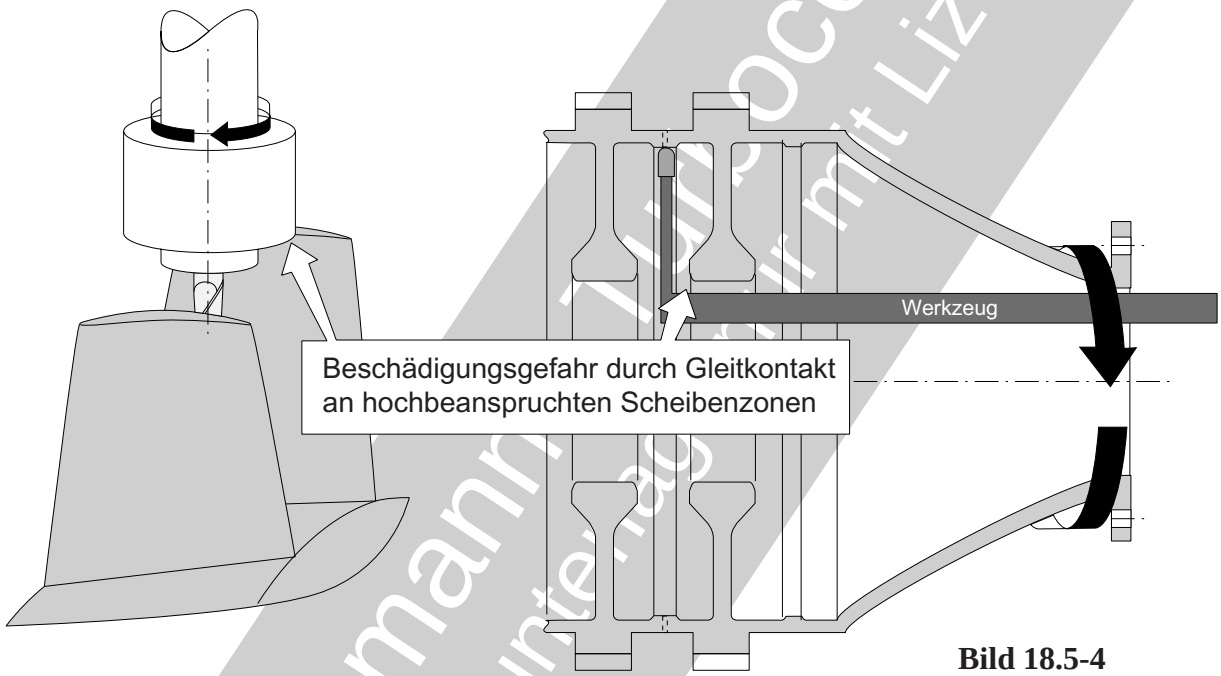


Bild 18.5-4

Bild 18.5-4: *Ähnlich dem Spänestau (Bild 128.5-3) besteht bei* ***Gleitkontakt mit nichtschneidenden Flächen*** *die Gefahr des „****Fressens****“ (Band 3, Bild 12.2.1.1-3.1). Die notwendige Relativbewegung ergibt sich aus stehendem Werkzeug und sich bewegendem Werkstück (z.B. Drehen) oder umgekehrt (z.B. Fräsen).*
Kontaktflächen sind in erster Linie Halter der Schneide (Skizze rechts) oder Spannvorrichtungen für das Werkzeug (Skizze links). Sie bestehen gewöhnlich aus Stählen. So kommt es zur Übertragung von Fremdmaterial (Bild 18.5-10, Lit. 18.5-9). Dies kann sich in nachfolgenden Fertigungsprozessen wie ECM, Ätzen oder Schweißen (Band 3, Bild 12.2.1.3.1-19) zusätzlich schädigend auswirken. Ein intensives Anstreifen am Werkstück erzeugt Gefügeveränderungen, plastische Verformungen, Versprödung, Mikrorissbildung, Aufheizung und hohe Temperaturen.

© Axel Rossmann Turbocontult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

Werkzeugbruch führt zu einer örtlichen Überlastung des Werkstoffs mit hoher Kerbwirkung und ist eine nicht zu unterschätzende Gefahr für die Bauteilsicherheit.

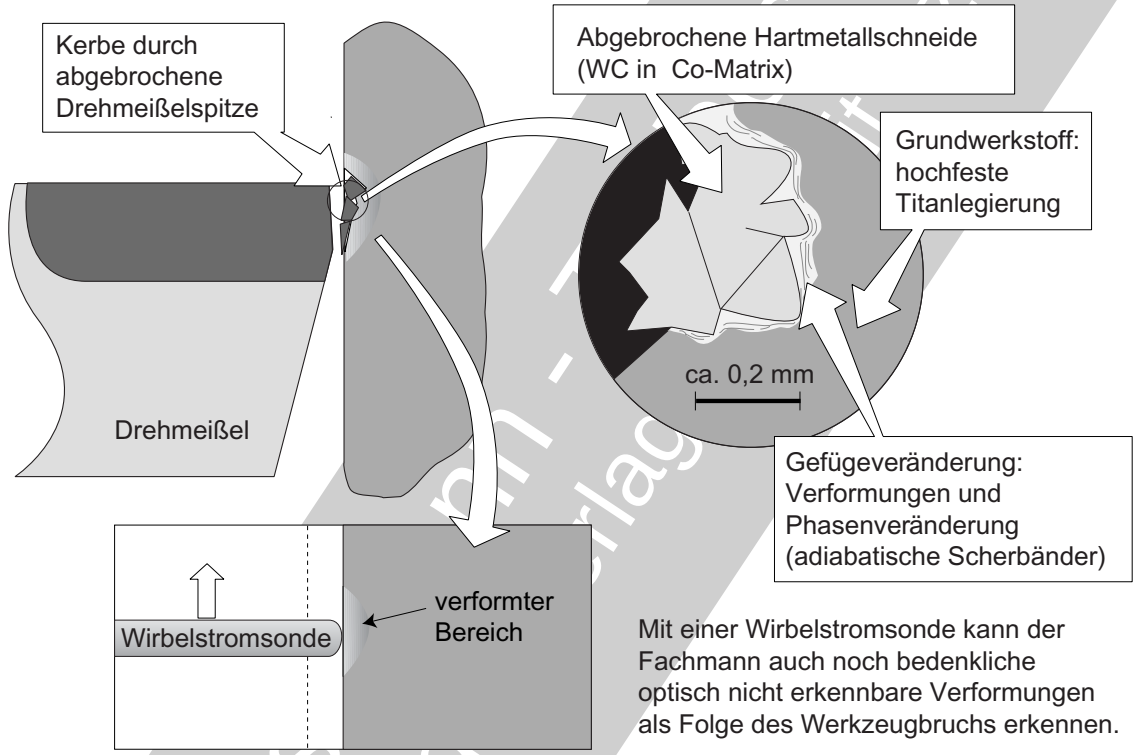


Bild 18.5-5

Bild 18.5-5 *(Lit 18.5-10):* ***Werkzeugbruch*** *ist ein recht häufiges Problem. Zum Risiko des Werkzeugbruchs trägt die Tendenz zu höheren Zerspanungsgeschwindigkeiten und festeren Werkstoffen der Werkstücke bei. Dafür werden härtere und temperaturbeständigere aber auch sprödere Schneidstoffe wie Keramik und Hartmetalle benötigt.*

Soweit es sich um Hartmetalle aus Wolframcarbid (WC) in einer Kobaltmatrix handelt, gibt es seriengeeignete Nachweismöglichkeiten für nichtmagnetische Werkstoffe wie Titan- und Nickellegierungen.Weil diese nicht voll befriedigen, befinden sich Verbesserungen in der Entwicklung. Es handelt sich insbesondere um eine Wirbelstromprüfung die auf Veränderung elektrischer und magnetischer Eigenschaften gegenüber dem unbeeinflussten Grundwerkstoff anspricht.

Wurden die ausgebrochenen Partikel bereits ***von einem nachfolgenden Bearbeitungsvorgang entfernt****, lassen sich verbleibende bedenkliche,* ***plastisch verformte Bereiche mit Gefügeveränderungen*** *noch nachweisen. Mit ihr kann der Fachmann bei ausreichender fallspezifischer Erfahrung auch äußerlich optisch nicht mehr erkennbare* ***Gefügebeeinflussungen*** *erkennen. Es handelt sich z.B um intensiv und schnell verformte Gefüge die sog. „****adiabatische Scherbänder****“ (Bild 18.5-10) ausbilden.*

*Zumindest für Titanlegierungen besteht ebenfalls die Möglichkeit mit geeigneten Ätzverfahren (****anodisches Ätzen, engl. Blue Etch Anodizing = BEA****, Bild 18.5-10) Gefügeveränderungen zu erkennen.*

©Axel Ross - Kopien nur als Schulungsunterlage

Fertigung: mechanische Beschädigung

Selbst bei scheinbar nebensächlichen Dingen ist Vorsicht geboten um Beschädigungen zu vermeiden!

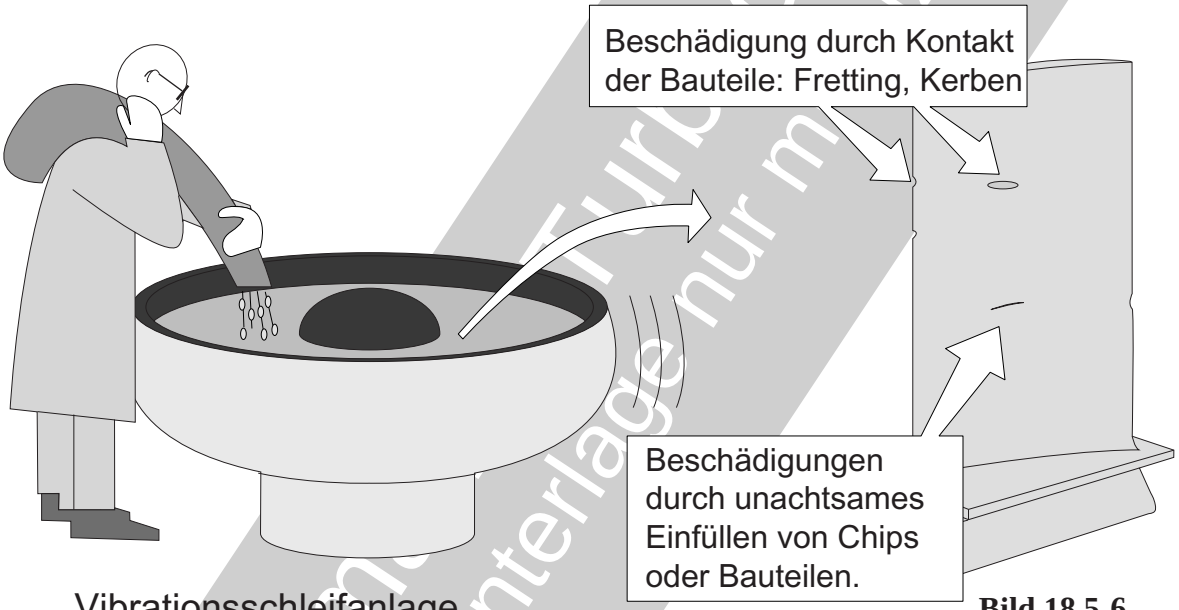


Bild 18.5-6

Bild 18.5-6: *Auch scheinbar harmlosen Fertigungsprozessen sollte unsere Aufmerksamkeit gelten. Dazu gehören* ***Gleitschleifverfahren*** *in vibrierenden Gefäßen. Die Werkstücke bewegen sich in diesem Verfahren frei in bauteilspezifischen vibrierenden Schleifkörpern. Das erfolgt gewöhnlich in einer umlaufenden und umwälzenden Bewegung. Eine geeignete Beschickung (z.B. Teilemenge) sollte ausschließen, dass es zum schädigenden Kontakt der Werkstücke untereinander kommt. Je nach Werkstückgeometrie und späterer Betriebsbelastung besteht die Möglichkeit einer Schädigung. Schaufelblätter dürften wohl zu den empfindlicheren Werkstücken gehören. Denkbare Schädigungen sind* ***Frettingmarken*** *(false brinelling),* ***Brinelling*** *(Bild 18.5-8) und* ***Kerben****.*

Das Beschicken der Maschine mit den Werkstücken und Schleifkörpern ist vorschriftsgemäß und mit genügend Vorsicht durchzuführen um Beschädigungen der Werkstücke zu vermeiden.

© Axel Rossmann Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Zeit

Fertigung: mechanische Beschädigung

Bild 12.2.2.5-7.1 und -7.2: *Auf den ersten Blick würde man nicht vermuten, dass bereits* ***in der Fertigung Schwingermüdung*** *Bauteile schädigen kann. Es gibt keine befriedigende, seriengeeignete,* ***zerstörungsfreie Methode,*** *um eine Schwingermüdung nachzuweisen, ohne dass bereits merkliche Rissbildung eingetreten ist. Einem rissfreien Bauteil ist also nicht anzusehen, ob bereits merkliche Schwingermüdung vorliegt. Ein* ***zerstörender Nachweis der Schädigung*** *ist nur mit einer Schwingprüfung (z.B. am elektrodynamischen Rüttler) als verkürzte Lebensdauer und/oder abgefallene Schwingfestigkeit zu erwarten. V****oraussetzung ist, dass die Prüfung den geschädigten Bauteilbereich belastet****. Zusätzlich muss die Mindestlebensdauer ungeschädigter Bauteile für die fragliche dynamische Belastung zum Vergleich ausreichend genau bekannt sein. Es ist also möglichst die schädigende Schwingform des Fertigungsprozesses anzuwenden. Die* ***geschädigte Bauteilzone und die schädigende Schwingform*** *müssen deshalb bekannt sein. Dazu ist der Schädigungsnachweis mit einer seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfmethode (ZfP) wie der Eindringprüfung notwendige Voraussetzung, wenn sich bereits ein ausreichend großer (Makro-) Riss gebildet hat. Die Detektierbarkeit solcher Risse kann von nachfolgenden Fertigungsprozessen, vor der Rissprüfung, deutlich beeinträchtigt sein. Zu derartigen Einflüssen gehören Verfahren wie Kugelstrahlen und abrasives Strahlen (Bild 17.3.1-4) oder eine nachfolgende spanende Bearbeitung wie Schleifen oder Drehen. Wird die Oberfläche plastifiziert, können Risse zugedrückt bzw. verschmiert werden. Die Erkennbarkeit von Rissen mit Eindringprüfung kann auch von Oxidation bei einer Wärmebehandlung oder dem Eindringen von Fremdstoffen wie Ölen verschlechtert werden. Natürlich lassen sich innenliegende Risse (z.B. in der Kühlkonfiguration) in vielen Fällen, zumindest ohne gezielte Suche in einer eng begrenzten Bauteilzone, nicht auffinden. Mit einer Röntgenprüfung, einem ebenfalls häufig angewandten ZfP-Verfahren der Serie, sind die Chancen kaum besser. Insbesondere wenn man die Lage am Bauteil und den Verlauf des Risses vorher nicht kennt, ist eine optimale Einstellung der Prüfparameter schwierig.* ***Findet man in der Fertigung einen Riss,*** *ist eher davon auszugehen, dass es sich* ***„um die Spitze eines Eisbergs“*** *handelt, als um einen* ***Einzelfall*** *(Band 1, Bild 2.3-3). Suspekt sind immer Bauteillose, für die Voraussetzungen einer Schwinganregung zutreffen.*

Schwingermüdung in der Fertigung zu vermeiden erfordert deshalb eine eingehende Kenntnis der betroffenen Verfahren. Besonders ist auf die Einhaltung sicherer Prozessparameter, Maschinen und Vorrichtungen zu achten. Die folgende Aufstellung enthält erfahrungsgemäß kritische Verfahren und Hinweise zu Schwingursachen:

„1“ Ultraschallreinigung: *Sowohl in der Neuteilfertigung als auch der Reparatur kommt dieses intensive Reinigungsverfahren zur Anwendung. Hochfrequente Vibrationen des Bauteils in einer Reinigungsflüssigkeit lösen auch fest anhaftende Verunreinigungen ab.* ***Zu starke Ultraschallenergie*** *und/oder* ***Resonanz des Werkstücks*** *kann zu Schwingermüdung führen. Verschleißprobleme an Wälzlagern (engl. false brinelling, Bild 18.5-7.1) und Rissbildung in gekühlten Turbinenschaufeln (Bild 18.5-8) sind bekannt geworden.*

Hochfrequente Schwingungen gelten auch deshalb als besonders „heimtückisch“, weil bereits bei sehr kleinen Amplituden (im 0,1 mm Bereich) gefährlich hohe Schwingspannungen entstehen können.

Eine Kombination hochfrequenter Schwingungen mit anderen Bearbeitungsverfahren wie Schleifen und ECM scheint zumindest potenziell in der Lage zu sein, gefährliche Schwingungen des Werkstücks anzuregen. Aus diesem Grund sind solche Verfahren vor der Einfüh-

Fortsetzung auf Seite !8.5-13

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

Es gibt eine Vielzahl von Fertigungsverfahren bei denen die Gefahr von Schwingbrüchen besteht.

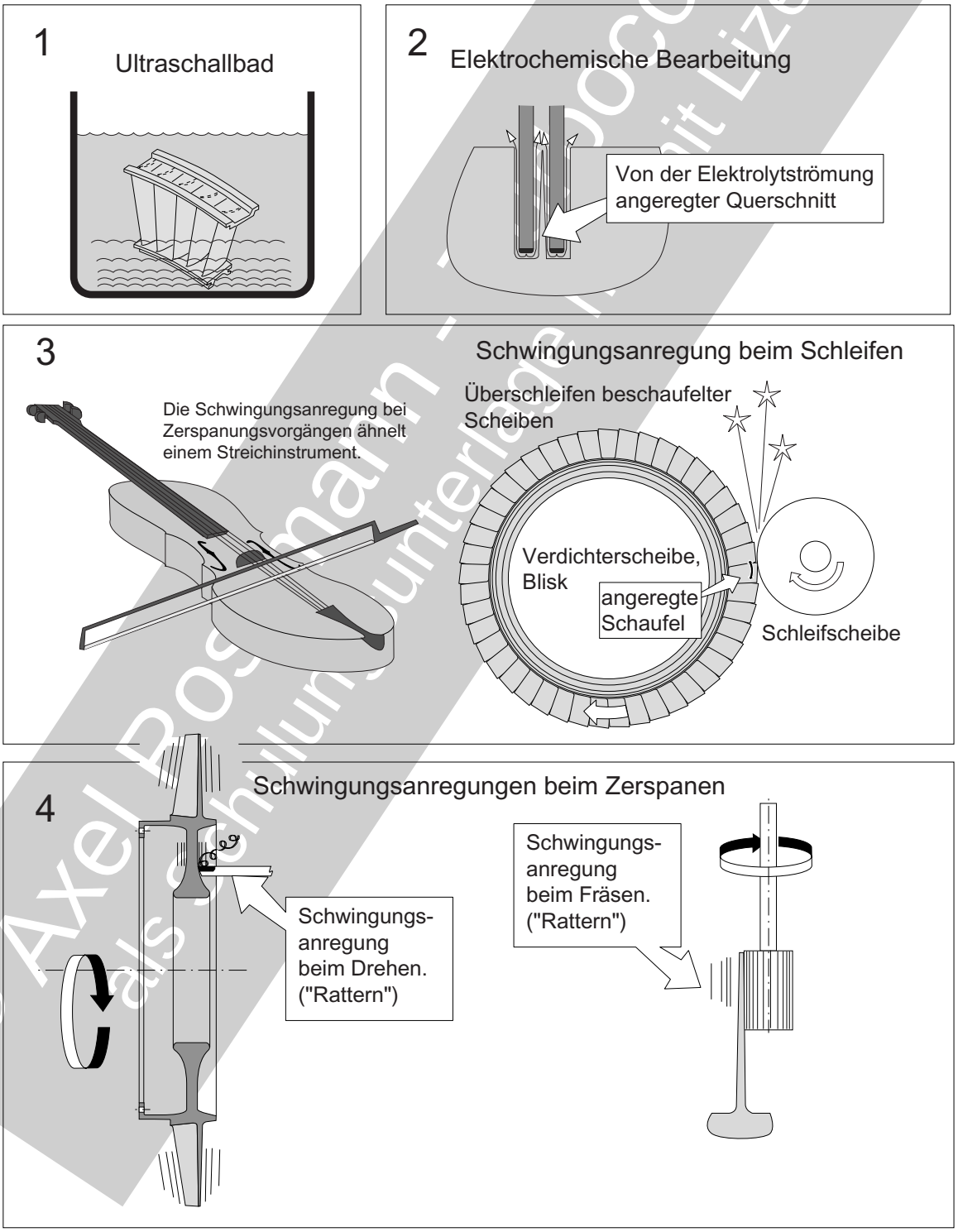
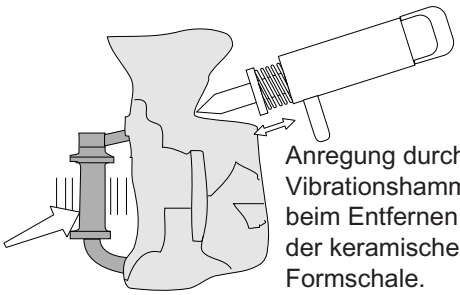


Bild 18.5-7.1

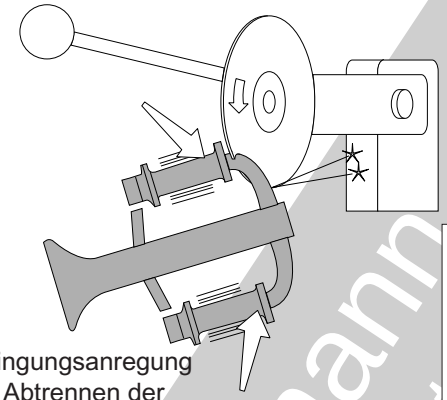
© Axel Rossmann - Tobocon Kult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

5 Potenzielle Schwingungsanregungen im Rahmen der Feingussproduktion

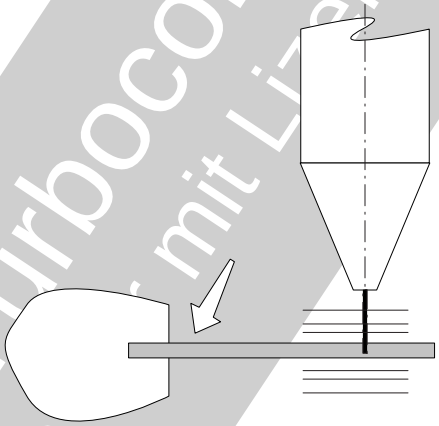


Anregung durch Vibrationshammer beim Entfernen der keramischen Formschale.

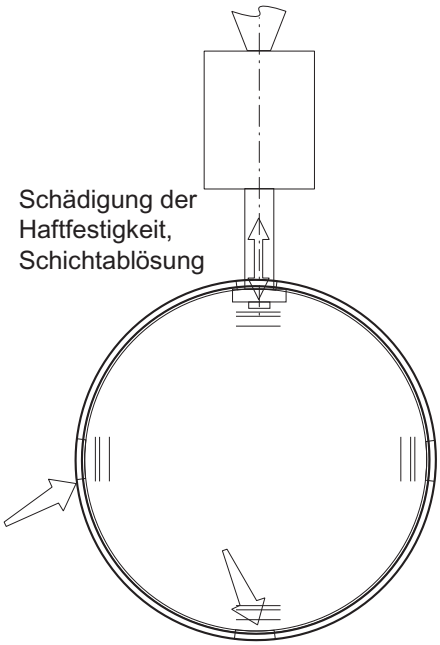


Schwingungsanregung beim Abtrennen der Gussteile von der Traube.

6 Anregung beim Wasserstrahlschneiden



7 Anregung durch Ultraschallsenken einer Wärmedämmschicht



Schädigung der Haftfestigkeit, Schichtablösung

8 Resonanzschwingungen beim Reibschweißen empfindlicher Bauteile wie 'Blisks'.

Anregung von Schwingungen an ungenügend gedämpften Schaufeln während des Reibvorgangs.

Sichtbare (Risse) und/oder unsichtbare Schädigungen durch Schwingermüdung.

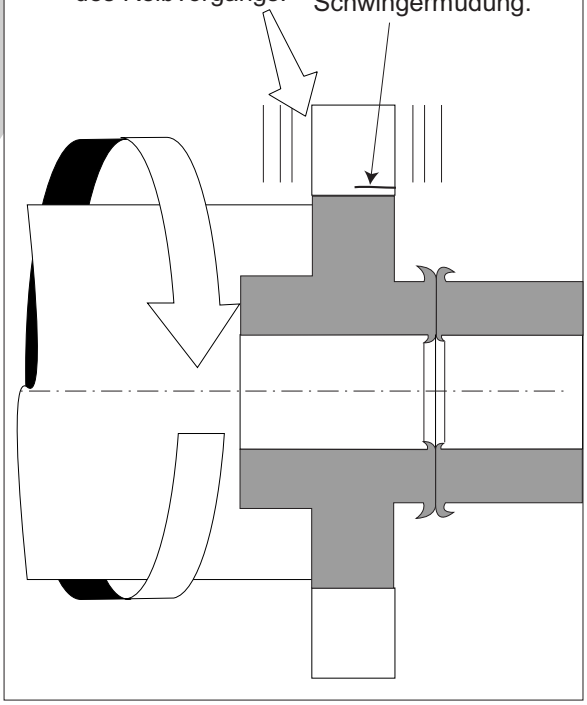


Bild 18.5-7.2

© Turbomann - Turboconsult mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

Fortsetzung von Seite 16.2.2.5-10

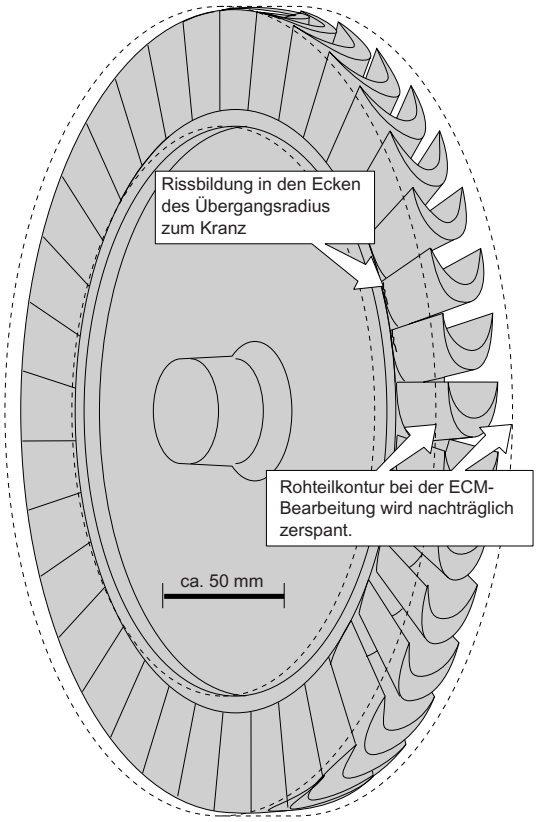


Bild 18.5-7.3

rung auf diesen Schadensmechanismus eingehend zu prüfen.

„2" Elektrochemische Bearbeitung: *Einige Anzeichen sprechen dafür, dass bei der Elektrochemischen Abtragung (**Electro Chemical Milling = ECM**) Schwingrisse im Werkstück entstehen können (Band 3, Bild 12.2.1.2-8). Die Schwingungsanregung ist mit Vorgängen im Spalt zwischen Werkzeug und Werkstück erklärlich (Lit. 18.5-12). Es handelt sich um Blasenbildung, Instabilitäten der Elektrolytströmung (Wirbelbildung, Flatteranregung elastischer Querschnitte) oder Druckschwankungen aus der Förderpumpe.*

Bild 18.5-7.3 *zeigt ein Turbinenrad zum Antrieb der Kraftstoffpumpe eines Raketenmotors. An mehreren Schaufeln wurden nach der Fertigung Schwingrisse festgestellt. Grundsätzlich waren zwei Anregungsmechanismen als Ursachen der Rissbildung denkbar:*

*- Der **Zerspanungsprozess** beim Entfernen der seitlichen Ringstege („4") nach der ECM-Bearbeitung.*

*- Der **ECM-Prozess**.*

„3" Schleifen: *Typisches Beispiel ist das **Überschleifen der Schaufelspitzen von Verdichterrotoren** zur Spaltminimierung. In diesem Fall reicht die Anpressung der Schaufelfüße unter Fliehkraft meist aus, um eine ausreichende Dämpfung zur Schwingungsunterdrückung zu gewährleisten. Beim Überschleifen werden dann die Schaufeln ähnlich einer gestrichenen Geigenseite von der Schleifscheibe zu Schwingungen angeregt. Dabei kann, je nach Schleifbedingungen, ähnlich einem Anstreifvorgang im Betrieb, sowohl die Grundbiegeschwingung (Rissentstehung im Übergangsradius am Fuß) als auch eine hochfrequente Schwingung (z.B. „**lyra mode**"; Band 1, Bild 5.4.3.3-10) mit Anrissen an den Kanten in Spitzennähe angeregt werden. Präventiv haben sich Dämpfungsmaßnahmen an jeder Schaufel wie Gummizwischenlagen bewährt.*

„4" Zerspanen: *Intensives, **ungewöhnliches Pfeifen während des Bearbeitungsvorgangs** kann als Vorwarnung einer gefährlichen Schwingung des Werkstücks verstanden werden (Bild 17.1-13). Eine solche Schwingung lässt sich gewöhnlich „Rattern" zuordnen (Bild 18.5-2). Dieses ist dem „Stick-Slip-Effekt" ähnlich (siehe Bild 18.5-5), auch in der Lage hochfrequente Schwingungen auszulösen und das Bauteil plötzlich zu überlasten. Intermittierende Zerspanungskräfte hochtouriger mehrschneidiger Werkzeuge wie Fräser wirken ebenfalls als hochfrequente Anregung.*

„5" Gussteilherstellung: *An Gussrohlingen treten, wenn auch sehr selten, Schwingrisse auf. Nicht das Gießen selbst ist dabei das Problem, sondern nachfolgende Behandlungen. Hierzu gehören:*

© AG RO... Turbo Consult ...veröffentlichung ...genehmigung

Fertigung: mechanische Beschädigung

***Entfernen der Formschale**: Der übliche Einsatz von **Vibrationshämmern** mit relativ großer Energieeinbringung steht im Verdacht gefährlicher Schwingungsanregung. Das gilt auch dann, wenn anhaftende Reste der Formschale eine dämpfende Wirkung ausüben sollten.*

***Trennarbeiten** dienen zum Entfernen der Angüsse und Steiger und Freisetzung des Gussteils von der Traube. Als Trennwerkzeug wird gewöhnlich eine **hochtourige, kunststoffgebundene Scheibe** verwendet. Über einen Stick-Slip-Effekt („3“) ist diese in der Lage Schwingungen anzuregen. Die Intensität ist von den Trennparametern (Vorschub, Kühlung, Schärfe der Scheibe, Spannung des Bauteils) und einem eventuellen Klemmen der Scheibe (Gussspannungen) abhängig. Die starke Geräuschentwicklung eines Schneidvorgangs kann den Schall der Schwingungen des Werkstücks so übertönen, dass die Gefahr einer Schädigung nicht erkannt wird.*
***Schwingrissbildung an Gussteilen ist erfahrungsgemäß nicht einfach zu finden**. Die übliche intensive Oberflächenbehandlung mit abrasivem Strahlen verschmiert die Risse (Bild 17.3.1-4). Die raue Oberfläche einer solchen Behandlung erschwert zusätzlich die Eindringprüfung.*

***„6“ Wasserstrahlschneiden und andere Verfahren die einen Flüssigkeitsstrahl nutzen:** Es handelt sich um Entschichtungs-/Entlackungsverfahren. Die Anregung kann auf die Pulsation des Strahls zurückzuführen sein, d.h. auf die Förderpumpe. Wird die Kraft des Flüssigkeitsstrahls von einem in der Resonanz schwingenden Werkstück geeignet verändert, z.B. indem der Strahl periodisch unterschiedlich auftrifft, ist ein selbstverstärkender Effekt denkbar.*

***„7“ Abtragende Ultraschallbearbeitung:** Besonders beim Senken spröder Werkstoffe wie Keramiken mit Ultraschall besteht Schädigungsgefahr. Der schwingende „Werkzeugrüssel“ leitet über ein abrasives Medium (Aufschlämmung) Schwingenergie in das Bauteil. In Sonderfällen werden keramische Wärmedämmschichten auf metallischen Bauteilen mit diesem Verfahren bearbeitet. In einem System mit derart unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften (metallisches Grundmaterial, Keramikschicht) ist eine große Dämpfung zu erwarten. Das macht eine Schwingungsanregung, die zur Rissbildung im Grundmaterial führt, wenig wahrscheinlich. Trotzdem ist nicht auszuschließen, dass in Bereichen hoher Schwingbelastung die Haftfestigkeit abfällt und es im Extremfall zur **Schichtablösung** kommt.*

***„8“ Reibschweißen** (Bild 18.5-7.4) : Betroffen sind insbesondere schwingempfindliche Bauteile wie Rotorscheiben mit integraler Beschaufelung (‘Blisk’). Sie können auch **während des kurzen Reibvorgangs** (Band 3, Bild 12.2.1.3-34) zu starken, hochfrequenten Schwingungen angeregt werden. Damit besteht die Gefahr eines unzulässigen Abfalls der Schwingfestigkeit einzelner Bereiche wie der Beschaufelung. Abhilfe kann eine **Dämpfung mit Elastomerbeilagen** sein.*

Schwingrissbildung bei der Reibschweißung eines Turbinenrads aus einer Ni-Gusslegierung.

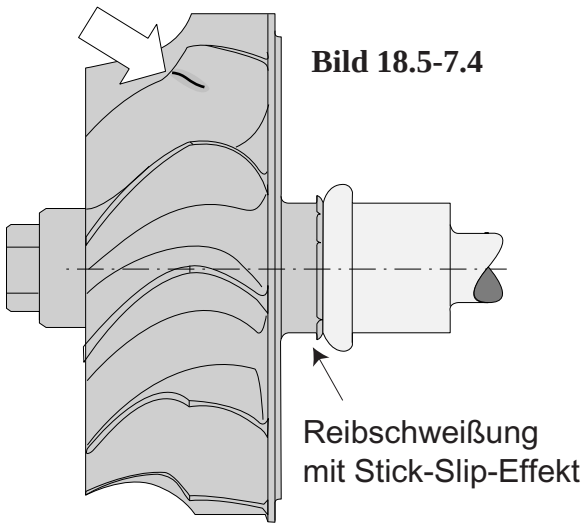


Bild 18.5-7.4

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

Schwingbrüche und Schädigungen durch Ultraschallreinigung.

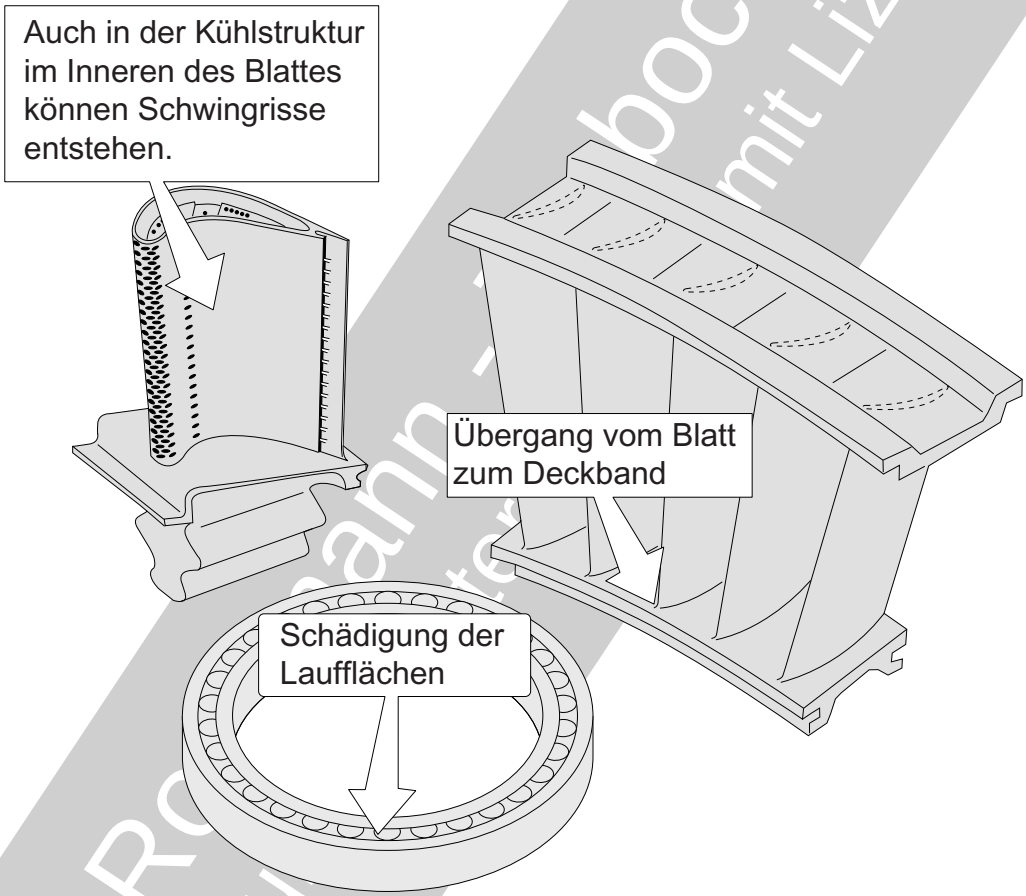


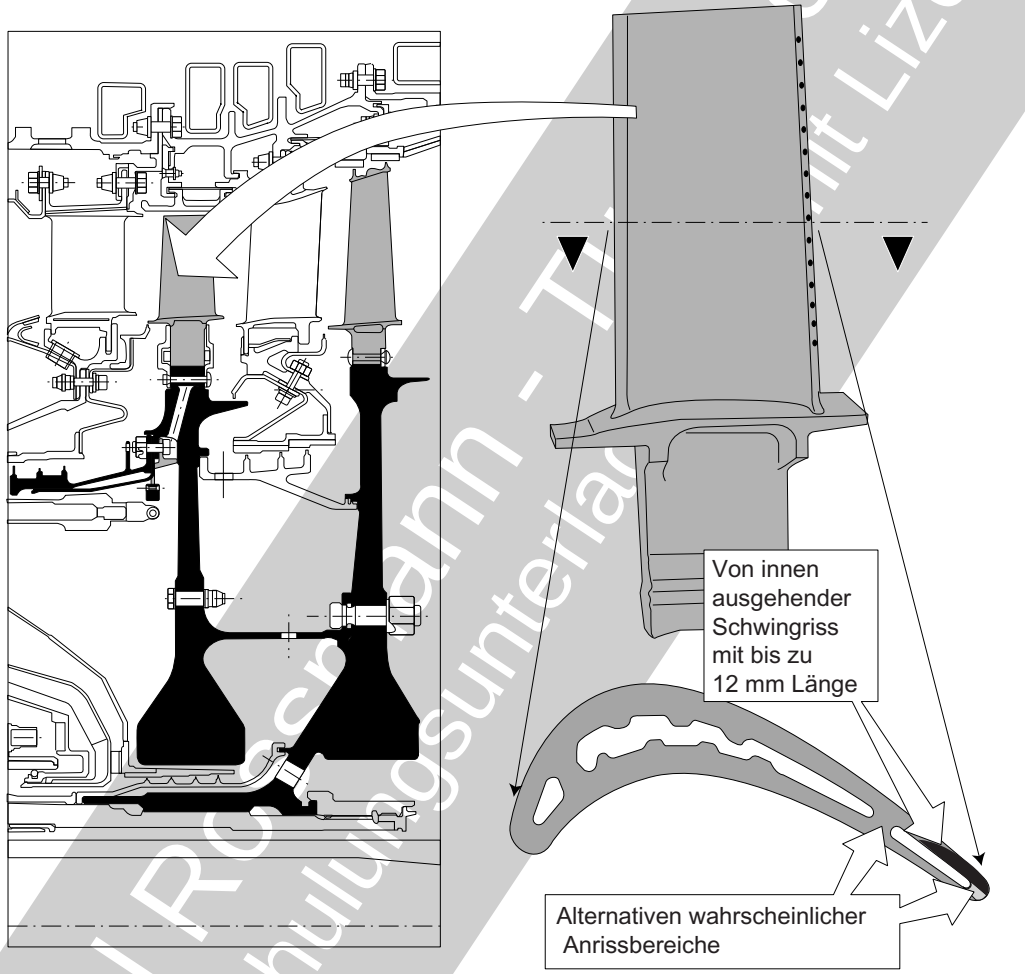
Bild 18.5-8

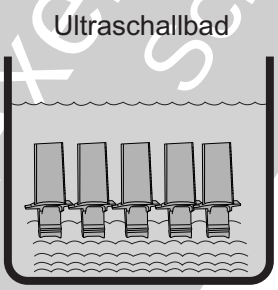
***Bild 13.5-7.4**: Auch offenbar vom **Reibschweißen ausgelöste Schwingrisse** wurden beobachtet. Es handelte sich anscheinend um LCF-Risse durch einen Stick-Slip-Effekt (ähnlich dem Bremsenquietschen, Band 1 Bild 5.9.1-7 und Bild 5.9.1-8). Auf eine extreme dynamische Beanspruchung weist die deutliche **Blaufärbung** (Anlauffarben) im Rissbereich hin. Das zeigt eine starke Aufheizung beim Ermüdungsvorgang.*

***Bild 13.5-8**: **Ultraschallreinigung** mit nicht ausreichend abgesicherten Prozessparametern kann Werkstücke gefährlich schädigen (Bild 18.5-9). Neben einer **Schwingermüdung bis zur Makrorissbildung** kann an lose anliegenden Flächen Reibverschleiß auftreten. An Wälzlagern wurde z.B. sog. **falsches Brinelling (engl. False Brinelling)** auf den Laufbahnen im Abstand der Wälzkörper beobachtet (Lit. 18.5-2).*

© Axel Rosmann - Lizenz

Eine Folge ungeeigneter Prozessparameter: Ultraschallreinigung als Ursache für Schwingbrüche in Turbinenschaufeln!





Durch ungeeignete Prozessparameter eines Reinigungs-Ultraschallbades kam es bei Turbinenrotorschaufeln zu innenliegenden Schwingrissen. Es handelte sich um gekühlte Schaufeln verschiedener Triebwerkstypen. Diese Risse waren offenbar mit der vorgesehenen Serienprüfung nicht auffindbar. Sie gelangten in die Triebwerke. Damit bestand die unmittelbare Gefahr eines Schaufelbruchs mit der Folge eines Triebwerksausfalls.

Bild 18.5-9

Bild 18.5-9 *(Beispiel 18.5-1, Lit 18.5-8): Dieser Fall zeigt exemplarisch die* ***Gefahren falscher Prozessparameter****. Ein scheinbar „harmloses“ Reinigungsverfahren, das* ***Ultraschallreinigen****, setzt Werkstücke in einem Flüssigkeitstank Vibrationen im Ultraschallbereich aus. Offenbar konnte das bei falscher Einstellung potenziell gefährliche Schwingrisse auslösen.*

© Axel Rosmann - Technische Universität Lizenz
Schulungsunterlagen

Fertigung: mechanische Beschädigung

Beispiel 18.5-1 (Lit 18.5-8, Bild 18.5-9):

Zitat: „The FAA and...(the OEM) are investigating the **miscalibration of an ultrasonic cleaning machine that induced potential fatigue cracks in nearly 8,200 turbine blades** used in four different types of the company's engines....A company-issued alert affects 15 airlines, including two in the U.S.
The problem centers on cracking of the **first- and second-stage high-pressure turbine** blades installed on ....(**four totally different engine types** of different power classes) that power a variety of ....(different transports of two big manufacturers). Damage on the blades was caused...by a new machine installed ... (some months before). The investigation by ...(the OEM) and the FAA determined that only eight engines may have contained suspect blades...There have been no incidents associated with the potentially-flawed blades and no in-flight shutdowns have occurred. The affected blades already had accumulated time in service, and had been returned ... for repair and reconditioning....
The ultrasonic process removes foreign material that accumulates within the hollow blades during normal engine operation, but **'overaggressive' cleaning made the internal surfaces of the blades vulnerable to high cycle fatigue cracks**...
According to the alert letter, the '**nature of the cracks makes them difficult to detect**' and 'traditionally nondestructive inspections can not detect all of the cracks'. As a result, all blades processed during the period are suspect. The cracks **initiate from the internal trailing edge** of the blade airfoil and propagate to the length of up to 0.500 in., with some extending through the wall to the external surface. **Similar cracks in the trailing edges of other blades 'have led to fractures in service**'. Although no fractures are known to have occurred with any of the suspect blades...
The length of time the blades were exposed to the cleaning solution 'was not a factor' in the incident...'The (cleaning) process was wrong because some of the blades had cracks', but not because personal 'threw the blades in the tank' and ignored them....**a post-cleaning X-ray inspection revealed cracks in some of the blades**. After determining the apparent cause, tests were conducted in the same tank using the improper process. **The tests resulted in reproduction of the cracking problem** on scrap hardware..."

Kommentar: Weil Schaufeln verschiedener Turbinenstufen aus unterschiedlichsten Triebwerkstypen betroffen sind ist anzunehmen, dass es sich nicht um ein bauteilspezifisches Problem, z.B. auf Grund konstruktiver Besonderheiten (Wanddicke, Geometrie) handelt. Offenbar sind keine Neuteile betroffen, sondern gelaufene Teile die im Rahmen eines Überholprozesses ultraschallgereinigt wurden. Dieses Verfahren lässt sich auch für Neuteile anwenden. Es ist deshalb hier als Beispiel geeignet. Aus der Beschreibung geht nicht eindeutig hervor, ob der Ultraschallprozess ursächlich Schwingrisse erzeugte oder ob er lediglich das Wachstum bereits vorhandener Betriebsrisse verursachte. Es darf jedoch vermutet werden, dass eine zu hohe Ultraschallbelastung auch an nicht gerissenen Bauteilen Schwingrisse auslösen kann. Wenn ähnliche Risse in anderen Schaufeln zu Brüchen im Betrieb führten, stellt sich die Frage wie diese ausgelöst wurden. Es wird nicht angegeben ob die Anrissstelle besonders hohen Betriebsbelastungen ausgesetzt ist. Das Risiko eines Betriebsschadens an einem bereits angerissenen Schaufelblatt würde sich so beträchtlich erhöhen.

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Aussehen und Nachweismöglichkeiten örtlicher schädigender Materialverformungen wie Einschläge und Fressspuren:

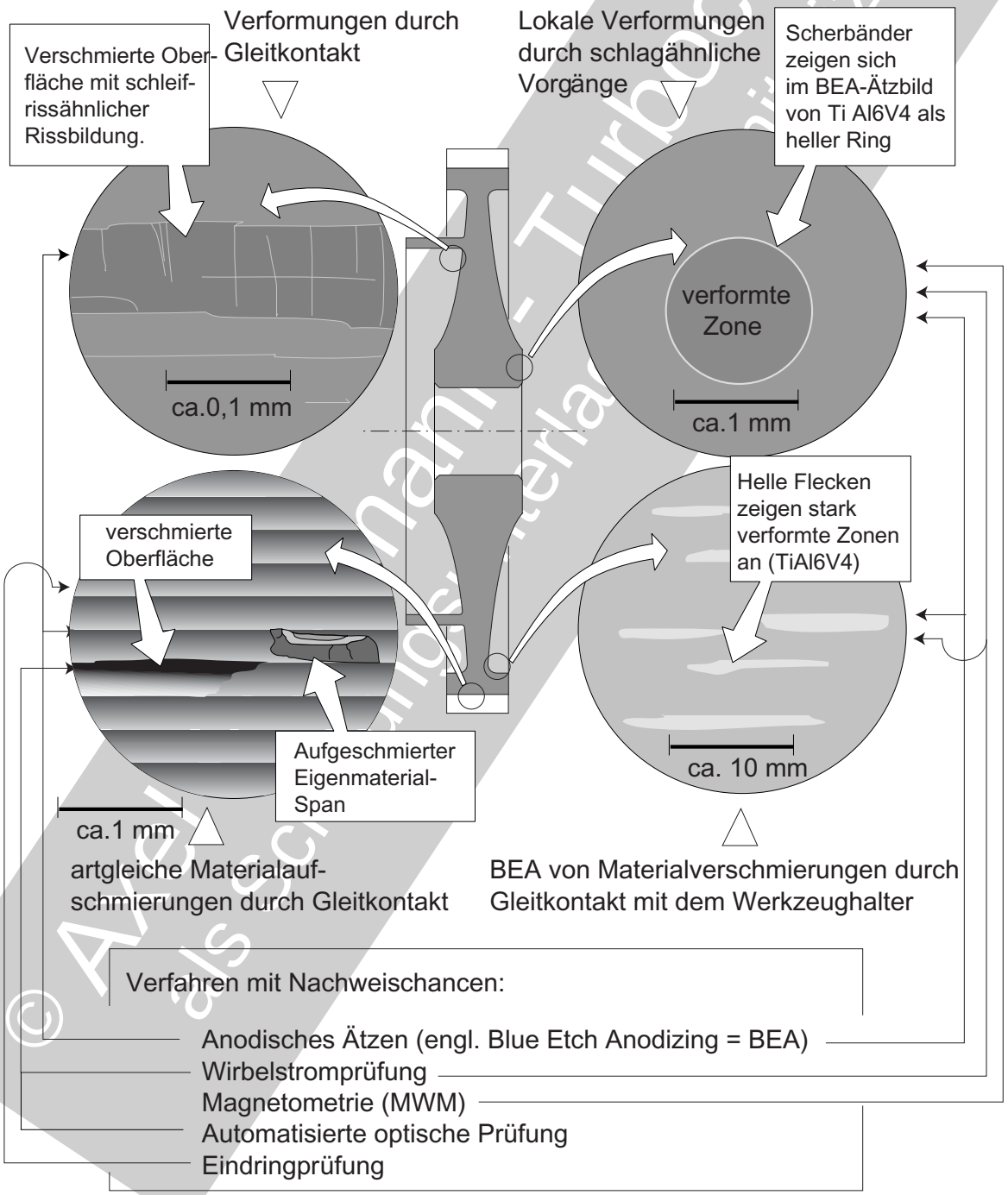


Bild 18.5-10

Fertigung: mechanische Beschädigung

Bild 18.5-10 *(Lit 18.5-9): Örtliche* ***plastische Verformungen*** *können mit einer gravierenden Abnahme der Schwingfestigkeit einhergehen. Der schädigende Effekt beruht in erster Linie auf einem örtlichen Festigkeitsabfall und/oder einer Spannungserhöhung. Es handelt sich um folgende Einflüsse:*

- *Überhitzung (Reibungswärme),*
- *Gefügeveränderung (Sprödigkeit, Härteabfall, Festigkeitsabfall),*
- *Rissbildung,*
- *Kerben, verstärkt durch erhöhte Kerbempfindlichkeit,*
- *Zugeigenspannungen.*

Deshalb ist es von großer Bedeutung derartige Fehlstellen zu vermeiden. Neben präventiven Maßnahmen kommt es darauf an, Fehlstellen rechtzeitig sicher zu erkennen und die Ursache für eine gezielte Abhilfe zu klären (Bild 17.1-3).
Die Sichtung der zur Verfügung stehenden Literatur ergab, dass derzeit offenbar nur wenige seriengeeignete Prüfverfahren existieren. Hierzu gehörten eine visuelle Prüfung, Eindringprüfung und Makroätzung (z.B. BEA bei Titanlegierungen). Damit ist aber ein ausreichend sicheres Auffinden solcher Fehlstellen noch nicht gewährleistet. Besonders wenn diese bewusst oder unbewusst nachgearbeitet wurden (Bild 17.5-1). Aus diesem Grund werden besondere Anstrengungen für eine Verbesserung vorhandener Verfahren (z.B. Wirbelstrom) und der Entwicklung neuer Verfahren (Magnetometrie, automatische optische Prüfung) gemacht.

Gefährliche Materialverformungen lassen sich in erster Linie zwei Mechanismen im Fertigungsbereich zuordnen:

Eindrücke ohne und mit eingebetteten Partikeln durch:
- *Werkzeugbruch (Bild 18.5-5),*
- *örtliche Schlagbeanspruchung: Handling, Herunterfallen oder Anstoßen des Werkstücks, Unsachgemäße Nacharbeit, Kontakt mit rotierenden Teilen.*
- *Zu hohe Spannkräfte (Bild 18.5-1).*
- *Eindrücken von Spänen und Oberflächenverunreinigungen (Skizze unten links, Bild 18.5-3).*

Als zerstörungsfrei kann ein Nachweis prägnanter Gefügeveränderungen (Skizze oben rechts) oder Aufschmierungen von Fremdmaterial mit einem Ätzverfahren gelten. Dabei kann ein Anpolieren, wie es in der Metallografie üblich ist, hilfreich sein (siehe auch Band 1, Bild 2.2.2.4-2).
Sind Kerben oder Partikelreste noch vorhanden, kann mit Hilfe des REM (Band 1, Bild 2.2.2.4-3) an Hand einer typischen Oberflächenstruktur und gegebenenfalls einer Analyse der Zusammensetzung, die Ursache (z.B. Abrieb von Kontaktwerkstoff, eingedrückte Partikel, Skizze unten links) geklärt werden.

Gleitkontakt mit „Fressen“ *(Kaltverschweißen, Bild 18.5-4): Typische Ursachen sind*
- *Anstreifen nichtspanender Werkzeug- und Vorrichtungsoberflächen und*
- *Spänestau (Bild 18.5-3)*

Fressstellen weisen typische Strukturen auf (Skizze oben links). Diese können im REM mit Hilfe eines Oberflächenabdrucks (Band 1, Bild 2.2.2.4-4) oder einer direkten Untersuchung des Bauteils (meist ein Größenproblem) identifiziert werden.
Auch hier können Ätzverfahren (Skizze unten rechts), bei ausreichender Veränderung der Oberfläche im Schädigungsbereich, zum Nachweis dienen.

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

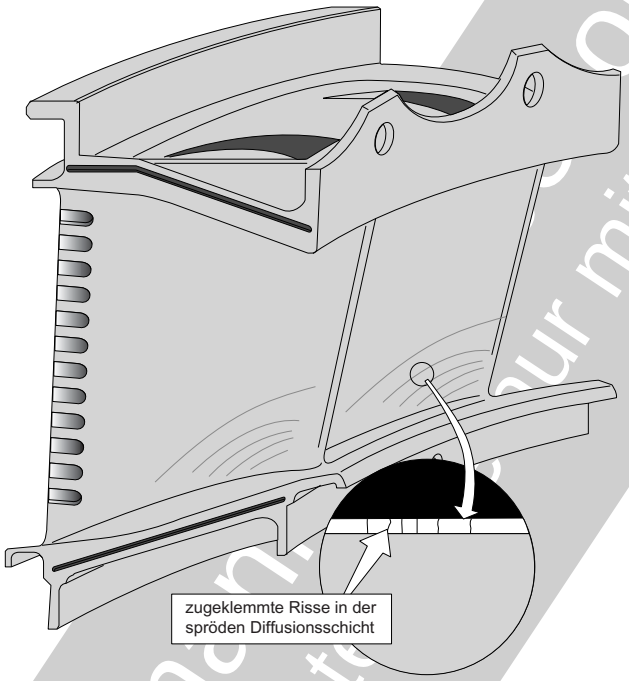


Bild 18.5-11

Bild 12.2.2.5-11: *Für* ***Bauteile mit einer spröden Schicht*** *besteht auch bei sehr kleinen plastischen Verformungen die Gefahr einer* ***reißlackähnlichen Rissbildung****. Typisches Beispiel sind Turbinenschaufeln mit einer* ***Diffusionsschicht*** *die sich bei Raumtemperatur spröd verhält (Band 3, Bild 12.2.1.8.1-3).*
Solche Verformungen können bei ungünstigem Spannen der Bauteile in bestimmten Zonen auftreten (Bild 18.5-13). Typisch ist eine Rissbildung in der Nähe von ***Formkerben und Steifigkeitssprüngen.*** *Eine solche Zone ist der Übergang des Blatts einer Turbinenleitschaufel zu den Deckbändern. Es handelt sich meist um* ***Rissfelder*** *mit konzentrischen bzw. parallel verlaufenden feinen Rissen die gewöhnlich visuell nur schwer erkennbar sind. Das besondere Problem dieser sehr feinen Risse ist, dass sie unter* ***Druckspannungen aus der Rückfederung*** *stehen (Bild 18.5-13). So werden die* ***Rissufer zusammengepresst*** *und erschweren die Eindringprüfung. Es ist durchaus möglich, dass erst* ***Oxidation im Betrieb die Risse anzeigt*** *(Band 1, Bild 5.4.2.1-10). Dann ist aber kaum mehr möglich zu entscheiden, ob die Risse im Betrieb oder bereits in der Fertigung, beim Handling oder der Montage entstanden sind. Einen Hinweis kann die Lage des Rissfelds und/oder die Rissorientierung geben. Sind diese für Betriebsrisse ungewöhnlich, lassen sich aber mit einem Einspannvorgang zwanglos erklären, spricht das für ein Neuteilproblem.*

Bild 18.5-12: *Probleme wie* ***unachtsame Handhabung****, unvorhergesehenes* ***Einwirken eines Werkzeugs*** *(z.B. Programmierfehler mit extrem hohem Vorschub), können zum* ***plastischen Verbiegen*** *der Werkstücke führen. Das bedeutet unter Aspekten von Lieferverpflichtungen und hohem Bauteilwert (z.B. Blisk im Preis mehrerer Mittelklassewagen) einen großen Verlust. Deshalb stellt sich immer die Frage einer möglichen Nacharbeit durch Richten. Diese ist systematisch zu planen und durchzuführen (siehe Rahmen auf Seite 18.5-25 und Kapitel 17.5).*

© Konsultant
Rossmann
Diese Publikation ist nur mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

Bild 18.5-12

Von einer plastischen Deformation im kalten Zustand, wie sie für Beschädigungen typisch ist,werden die Werkstoff- und Bauteileigenschaften auf vielfältige Weise beeinflusst:

- Werkstoff

*· **Verfestigung**, d.h. Anstieg der Fließgrenze und damit des Streckgrenzenverhältnisses (Fließgrenze/Bruchfestigkeit). Anstieg der Härte. Anhebung der Schwingfestigkeit.*

·Versprödung:Verringerung der Bruchdehnung.

*- (Mikro-) **Rissbildung** an spröden Schichten wie Oxidschichten von Ti- und Al-Legierungen. Eine solche Rissbildung kann die Schwingfestigkeit stark absenken.*

*- **Abbau der erwünschten Wirkung einer Oberflächenverfestigung** wie Kugelstrahlen.*

*- **Eigenspannungen** werden vom Rückfedern induziert (Bild 18.5-13). Im Bereich der Oberfläche entstandene Zugspannungen senken die nutzbare Schwingfestigkeit ab.*

*- **Veränderung des dynamischen Bauteilverhaltens:** Die Formänderung kann mit einer örtlichen Versteifung und Umlagerung von Massen des Bauteils einhergehen. Damit werden Eigenfrequenzen und Schwingformen (Knotenlinien) beeinflusst.*

*- **Beeinflussung aerodynamischer Eigenschaften:** Formänderungen aerodynamisch wirksamer Flächen wie Schaufelblätter können zu Wirkungsgradeinbußen bis hin zum Strömungsabriss (rotating stall) und damit zu erhöhter Schwingbelastung führen.*

Mögliche Änderungen auslegungsgemäßer Bauteileigenschaften machen ein Richten erforderlich. Der Werkstoff wird dabei gegenüber dem „originalen“ Fertigungszustand verändert. Der Zustand ist nach einem kalten Rückbiegen kaum exakt definierbar. Die Beur-

© Axel Rosenthal als Schulungsunterlagen

teilung der Unbedenklichkeit eines Richtvorgangs ist deshalb von den zuständigen Fachabteilungen, gegebenenfalls auch vom OEM, Behörden und Kunden zu überprüfen.

Bild 18.5-13: *Häufig ist nur ein* ***Kaltrichten*** *oder ein* ***Richten*** *im Bereich normaler Betriebstemperaturen möglich. Sonst besteht die Möglichkeit, dass Eigenschaften des Werkstoffs, eng tolerierte Masse oder das Betriebsverhalten unzulässig beeinflusst werden.*
Wer Kaltrichten anwenden will, sollte sich an das Problem, eine Heftklammer mit den Fingern geradezubiegen erinnern (Skizze oben). Man bemerkt dabei, dass sich die Heftklammer nur außerhalb der bereits verformten Krümmungen leicht biegen lässt. Nach einigen Mühen kommt im besten Fall eine leichte Schlangenlinie heraus. Dieses Verhalten ist der Verfestigung von Metallen bei plastischer Verformung zuzurechnen (Diagramm oben rechts). Während einer Kaltverformung, gleichgültig ob es sich um Stauchen oder Dehnen handelt (Bild 18.4-23), steigt die Fließgrenze (Streckgrenze) bis zur Spannung an, die der Maximalbelastung in der wahren Spannungs-Dehnungskurve (ohne Berücksichtigung der Einschnürung) entspricht (Diagramm oben rechts). Beim nächsten Verformungsversuch erfolgt die plastische Verformung erst ab dieser erhöhten Fließgrenze. Gleichzeitig kommt die ***Fließgrenze der Bruchfestigkeit immer näher****. So hat der Werkstoff nach jeder erneuten plastischen Verformung weniger Zähigkeit. Das bedeutet, der Werkstoff verhält sich spröder,* ***die Rissgefahr beim Richten steigt*** *(Bild 18.5-14).*
Richten als ein bleibendes Verbiegen nutzt die örtliche plastische Verformung. Während dieses Biegevorgangs wirken Zugspannungen auf der einen, und Druckspannungen auf der anderen Querschnittsseite. Beim Entlasten ***federt der betroffene Bereich wieder etwas zurück****. Nun entstehen im plastisch verformten Bereich, wo vorher Zug war, Druckspannungen. Entsprechend werden auf der ehemaligen Druckseite Zugspannungen induziert (Skizze unten links).* ***Titanlegierungen zeigen die Rückfederung besonders ausgeprägt*** *(Bild 18.5-14, Lit 18.5-11).*
Negative Effekte, insbesondere die Rückfederung, lassen sich mit einem ***Richtvorgang bei geeigneten Temperaturen*** *minimieren. Voraussetzung ist, dass dies das Bauteil (Masse, örtliche Erwärmung) und der Werkstoff (Gefüge, Festigkeitseigenschaften, Versprödung bei Luftzutritt) zulassen. Dazu sind die Fachabteilungen zu konsultieren. Gegebenenfalls lässt sich die plastische Verformbarkeit (Zähigkeit, Kraftaufwand) verbessern, und Risiken einer Schädigung (Rissbildung, Zugeigenspannungen) minimieren.*
Während der Deformation (meist Verbiegen) hat sich im Bauteil einiges verändert (Festigkeit, Eigenspannungen, Zähigkeit) das beim Richten berücksichtigt werden muss.

- Eine ***Verfestigung hat gewöhnlich die Anhebung der Schwingfestigkeit*** *zur Folge, was positiv zu werten ist. Eine Verfestigung erschwert jedoch die plastische Verformung und reduziert die Zähigkeit (Rissgefahr).*

- Nach dem Verbiegen liegt ein ***komplexer Eigenspannungszustand*** *vor (Skizze unten links, Lit 18.5-11). Er entspricht nicht der äußerlich ähnlichen Verformung während der von außen wirkenden Biegekraft.*

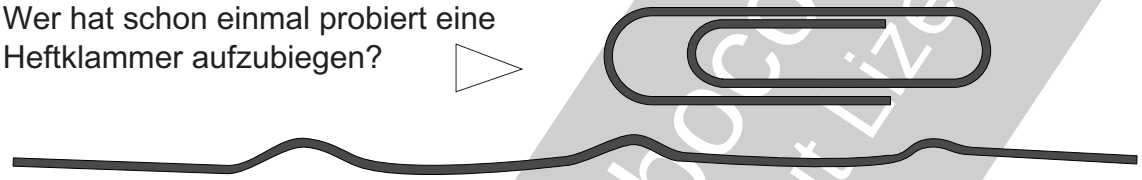
Obwohl nach dem Richten die Bauteilgeometrie wieder den Zeichnungsforderungen entspricht, ist im Gegensatz zum unbeeinflussten Neuteil mit hohen Zugeigenspannungen zu rechnen. Der Spannungsverlauf hat sich beim Richten gegenüber dem verbogenen Zustand verlagert (Skizze unten rechts). Zugeigenspannungen bedeuten eine niedrigere Schwingfestigkeit des Bauteils. Sie müssen dann entsprechend der Beurteilung der verantwortlichen Fachleute möglicherweise mit geeigneten Verfahren wie Kugelstrahlen oder einer Wärmebehandlung abgebaut werden.

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

Verfestigung und Rückfederung erschweren einen Richtvorgang.

Wer hat schon einmal probiert eine Heftklammer aufzubiegen?



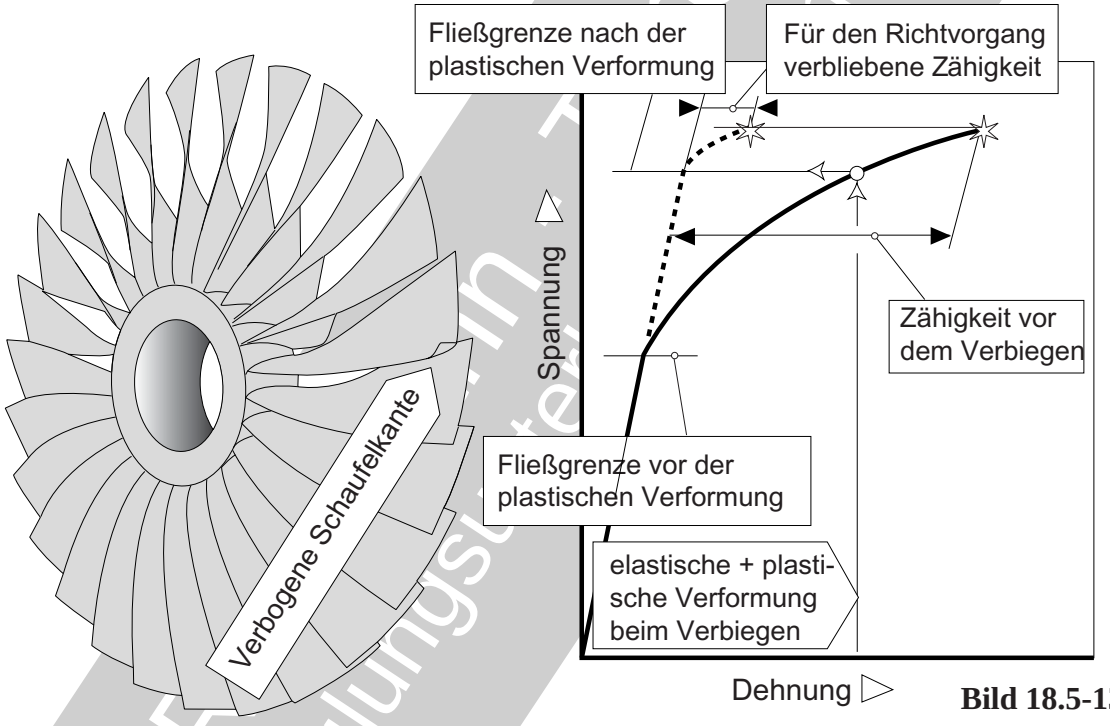
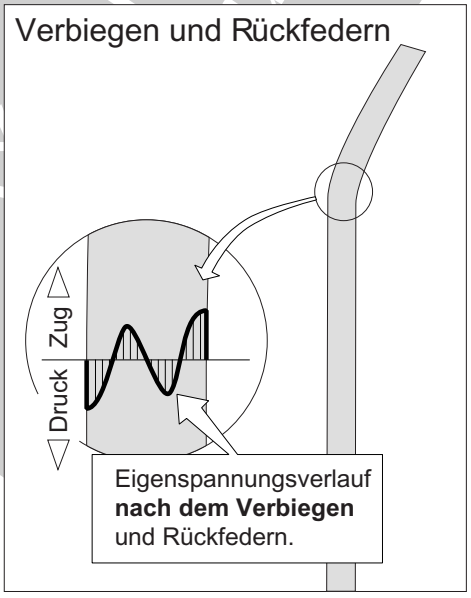
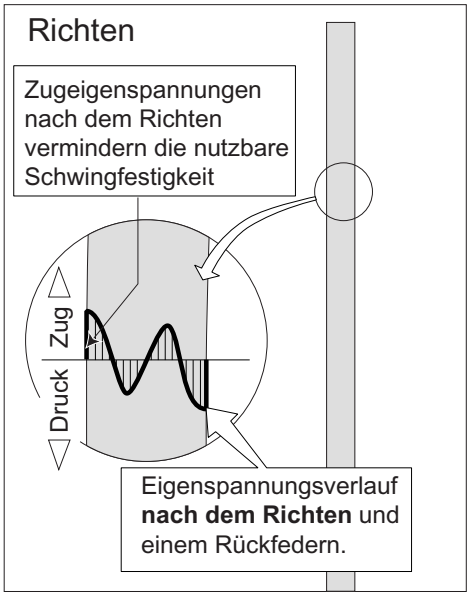


Bild 18.5-13





Besonders Bauteile aus Titanlegierungen neigen nach einer plastischen Verformung beim Kaltrichten zum Brechen.

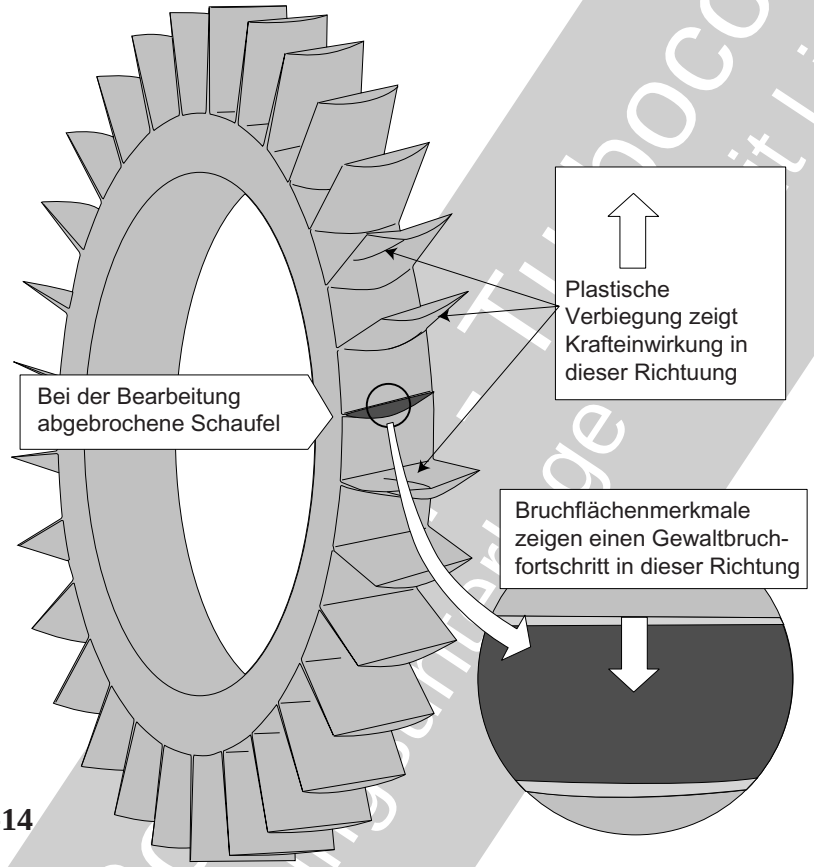


Bild 18.5-14

Bild 18.5-14: *Ein besonderes Problem beim Richten sind neben dem* ***Rückfedern*** *(Bild 18.5-13)* ***Anrisse bis zum Bruch*** *des Bauteils in der Verformungszone. Diese Bruchgefahr ist bei stark verfestigenden Werkstoffen wie Stählen oder Nickellegierungen nicht unbedingt besonders hoch. Natürlich ist sie erhöht, wenn der Werkstoff seine Festigkeit bereits einer Kaltverfestigung verdankt. Kalt gezogene Aluminiumlegierungen sind dafür ein Beispiel.* ***Titanlegierungen*** *die nur eine geringe Kaltverfestigung aufweisen, zeigen eine ausgeprägte Rückfederung (Lit. 18.5-11) und sind beim Richten besonders bruchgefährdet. Die Rückfederung dürfte mit der hohen Grundfestigkeit und dem niedrigen E-Modul in Zusammenhang stehen. Plastische Verformungen und die dabei induzierten Eigenspannungen führen zu entsprechend großen elastischen Dehnungen (Federwegen).*

Bei einem ***wenig verfestigenden Werkstoff*** *dürften sich* ***plastische Verformungen auf einen relativ schmalen Bereich*** *beschränken. Dies ist in Formkerben, wie dem Übergangsradius einer Schaufel in die Fußplattform, zu erwarten. Ein stark verfestigender Werkstoff wird dagegen die plastische Verformung benachbarter, noch nicht verfestigter Bereiche begünstigen.*

Im dargestellten Fall kam es an einem spanend bearbeiteten Prototypenteil aus einer hochfesten Titanlegierung (Skizze links) in der Fertigung zum Bruch eines Blattes und zur Deformation mehrerer anderer. Der Verdacht lag nahe, dass die Hauptursache für den Bruch der Schaufel in einer unzulässigen Werkstoff-

© Axel Rosenthal - Tu Chemnitz - Lizenz

Fertigung: mechanische Beschädigung

sprödigkeit zu suchen war. Eine Laboruntersuchung (REM = SEM, Band 1, Bild 2.2.2.4-3) ergab jedoch, dass es sich um einen werkstofftypischen mikrozähen Gewaltbruch handelt. Die Orientierung der Verformungswaben(engl. Dimples) und die Ausbildung der Scherflächen im Oberflächenbereich (Detail rechts) legten einen anderen Schluss nahe. Der Gewaltbruch entstand offenbar unter einer Biegekraft entgegengesetzt der für die Verbiegung der Nachbarschaufeln verantwortlichen. Auf Nachfrage wurde bestätigt, dass der Schaufelbruch erst bei einem kalten Richtversuch auftrat. Dieser wurde vorgenommen, um Deformationen zu entfernen, die beim Herausreißen auf der Drehbank entstanden waren. Dieses Beispiel zeigt die ***Problematik eines nicht sorgfältig vorbereiteten Richtvorgangs****. Die Primärursache für den Schaden war jedoch in der problematischen, nicht ausreichend sicheren, Aufspannung des Bauteils zu suchen.*

Mit einer Erwärmung und kombinierter Biege-Streckvorgänge bei niedriger Verformungsgeschwindigkeit verbessern sich die Erfolgschancen eines Richtvorgangs. Wichtig ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Verformung, um örtliche Überlastung mit Rissbildung zu vermeiden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Temperatur den Werkstoff nicht unzulässig verändern darf. Das gilt sowohl für das ***Gefüge bzw. das Festigkeitsverhalten*** *als auch für die* ***Entstehung spröder Schichten*** *bei Titanlegierungen. Für* ***Titanlegierungen*** *liegt der Temperaturbereich eines Richtvorgangs legierungsabhängig entsprechend Literaturangaben (Lit. 18.5-2) zwischen 540°C und 815°C. Das erfordert für den Richtprozess einen ausreichenden Schutzgasschleier.*

Hinweise auf Risiken im Betriebsverhalten gerichteter Bauteile kann möglicherweise das zugehörige Reparaturhandbuch (engl. Repair Manual) geben. Sie können zur Absicherung auch für Neuteile hilfreich sein.

Bevor eine Nacharbeit durchgeführt wird, sind folgende Schritte der zuständigen Spezialisten unerlässlich:

- Ermittlung von **Art und Ursache** des Schadens
- Abschätzung einer **eventuellen Schädigung** nach Art und Tiefe.
- Erarbeitung und Festlegung einer **Nacharbeit**.
- **Zulassung der Nacharbeit** (Konstruktion, Festigkeit, Lizenzgeber, Behörden usw.).
- **Dokumentierte Durchführung** der Nacharbeit.
- **Klärung wichtiger Fragen**:
  - Sind im fraglichen Bauteilbereich **Schwingbrüche im Betrieb** bekannt?
  - Gibt das **Wartungshandbuch** Hinweise?
  - Liegt der gerichtete Bereich in einer potenziell hoch schwingbelasteten Zone?
  - Schwingformen des Bauteils?
- Gegebenenfalls **versuchstechnische Nachweise** der Unbedenklichkeit.

© AxiPos GmbH Turbocon Consult
Lizenz nur zur Schulungsunterlage

Literatur zu Kapitel 18.5

18.5-1 D.A.Dornfeld, J.S.Kim, H.Dechow,J.Hewson, L.J.Chen, „Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V“, Berichte der internationalen Forschungsgemeinschaft für mechanische Produktionstechnik (CIRP Annals 1999, Manufacturing Technology), Volume 48/1/1999, Seite 73-76.

18.5-2 „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-007-7, American Society for Metals, 1986, Seite 500.

18.5-3 „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 16, Machining“, ISBN 0-87170-007-7, American Society for Metals, Ausgabe 4, 1999, Seite 1-48, Seite 838-843.

18.5-4 „FAA warns Boeing 717 operators of BR 700 engine component failure“, Zeitschrift „Flight International“, December 18, 2000.

18.5-5 NTSB, „Uncontained Engine Failure, Delta Air Lines Flight 1288, McDonnell Douglas MD-88, N927DA, Pensacola, Florida, July 6,1996“, NTSB/AAR-98/01, PB88-910401, DC96MA068. Seite 31.

18.5-6 W.D.Feist, F.Niklasson, K.M.Fox, „The Influence of Manufacturing Anomalies on Fatigue Performance of Critical Rotating Parts in the Aero-engine“, Paper im Rahmen des EC-Programms Nr. G4RD-CT2000-00400 5 GROWTH „MANHIRP-Integration of Process Controls with Manufacturing to produce High Integrity Rotating Parts for Modern Gas Turbines“, Seite 1-7.

18.5-7 B.Denkena, „Versuch: Ratterschwingungen an Werkzeugmaschinen“, Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), Mai 2003, Seite 1-17.

18.5-8 E.H.Phillips, „Pratt & Whitney Recalls Defective Turbine Blades“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 13, 1998, Seite 63.

18.5-9 W.D.Feist, G.Mook, J. Hinken, „Zerstörungsfreie Charakterisierung fertigungsinduzierter Anomalien in Flugtriebwerksrotoren“, Paper im Rahmen des GROWTH-Projekts G4RD-CT2000-00400 MANHIRP der Europäischen Union.

18.5-10 G.Mook, J.Simonin, W.D.Feist, H. Wrobel, J. Hinken, „Wolframkarbide in Titanlegierungen-Herkunft und Nachweis“, Paper im Rahmen des GROWTH-Projekts G4RD-CT2000-00400 MANHIRP der Europäischen Union.

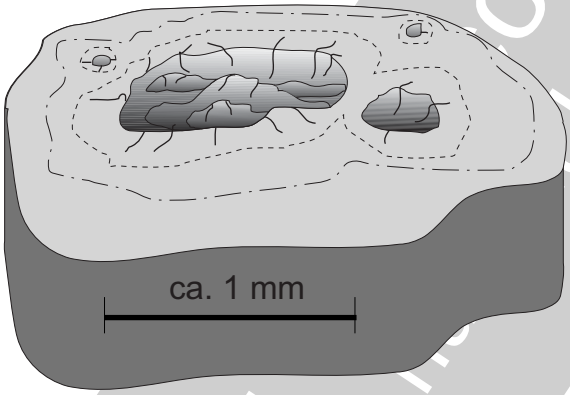
18.5-11 „ASM Handbook, Volume 14, Forming and Forging“, ISBN 0-87170-007-7, American Society for Metals, 1998, Seite 841 und 882.

18.5-12 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 74.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

18.6 Örtliche Überhitzungen. Funken, Metallspritzer, Lichtbogen



Unter einer **örtlichen Überhitzung** (Bild 18.6-1) wird im Folgenden eine konzentrierte, oft auf einen Mikrobereich beschränkte Energieeinbringung verstanden, die zu schädigenden Temperaturen führt. Zu erwarten sind **negative Auswirkungen** wie (Bild 18.6-2):

- Festigkeitsabfall im Zusammenhang mit Gefügeveränderungen wie Weich- oder Lösungsglühen.
- Induzierung gefährlicher Zugeigenspannungen.
- Versprödung während dem Aufschmelzen und Wiedererstarren. Gegebenenfalls mit Aufnahme versprödender Elemente (Sauerstoff, Kohlenstoff). Entstehung geometrischer Kerben (Krater)
- Rissbildung in der wiedererstarrten Schicht und im Grundmaterial. Häufig handelt es sich im Grundmaterial um Härterisse (Stähle) oder Warmrisse.

Typische **Ursache für schädigende, örtlich konzentrierte Überhitzungen** sind

- Funken (glühende, nicht aufgeschmolzene, metallische Partikel): Schleiffunken, Schweiß- und Schneidfunken (autogen, mechanisch, Bild 18.6-2), Hochgeschwindigkeitsfräsen.
- Metallspritzer (flüssige Schmelzperlen): Lotspritzer (im Ofen), Spritzer von Schweißungen (Bild 18.6-3 und Bild 18.6-4)
- Lichtbogen : An unzureichenden Stromkontakten (Bild 18.6-7, Bild 18.6-8 und Bild 18.6-9) in Galvanik, beim Schweißen und ECM durch versehentlichen Kurzschluss zwischen stromführendem Werkzeug (ECM, Schweißen, EDM (Bild 18.6-4) und dem Werkstück.
- Hochenergetische Strahlen: Laser, Elektronenstrahl, Plasma.

Versehentliche örtliche Überhitzungen können insbesondere die **Schwingfestigkeit** (LCF und HCF) gefährlich absenken (Bild 18.6-10) und zu Betriebsbrüchen führen (Bild 18.6-8). Verständlicherweise gilt das besonders für hochbelastete Bauteile wie Rotorkomponenten und Druckgehäuse.

Das Erkennen und der Nachweis solcher Schädigungen kann sich schwierig gestalten und erfordert Erfahrung (Bild 18.6-11 und Bild 18.6-13).

© Axel Rossmann - Consult als Schulungsunterlage nach Lizenz

© Axel Rossmann - Technodirekt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 18.6-1: *Um örtliche Überhitzungen zu vermeiden oder rechtzeitig zu identifizieren, ist in erster Linie eine gezielte Suche erfolgversprechend. Da ist die Kenntnis* ***relevanter Situationen der Fertigungsprozesse*** *erforderlich. Damit erhöht sich die Chance, folgende Fragen gezielter zu stellen und zu beantworten.*

- *Welche Bauteilbereiche sind wahrscheinlich betroffen?*
- *Welcher Kontroll- bzw. Prüfzeitpunkt im Fertigungsprozess ist erfolgversprechend?*
- *Wie sehen Schädigungen aus?*
- *Welche Abhilfemaßnahmen sind möglich?*

Spanende Bearbeitung und Trennschleifen: *Die Partikel entstehen in erster Linie bei Arbeiten die nicht am Bauteil vorgenommen werden. Dazu gehören erfahrungsgemäß Trennarbeiten die gewöhnlich nicht für die Fertigung von Triebwerksteilen zur Anwendung kommen, jedoch im Rahmen von* ***Bauarbeiten*** *im Bereich der Fertigung (Skizze oben links). Auch von Arbeiten an anderen,* ***benachbarten Bauteilen*** *können Funken stammen. Besonders exponiert sind große Flächen der Scheiben und Schaufeln. Ablagerungen werden besonders begünstigt, wenn große Bauteilflächen* ***ungeschützt horizontal gelagert*** *werden (Bild 18.3-5).*
Auch spanende Arbeiten am Bauteil selbst können gefährliche Funken produzieren. Beispielsweise können heiße Späne des ***Hochgeschwindigkeitsfräsens,*** *je nach Lage der Bearbeitungsfläche am Bauteil und der Zerspanungsrichtung, bestimmte Zonen gefährden.*

Schweißungen und Schmelztrennverfahren: *Die entstehenden* ***Schmelzperlen und -funken*** *werden sich nach einer Flugbahn ablagern (Bild 18.6-6). Ihr wahrscheinlicher Auftreffort ist oft vorauszusehen und gegebenenfalls zu schützen. Auch eine nachträgliche Kontrolle sollte sich auf diese Bauteilbereiche besonders konzentrieren (Bild 18.6-12). In der Skizze*

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Beispiele für typische Situationen und betroffene Bauteilzonen an denen örtliche Überhitzungen bevorzugt auftreten .

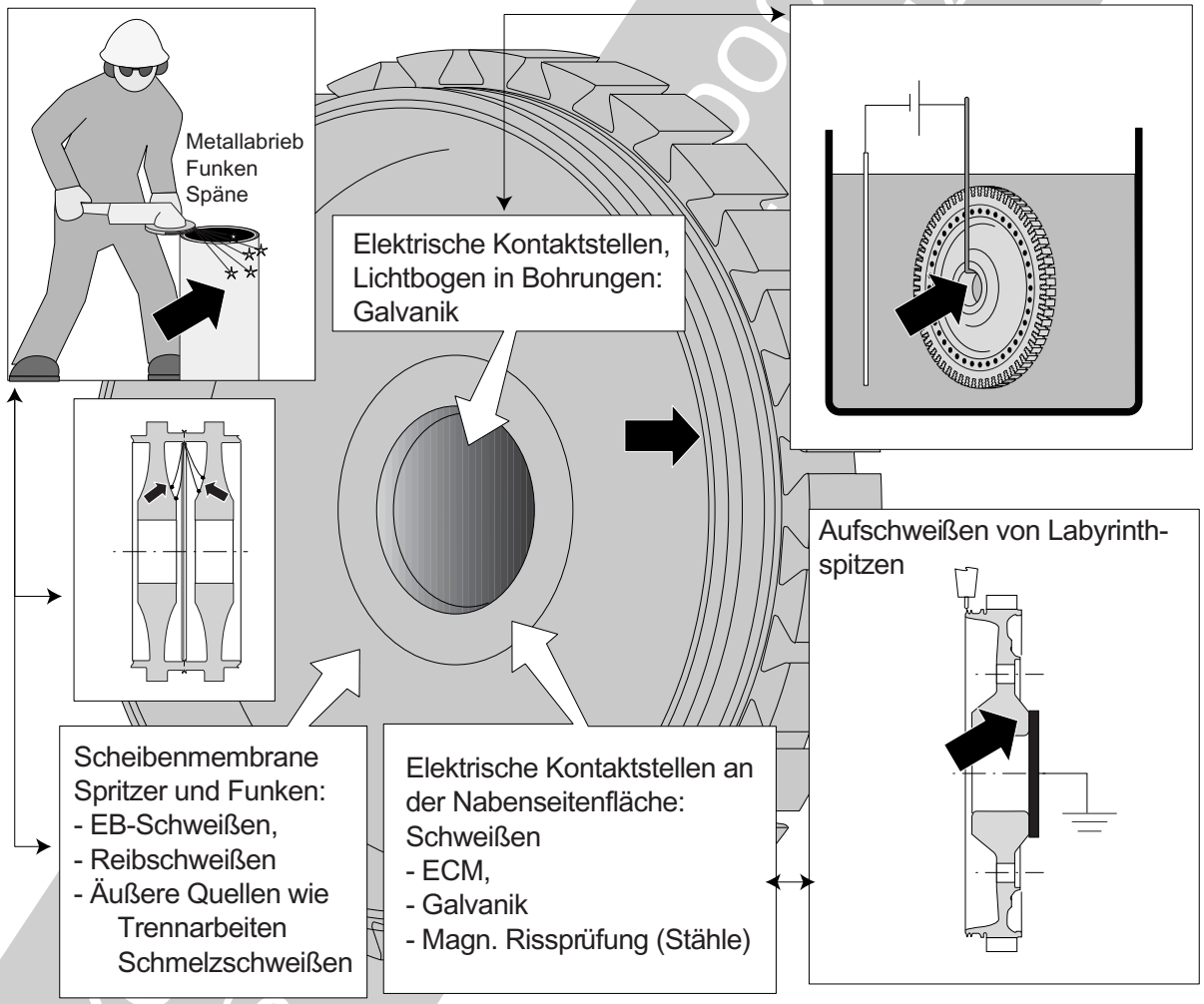


Bild 18.6-1

Mitte links wird dies am Beispiel einer Reibschweißnaht eines Verdichterrotors gezeigt. Die gefährdeten Zonen sind in diesem Fall die ***Scheibenmembrane*** *und* ***Nabenbohrung****.*

Elektrische Verfahren wie galvanische Prozesse, Elektrochemische Bearbeitung und Elektroschweißungen: *Ist der elektrische Kontakt schlecht, kommt es zumindest im Mikrobereich zum* ***Lichtbogen*** *(****elektrischer Funke****) mit hohem Schädigungspotenzial (Bild 18.6-8). Als wahrscheinlicher Schadensort muss deshalb die* ***vorgeschriebene Elektrodenbefestigung*** *gelten (Skizze unten rechts, Bild 18.6-10). Falls ein abweichender Befestigungspunkt für den Stromdurchgang gewählt wurde, bieten sich* ***verbotenerweise Naben- und Bolzenbohrungen*** *an. Diese Zonen sind auch für einen ungewollten Stromdurchgang, z.B. über eine Aufhängung, prädestiniert (Skizze oben rechts). Ihnen sollten bei Verdacht die besondere Aufmerksamkeit gelten. Eine Schädigung ist an diesen Stellen besonders gefährlich, weil sie*

als lebensdauerbestimmend hoch LCF-beansprucht gelten dürfen.
Weitere, von Lichtbögen besonders gefährdete Bauteilzonen sind an Auflagen stromführender Flächen zu suchen (z.B. Schweißtisch). Man erkennt leicht, dass bei typischen Rotorscheiben, eine ***Ringzone um die Nabenbohrung*** *oder die* ***Planflächen von Ringstegen*** *(Dichtungsträger, Zentrierbunde) für elektrische Funken besonders gefährdet sind.*

Bild 18.6-2: *Im Folgenden wird die* ***schädigende örtliche Überhitzungswirkung der Verfahren*** *betrachtet. Gewöhnlich steht diese im Zusammenhang mit einer Abweichung von vorgeschriebenen Vorgehensweisen und Verfahrensabläufen. Eine eventuelle Nacharbeit sollte sich nach Empfehlungen in Bild 18.6-14 richten. Die meisten örtlichen Überhitzungen im Fertigungsbereich sind auf folgende* ***Ursachen*** *zurückzuführen:*

- ***Strahlenergie*** *(EB, Laser): Bei diesen* ***Bohr- und Schweißverfahren*** *besteht die Möglichkeit, dass der Strahl abweicht oder die Energie zu hoch ist. So kann er einen schützenden Querschnitt oder eine Abdeckung durchdringen und die dahinter liegende Fläche schädigend aufheizen. Eine solche Situation kann sich bei Einstellarbeiten oder Fehlfunktionen im Prozess ergeben.*
Zu erwartende ***Schädigung****: Siehe „Lichtbogen“.*

- ***Lichtbogen*** *sind auf Grund der vielfachen Entstehungsmöglichkeiten eine besondere Gefahr. Sie bilden sich an Kontaktstellen einer Stromzufuhr (Bild 18.6-7, Bild 18.6-8 und Bild 18.6-9, Lit. 18.6-3) und an versehentlichen Zündstellen beim Schweißen. Schädigungen durch schlechte Kontakte oder Kurzschlüsse sind nicht immer an* ***Anlauffarben*** *zu erkennen. Oft findet ein solcher Vorgang im kühlenden Bad eines galvanischen Prozesses oder im Elektrolytstrom einer elektrochemischen Bearbeitung (ECM) statt. Die Wärmeableitung der Flüssigkeit und des Bauteils (Lit. 18.6-3), zusammen mit dem behinderten Zugang von Sauerstoff reicht aus um Anlauffarben zu verhindern.*
Zu erwartende ***Schädigung****: Örtliche Aufschmelzung mit Rissbildung und/oder hohen Zugspannungen in einer spröden wiedererstarrten Schicht (siehe auch Band 3, Bild 12.2.1.2-3). Es ist mit einer tiefgehenden Gefügebeeinflussung, merklicher Festigkeitseinbuße und Zugeigenspannungen (Bild 18.6-3) zu rechnen. Diese Effekte sind immer bei einer Aufheizung zu erwarten die Wärmespannungen im plastischen Bereich erzeugt. Die „Tiefenwirkung“ kann eine Nacharbeit problematisch machen.*

- ***Glühende feste Partikel*** *kühlen in den meisten Fällen direkt nach der Entstehung ab und treffen relativ energiearm auf eine Bauteiloberfläche. Es kann sich um „Funken“ aus Partikeln eines Schleif- oder Trennvorgangs oder Hochgeschwindigkeits-Zerspanverfahrens handeln (Bild 18.6-1).*

©Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Mögliche Schädigungen durch örtliche Überhitzung.

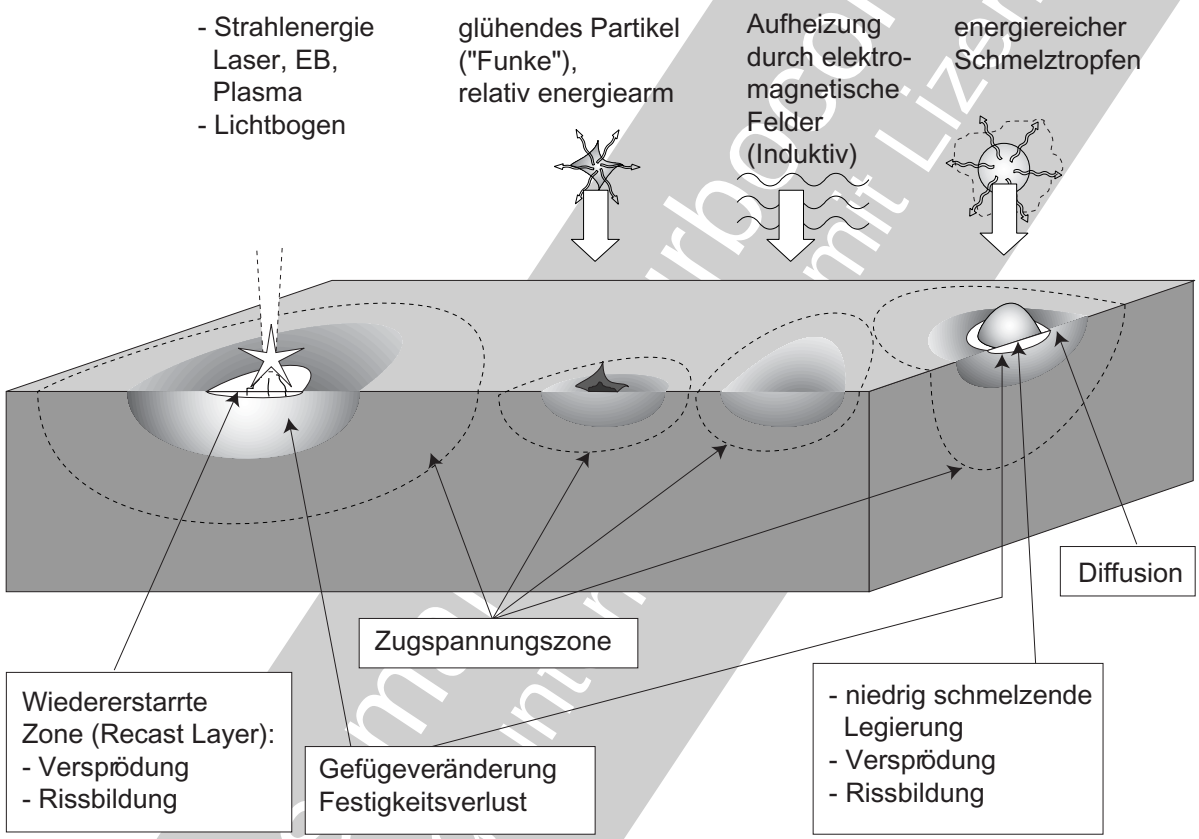


Bild 18.6-2

*Zu erwartende **Schädigung**: Flache Gefügeveränderung mit Festigkeitseinbußen und eine Zugspannungszone. Meist ist eine Nacharbeit mit akzeptablen Maßänderungen möglich.*

*- **Schmelztropfen,** die als Folge einer exothermen Reaktion („brennen") mit der Umgebungsatmosphäre sehr energiereich sind, treffen in flüssigem Zustand auf die Bauteiloberfläche. Es handelt sich in erster Linie um Tropfen von **Titanlegierungen**. Während des Flugs dieser Tropfen findet eine intensive Verbrennung mit dem Sauerstoff der Luft statt (Bild 18.6-1).*
*Zu erwartende **Schädigung: Anschmelzung und Legierungsveränderung mit Versprödung und Rissbildung**. **Fest haftende Partikel** bei deren gewaltsamem Entfernen die Gefahr **scharfkantiger Ausbrüche mit hoher Kerbwirkung** besteht. Gefügeveränderungen und Zugspannungen mit „Tiefenwirkung" sind zu erwarten. Deshalb ist eine eventuelle Nacharbeit problematisch .*

***-Hochfrequente Felder:** Denkbar ist eine Aufheizung mittels Hochfrequenz wie sie zur Erwärmung der Teile bei Lötungen oder beim Induktionshärten von Stählen zur Anwendung kommt.*
*Zu erwartende **Schädigung**: Relativ flache Gefügebeeinflussung mit Festigkeitsabfall. In Fällen schwacher Einwirkung kann Nacharbeit entfallen.*

© Axel Rosmanith
Das Urheberrecht ist
mit Lizenz

Im Bereich einer örtlichen Überhitzung ist immer mit Zugeigenspannungen zu rechnen!

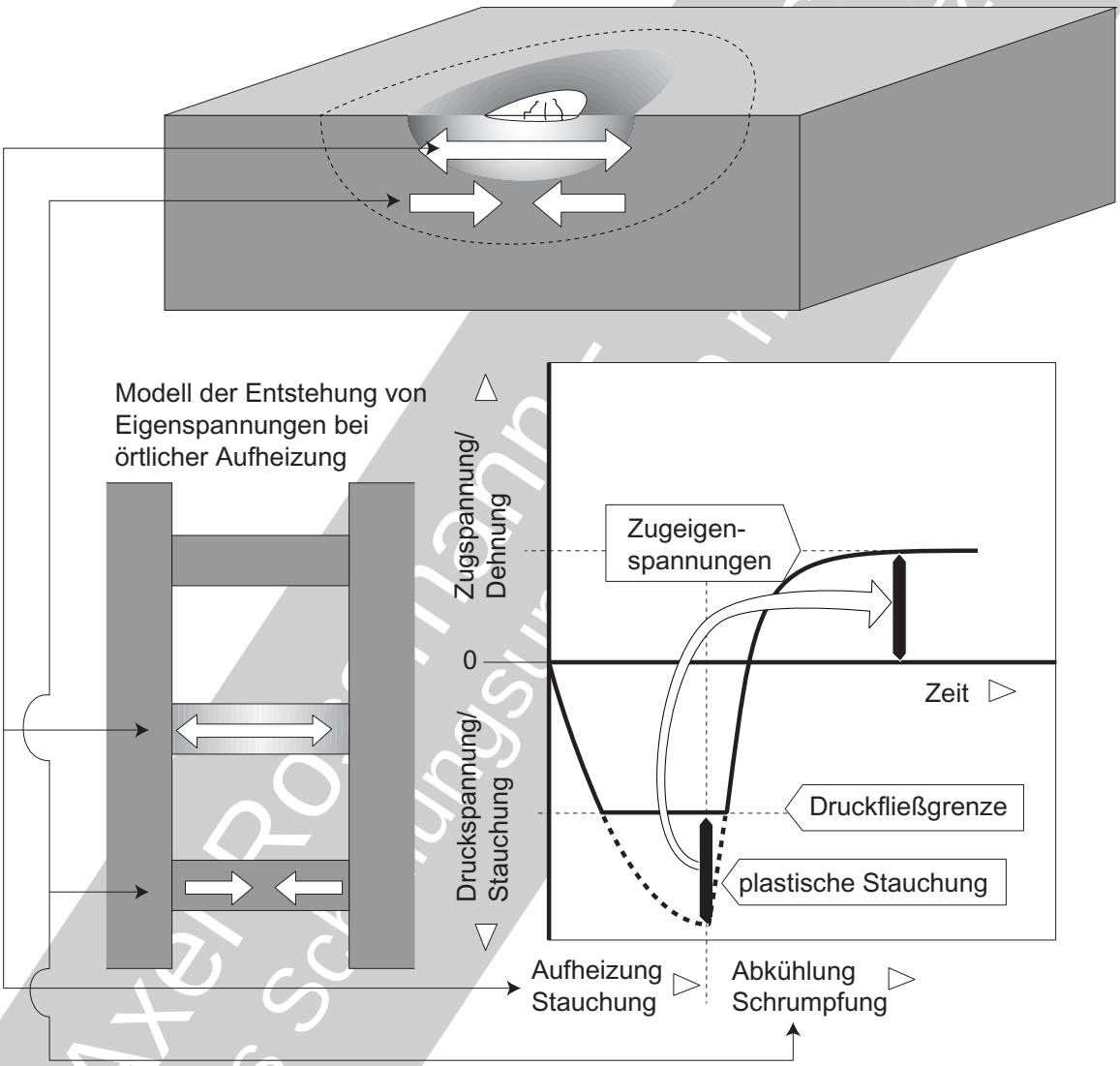


Bild 18.6-3

© Axel Rosemann - Ingenieurconsult als Schulungsunterlagen

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Bild 18.6-3: *Was bei einer örtlichen* ***Aufheizung in einem Bauteil*** *vorgeht, lässt sich an Hand eines einfachen Modells (Skizze unten links) plausibel zeigen.*
Als Modell für den verformungsbehinderten Vorgang einer örtlichen Aufheizung dienen zwei feste Wände. Sie simulieren das große, kalte und steife Volumen um die Aufheizung (Skizze oben). Zwischen den Wänden befindet sich ein materialschlüssig verbundener prismatischer Stab. Er soll das aufgeheizte Volumen darstellen. Beim Aufheizen des Stabs will sich dieser dehnen, wird jedoch von den Wänden behindert. Es bilden sich in dem Stab, d.h. der Aufheizungszone, Druck-Wärmespannngen (Diagramm unten rechts). Überschreiten diese Druckspannungen die Fließgrenze, kommt es zum plastischen Stauchen. Nach der Abkühlung ist der Stab um diese Länge verkürzt. Weil er jedoch mit den Wänden fest verbunden sein soll, entstehen entsprechend hohe Zugeigenspannungen.
Man erkennt, dass ***jede ausreichend intensive örtliche Aufheizung nach dem Abkühlen Zugeigenspannungen erwarten lässt****. Diese heben die Mittelspannung an und senken so die Schwingfestigkeit des Bauteils (Bild 18.4-4).* ***Allein aus dem Gesichtspunkt der Zugeigenspannungen ist also bei örtlicher Überhitzung von einer Schädigung*** *auszugehen. Ob diese tatsächlich vorliegt, ist aus den Ergebnissen einer ausreichend fachlichen Befundung abzuschätzen (Bild 18.6-13). Zu berücksichtigen ist, dass Zugeigenspannungen nur eine Form einer Schädigung darstellen (Bild 18.6-4).*

Bild 12.2.2.6-4: *Das* ***Schädigungspotenzial heißer Partikel*** *im Kontakt mit der Bauteiloberfläche ist durchaus unterschiedlich. Entsprechend der wahrscheinlichen, zur Aufheizung einer Kontaktfläche* ***zur Verfügung stehenden Wärmeenergie****, wird die folgende Einteilung getroffen:*

Glühende feste Partikel*: Solche „Funken" treten in erster Linie als Späne von Schleif- und Trennarbeiten oder einer Hochgeschwindigkeitszerspanung auf. Ein Sonderfall sind Funken die sich erfahrungsgemäß beim Reibschweißen bilden können (Bild 18.6-6). Partikel von Funken sind gewöhnlich sehr klein und speichern deshalb wenig Wärme.*
Die Aufheizung erfolgt beim Zerspanungsvorgang. Während des Fluges durch die Luft kommt es zur Oxidation. Je höher die Temperatur, umso heller der Funke. Helle, schnell verlöschende Funken weisen darauf hin, dass die Oxidation während des Flugs nicht ausreicht die Temperatur hoch zu halten. Besonders ***Funken von Titanlegierungen*** *leuchten über große Flugstrecken weiß. Eine heftige Oxidation im Flug führt zu einer hohen Temperatur die auch ein auftreffendes Partikel besitzt. Damit besitzt es ein großes Schädigungspotenzial. Hat sich andererseits beim Flug eine Oxidschicht gebildet, dürfte das ein Verschweißen mit der Bauteiloberfläche deutlich erschweren.*
In diesem Fall kann das Schädigungspotenzial der Funken als lose aufliegender Staub als gering eingestuft werden. Haften Partikel fester (z.B. Titanpartikel), sodass sie dem Fingernagel einen Widerstand entgegensetzen (Bild 18.6-13) ist die Oberfläche auf Schädigungsanzeichen (Ausbrüche, Reaktionsmerkmale) genauer zu prüfen (Bild 18.6-2).

Brennende Schmelztropfen: *Dieser Effekt kann offenbar beim Schmelzschweißen und -schneiden sowie Bohr- und Schneidvorgängen mit energiereichen Strahlen (Elektronenstrahl = EB, und Laser) und extremer Trenn- bzw.*

Fortsetzung auf Seite 18.6-9

© Aßmann - TUbpconsult als Unterlagen mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Heiße Metallpartikel können sich in der Wärmeenergie und dem Schädigungspotenzial deutlich unterscheiden.

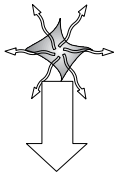
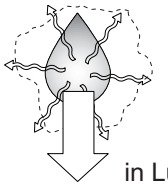
	 in Luft	 in Luft	im Vakuum oder Schutzgas
Potenzielle Wärmeenergie:	glühendes festes Partikel ("Funke")	exothermer metallischer (brennender) Tropfen (Titan in Luft)	Metalltropfen ohne merkliche Oxidation
Entsteht bei Verfahren wie:	■ Schleifen, ■ Trennen, ■ Hochgeschwindigkeitszerspanen, ■ Reibschweißen	■ Schleifen, ■ Trennen, ■ Schmelzschweißen	■ EB-Schweißen ■ Schneiden und Bohren von Metallen mit Hochenergiestrahlen ■ Schweißspritzer
Besonderheiten:	Nur wenn anhaftend Hinweis auf Schädigung. Kann größeren Abstand vom Entstehungsort überbrücken.	Kann größeren Abstand vom Entstehungsort überbrücken.	Kaum erkennbar, wenn im Vakuum oder Schutzgas entstanden und dann von der Oberfläche entfernt wurde.
Schädigung:	■ eher gering.	■ Große Tiefenwirkung ■ großer Aufheizungsbereich ■ Anschmelzung ■ Diffusion ■ Großer Wirkungsbereich von Zugspannungen aus plastischer Verformung Schrumpfung aus der Erstarrung ■ Versprödung durch ■ Anschmelzung ■ (Recast Layer) und/oder Sauerstoffaufnahme ■ Rissbildung, LME ■ Gefügeveränderung mit Festigkeitsabfall	■ merkliche Tiefenwirkung ■ merklicher Aufheizungsbereich ■ "Ankleben" bis zur ■ Anschmelzung ■ Zugspannungen aus plastischer Verformung Versprödung durch Anschmelzung (Recast Layer) ■ Rissbildung durch LME ■ Gefügeveränderung mit ■ Festigkeitsabfall ■ Ausbrüche (Kerben) bei Entfernung
Nacharbeit (Chance ist befundabhängig)	eher gut. eventuell abpolieren.	erschwert: merklicher Oberflächenabtrag notwendig	meist möglich, entsprechend notwendigem Abtrag

Bild 18.6-4

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Fortsetzung von Seite 18.6-7

Schleifbearbeitung (Lit. 18.6-1 und Beispiel 18.6-1) unter Atmosphärenbedingungen auftreten (Bild 18.6-5). Es ist davon auszugehen, dass ***Schmelztropfen*** *gewöhnlich eine deutlich höhere Masse aufweisen als die vorstehend angesprochenen Funken. Schon deshalb ist ihre Wärmeenergie relativ hoch, d.h. sie haben ein entsprechend schädigendes Potenzial. Verbrennt der Tropfen, handelt es sich um einen stark exothermen Vorgang der zumindest das Erstarren verhindert oder den Tropfen sogar weiter aufheizt. Ein solcher Vorgang ist für Nickellegierungen in normaler Atmosphäre kaum zu erwarten. Bei Titanlegierungen kann jedoch ein derartiger Vorgang beobachtet werden. Ein Indiz ist die hohe Leuchtkraft weiß strahlender „Partikel" und eine Funkenbildung beim Aufschlag.*
Weil es sich um eine Schmelze handelt, kommt es beim Aufschlag mit hoher Wahrscheinlichkeit zum innigen Kontakt mit der Werkstoffoberfläche (Bild 18.6-5). Durch diesen Tropfenschlag dürfte eine Oxidationsschicht um den Tropfen und die schützende dünne Oxidschicht auf dem Bauteil zerstört werden. So entsteht ein metallischer Kontakt. Damit ist ein Anlegieren und eine gute Wärmeleitung gegeben. In einem solchen Fall ist also mit gefährlichen örtlichen Schädigungen (Bild 18.6-5) bei merklicher Tiefenwirkung zu rechnen (Bild 18.6-3).

Metalltropfen ohne merkliche Oxidation: *Diese Situation ist bei einer Tropfenentstehung im Vakuum oder unter Schutzgas zu erwarten (Bild 18.6-6). Typische Beispiele sind EB-Schweißen, -Trennen und -Bohren sowie Schmelzschweißverfahren unter Schutzgas (Laser, WIG). Im Vakuum verliert der Schmelztropfen nur über Strahlung Energie. Schutzgas wirkt über Wärmeabfuhr kühlend. Der Schmelztropfen bildet in dieser Umgebung keine nennenswerte Oxidschicht und führt daher bereits bei geringer Aufschlaggeschwindigkeit zu metallischem Kontakt. Die Erfahrung bestätigt offenbar dieses Modell, indem Tropfen auf der Bauteiloberfläche haften und dort anlegieren.Um sie entsteht eine merklich wärmebeeinflusste Zone (Beispiel 18.6-1).*
Damit besteht ein beträchtliches Schädigungspotenzial (Bild 18.6-3 und Bild 18.6-5) mit einer gefährlich abgesenkten Schwingfestigkeit.

Bild 18.6-5: *Beim* ***Schmelzschweißen*** *und extremen* ***Trenn- bzw. Schleifvorgängen*** *(Skizze oben, Beispiel 18.6-1) können Metalltröpfchen entstehen (Bild 18.6-4). Ist die Abkühlung ausreichend langsam und/oder entsteht durch „Verbrennung" (Oxidation) in der Atmosphäre genügend Wärme, kann ein teilweise oder ganz* ***geschmolzener Tropfen auf die Bauteiloberfläche*** *treffen. Es ist anzunehmen, dass beim Aufschlag dünne, schützende Oxidschichten, wie sie z.B. auch auf Neuteilen aus Ni-Legierungen und Titanlegierungen zu erwarten sind, durchschlagen werden (****Modellvorstellung*** *Skizze Mitte links). Damit kommt*

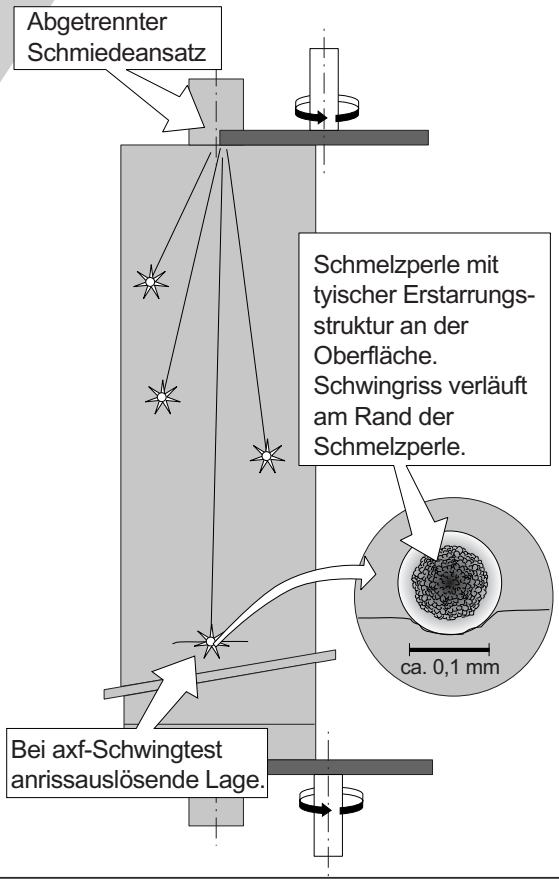
© Axel Bosse, Turbocon Consult
Abschrift dieser Unterlage nur mit Lizenz

es zum metallischen Kontakt zwischen Tropfen und Bauteiloberfläche. Die örtliche Aufheizung kann hohe Zugeigenspannungen, insbesondere am Rand der Schmelzperle in radialer Richtung, induzieren (Skizze unten links, Lit. 18.6-2 und Bild 18.6-3). Zusätzlich ist eine intensive Kerbwirkung von einer Formkerbe am Perlenrand, Festigkeits- und Härteänderungen auf Grund einer Gefügebeeinflussung (Anlasseffekt, Diffusion, Legierungsbildung) und Versprödung (Skizze unten rechts) zu erwarten. Wahrscheinlich ist bei einer Kombination dieser schädigenden Einflüsse um die Schmelzperle der Schwingfestigkeitsabfall besonders deutlich.

© AVP Possmann - Turboconsult
Weitergabe nur mit Lizenz

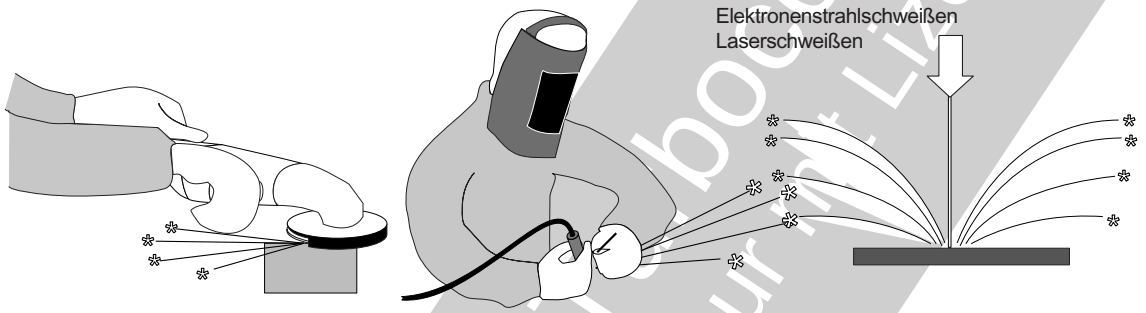
Beispiel 18.6-1 (Lit 12.2.2.6-1):
Zitat: "Several high-pressure compressor blades used in the first stage of an aeroengine exhibited low fatigue life...
The blades were made of titanium alloy...and were manufactured by the closed-die forging process. Targeting bosses at the extremities of the blades serve as reference points for dimensional control and are later removed by grinding...
During fatigue testing, a few blades were found to have unusually low ...(fatigue strength. The reason) was associated with spherical beads. The fatigue cracks had iniciated in the vicinity of these beads...The beads were essentially of the same composition as that of the blade material....they were in the fused condition at the time of impact on the blade. These particles had **sufficient velocity at the time of impact to become welded to the blade surface**.
It was learned that the targeting bosses of the forged blades were removed in the final stage by a grinding operation...(before fatigue testing).
The possibility of ground particles ...being thrown onto the blade surface, with still in the molten or semisolid condition existed if grinding was severe and coolant was unsufficient....(The beads had on) the blades ...a localized embrittlement effect, leading to initiation of fatigue cracking."

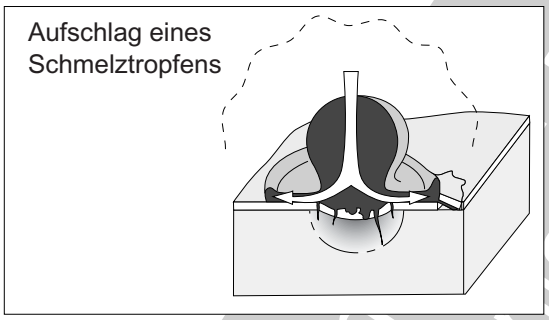
Kommentar: Es ist erstaunlich, dass auch **Schleif- bzw. Trennvorgänge**, wenn sie nur ausreichend intensiv sind, zu **geschmolzenen Tröpfchen** führen. Das heißt, dass die Späne sich nach der Entstehung ausreichend aufheizen. Dies spricht für weitere Wärmeentwicklung in einem exogenen Vorgang (brennen) wie er bei Titan im Zusammenhang mit Titanfeuern beobachtet wird.

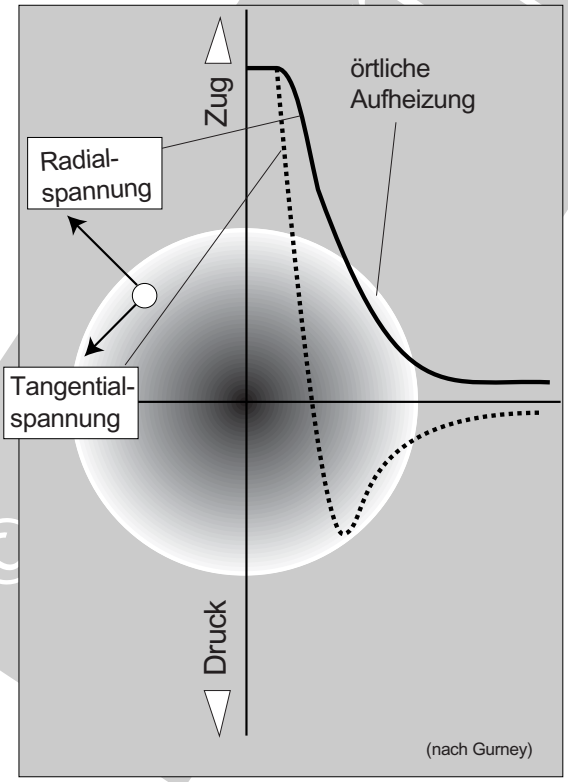


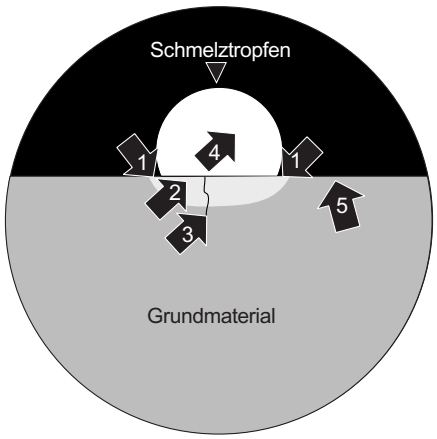
Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Spritzer aus flüssigem Metall treten häufig auf und schädigen Bauteile.









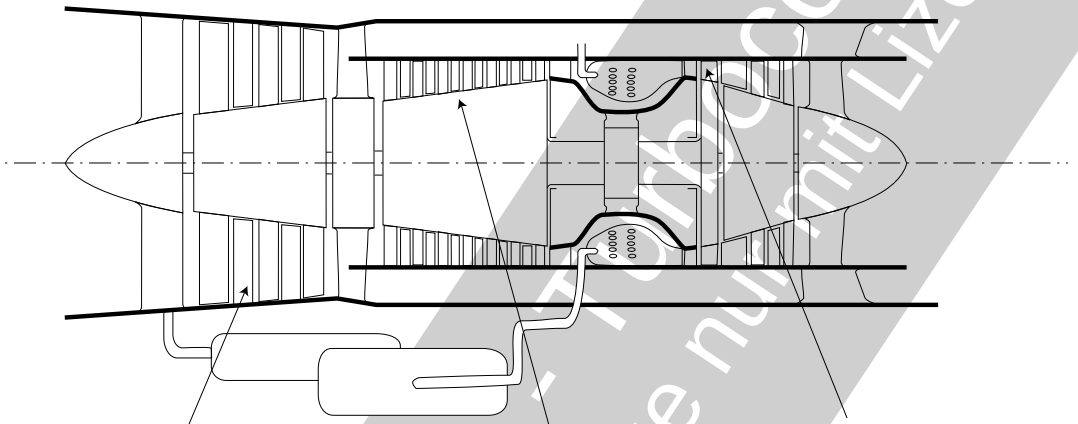
Schädliche Effekte eines Schmelztropfens auf einer Metalloberfläche:

- Kerbwirkung (Formkerbe) (1)
- Rissbildung (3)
- Eigenspannungen (5)
- Festigkeits-bzw. Härteabfall (z.B. Anlasseffekt Diffusion, Anlegieren) (2)
- Versprödung (z.B. Sauerstoffaufnahme, spröde Phasen) (2)
- Aufhärtung (z.b. Eindiffusion, Gefügeumwandlung) (2)
- Verstopfungsgefahr bei Heißteilen (z.B. in gekühlten Turbinenschaufeln)(4)

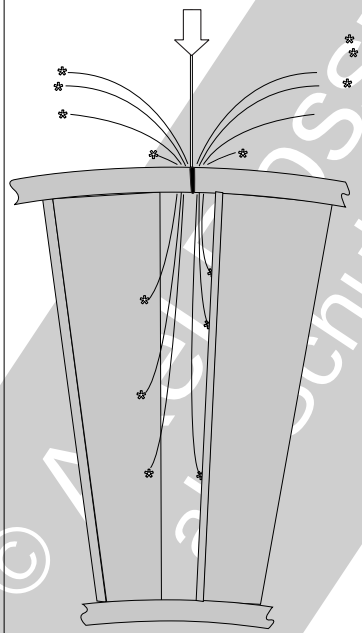
Bild 18.6-5

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

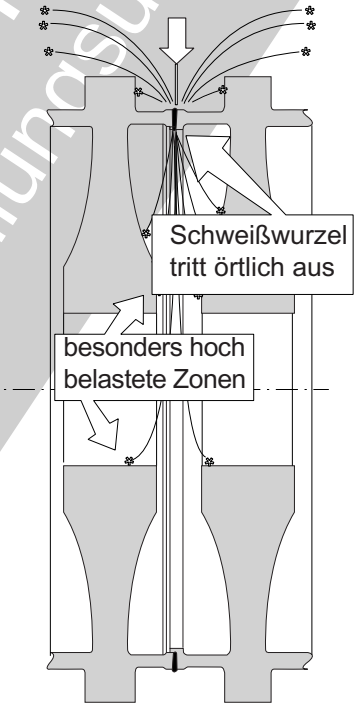
Typische Situationen die zu schädigenden Metallspritzern und Funken bei Schweißverfahren führen können.



Elektronenstrahlverschweißte Verdichterleitapparate können durch HCF Rissbildung versagen.



Elektronenstrahlverschweißte Rotortrommeln aus Titanlegierungen können durch LCF Rissbildung versagen. Ein zusätzliches Problem ist schlechte Einseh-, und Kontrollierbarkeit.



Reibgeschweißte Rotortrommeln können durch LCF Rissbildung versagen. Ein zusätzliches Problem ist schlechte Einseh-, und Kontrollierbarkeit.

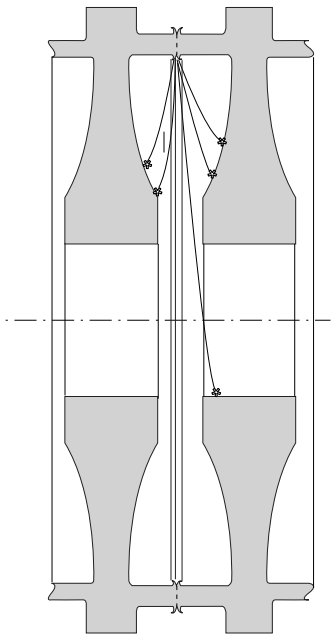


Bild 18.6-6

© Arbeitsgemeinschaft Turbocontrolt
Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

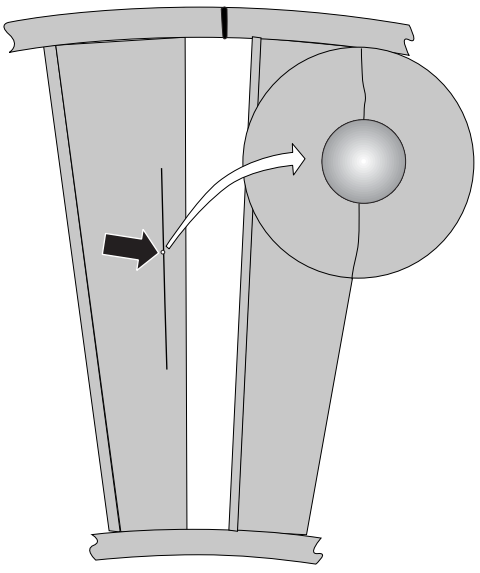
Bild 18.6-6: *Schweißverfahren werden bei modernen Triebwerken an vielen hochbeanspruchten Komponenten durchgeführt (Skizze oben). Dabei entstehen* ***Schmelzperlen*** *und Funken. Sie gefährden in besonderem Maß die HCF-Schwingfestigkeit (Beispiel 12.2.2.6-2) bzw. bei LCF-Beanspruchung die zyklische Lebensdauer. Typische Bauteile sind Verdichterleitapparate und Rotoren. Gerade ungeschützte, hochbelastete Bauteilzonen an Schaufeln (Schaufelblatt, Skizze unten links) und Scheiben (Nabenbereich mit Nabenbohrung, Skizze Mitte und rechts) sind für das Auftreffen von Schmelzperlen und energiereichen Funken prädestiniert. Zusätzlich ist es bedenklich, wenn die Scheiben so dicht im Rotorverband angeordnet sind, dass ein Abdecken gefährdeter Bereiche nicht möglich ist. Erschwerend kommt hinzu, wenn gefährdete Bereiche schlecht einsehbar und nicht abtastbar sind (Skizzen unten Mitte und rechts, Bild 18.6-12 und Bild 18.6-13). Damit entfallen wichtige Kontrollmöglichkeiten.*

Bild 18.6-7 *(Lit 18.6-3): Ein behinderter* ***Stromdurchgang*** *löst „****elektrische Funken****“ aus. Tatsächlich handelt es sich um einen kleinen Lichtbogen der intensiv Wärme abgibt. Eine Werkstückoberfläche wird dabei, abhängig von der übertragenen elektrischen Energie und der Dauer des Lichtbogens, stark aufgeheizt. Das führt zu einer Schädigung der Bauteiloberfläche und zu einem entsprechenden Schwingfestigkeitsabfall. Die Schädigung kann werkstoffabhängig auf unterschiedliche Weise erfolgen (Bild 18.6-2, Lit 18.6-9). Manche Anzeichen können als Indiz einer Schädigung gelten (Skizze oben, Bild 18.6-11):*

- *Schmelzkrater,*
- *Ausbrüche,*
- *Festigkeitsabfall als Folge einer Gefügeveränderung mit Härteabfall und anlegieren der Gegenelektrode,*
- *Versprödung in der wiedererstarrten Zone,*
- *Rissbildung,*
- *Zugeigenspannungen.*

Beispiel 18.6-2: Elektronenstrahlgeschweißte integrale Verdichterleitapparate sind im Fan-Bereich miltärischer Triebwerke üblich. Sie bestehen aus einer hochfesten Titanlegierung und zeigten u. a. nach Prüfläufen Schwingrisse. Die Risse verliefen längs der Hinterkante einzelner Leitschaufelblätter. Die **Risse gingen offenbar von kleinen anhaftenden Schmelzperlen** der gleichen Titanlegierung wie die Schaufeln aus. Eine genauere Untersuchung ließ, anhand der für eine Erstarrung typischen Oberflächenstruktur, auf Schmelzperlen schließen. Es ist bekannt, dass solche Schmelzperlen die Schwingfestigkeit stark herabsetzen (Bild 8.6-5). Damit konnten hochfrequente Schwingungen mit einer Knotenlinie längs der Schaufelhinterkante **Schwingrisse** auslösen.
Es zeigte sich, dass diese Schmelzperlen beim Verschweißen der Einzelschaufeln mit **Elektronenstrahl** (ES, engl. Electron Beam = EB) entstanden waren. Offenbar war die notwendige **Abdeckung nicht effektiv** genug.

HCF-Rissbildung an einem elektronenstrahlverschweißten Verdichterleitapparat.



© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Grundsätzlich sind schädigende Lichtbögen bei allen Prozessen des Fertigungsbereichs denkbar, die eines nennenswerten Stromdurchgangs bedürfen. Von den vielen Möglichkeiten, die in der Fertigung zu gefährlichen Lichtbögen führen können, werden im Folgenden typische angesprochen (Reihenfolge keine Wertung):

„A" Magnetische Rissprüfung": *Magnetische Bauteile wie Zahnräder werden zur Prüfung mit starkem Gleichstrom niedriger Spannung durchflutet. Dazu werden elastisch anformbare Elektroden, vorzugsweise Kissen aus Kupferdraht, angepresst. Ist diese Verbindung ungünstig, kann es zu elektrischen Funken und örtlicher Aufheizung kommen. Werden an vergüteten oder gehärteten Stahloberflächen Temperaturen über der Anlasstemperatur erreicht, erfolgt ein Härteabfall der einem Schwingfestigkeitsabfall entspricht (Bild 18.6-4).*

„B" Bauteilkennzeichnung mit Funkenschreiber oder elektrochemischen Verfahren *(Bild 18.6-9): Notwendigerweise ist das Bauteil Gegenpol zum Markierungswerkzeug. Liegt das Bauteil nicht ausreichend an der Stromzufuhr auf, kann es zu kleinen Lichtbögen und Schädigungen kommen. Wenn solche Funken an einer hochbeanspruchten Bauteilzone wie dem Tannenbaumfuß einer Turbinenschaufel entstanden sind, kann die zyklische Lebensdauer des Bauteils gefährlich absinken.*

„C" ungenügende Kontaktierung bei galvanischen Prozessen *(Bild 18.6-8 und Bild 18.6-9): Für den galvanischen Prozess muss das Bauteil elektrisch geladen sein. Dabei fließt ein Strom zwischen Elektrolyt und Bauteil. Ist der Kontakt nicht ausreichend, kommt es zu Lichtbögen und örtlichen Aufheizungen.* ***Befindet sich der Kontakt an einer hochbelasteten d.h. unzulässigen Bauteilzone*** *(Band 3, Bild 12.2.1.8.3-6)* ***wird die Betriebssicherheit gefährdet*** *(Bild 18.6-10). Ein solcher Zustand ist auch gegeben, wenn Strom versehentlich durch eine Aufhängung an einer Bohrung fließt.*

„D" Kontaktierung elektrischer Schweißverfahren: *Für Elektroschweißungen ist diese Problematik immer latent vorhanden, weil hohe Ströme fließen und eine nicht zu vernachlässigende Spannung anliegt. Ist der Kontakt des zu schweißenden Bauteils zur Erdung schlecht, können sich intensive Lichtbögen mit hohem Schädigungspotenzial bilden (Bild 18.6-9).*
Ein weiteres typisches Problem sind ***Zündstellen außerhalb der Schweißung****. Sie entstehen vorschriftswidrig durch Unachtsamkeit.*

„E" Elektrochemische Abtragungsverfahren *(ECM,Band 3, Bild 12.2.1.2-8): Das Verfahren benötigt hohe Ströme und respektable Spannungen. Damit haben Lichtbögen eine hohe Energie, die das Bauteil bei* ***Kontakt mit dem Werkzeug*** *in sehr kurzer Zeit schädigt (Lit 18.6-3). Lichtbögen können auch an der Stromeinleitung in das Bauteil entstehen. Obwohl moderne ECM-Maschinen im Falle eines Kurzschlusses zwischen Werkzeug und Werkstück Schnellabschaltungen besitzen, bleibt wegen der hohen elektrischen Energie, auch für eine kurze Ansprechzeit, Schädigungsgefahr.*

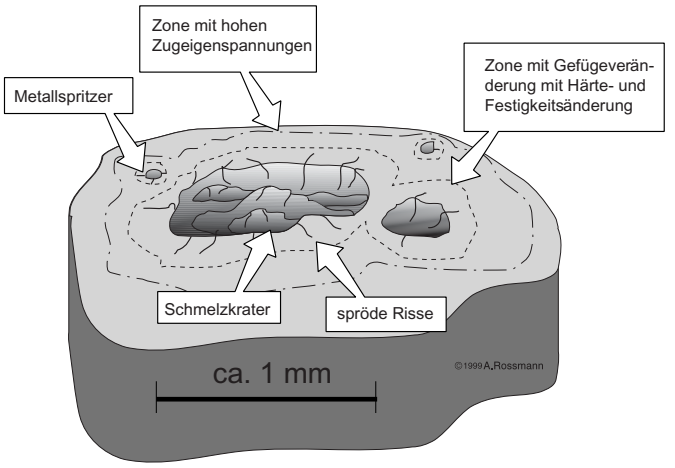
„F" Versehentliche Kontakte mit stromführenden Kabeln oder Sonden *(Bild. 18.6-9): Wie bereits gezeigt, benötigen viele Fertigungsprozesse eine Stromzufuhr. Diese erfolgt zum Werkstück häufig mit Kabeln. Ist die* ***Isolation*** *solcher* ***Kabel schadhaft*** *oder das* ***stromleitende Ende*** *nicht ausreichend geschützt, kann es beim Hantieren mit dem bereits angeschlossenen Bauteil zu Lichtbögen kommen (Bild 18.6-8). Das Schädigungspotenzial wird noch erhöht, wenn der* ***Lichtbogen mit dem Kabel über das Bauteil gezogen*** *wird.*

© Axel Bossmann - Tübingen Consult
Lehrunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Kurzschluss- und Kontakt -"Funken" senken die Schwingfestigkeit und damit die Lebensdauer eines Bauteils gefährlich ab.

Typische Schädigungen im Bereich einer Funkenbildung.



Typische Möglichkeiten der gefährlichen Funkenbildung in der Fertigung

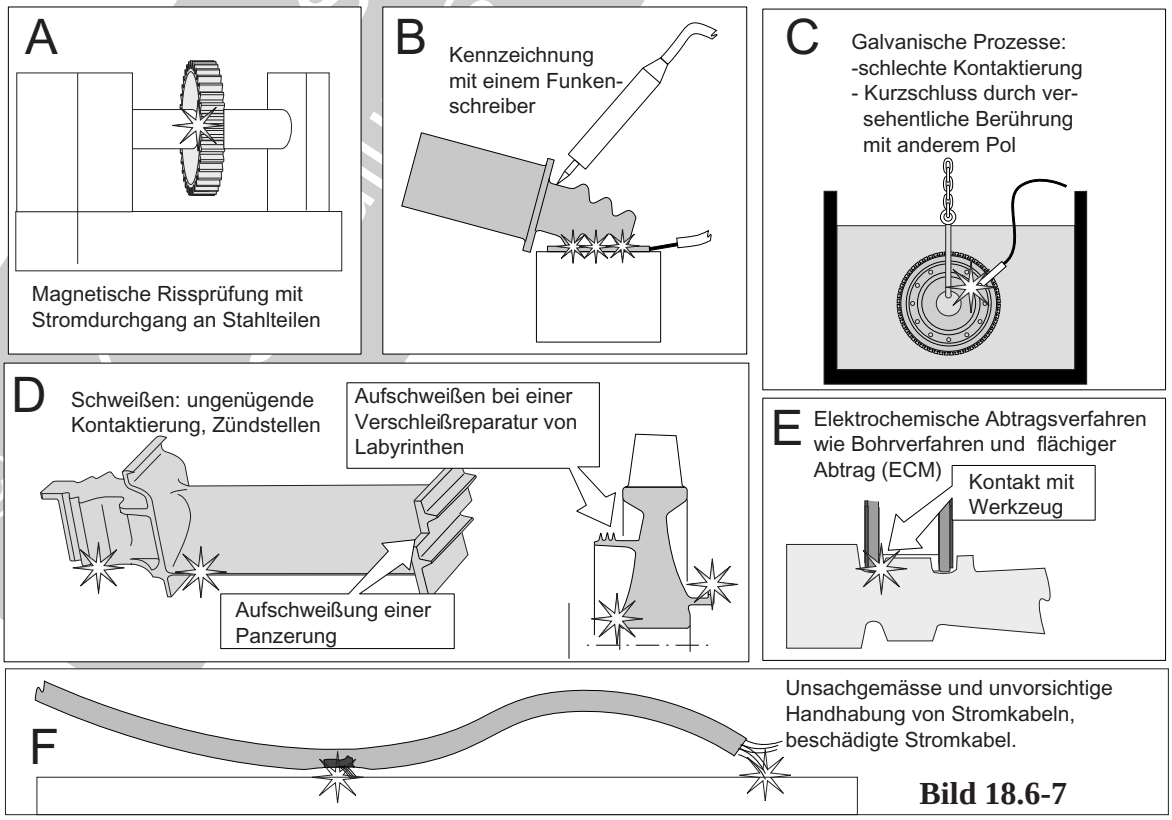


Bild 18.6-7

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

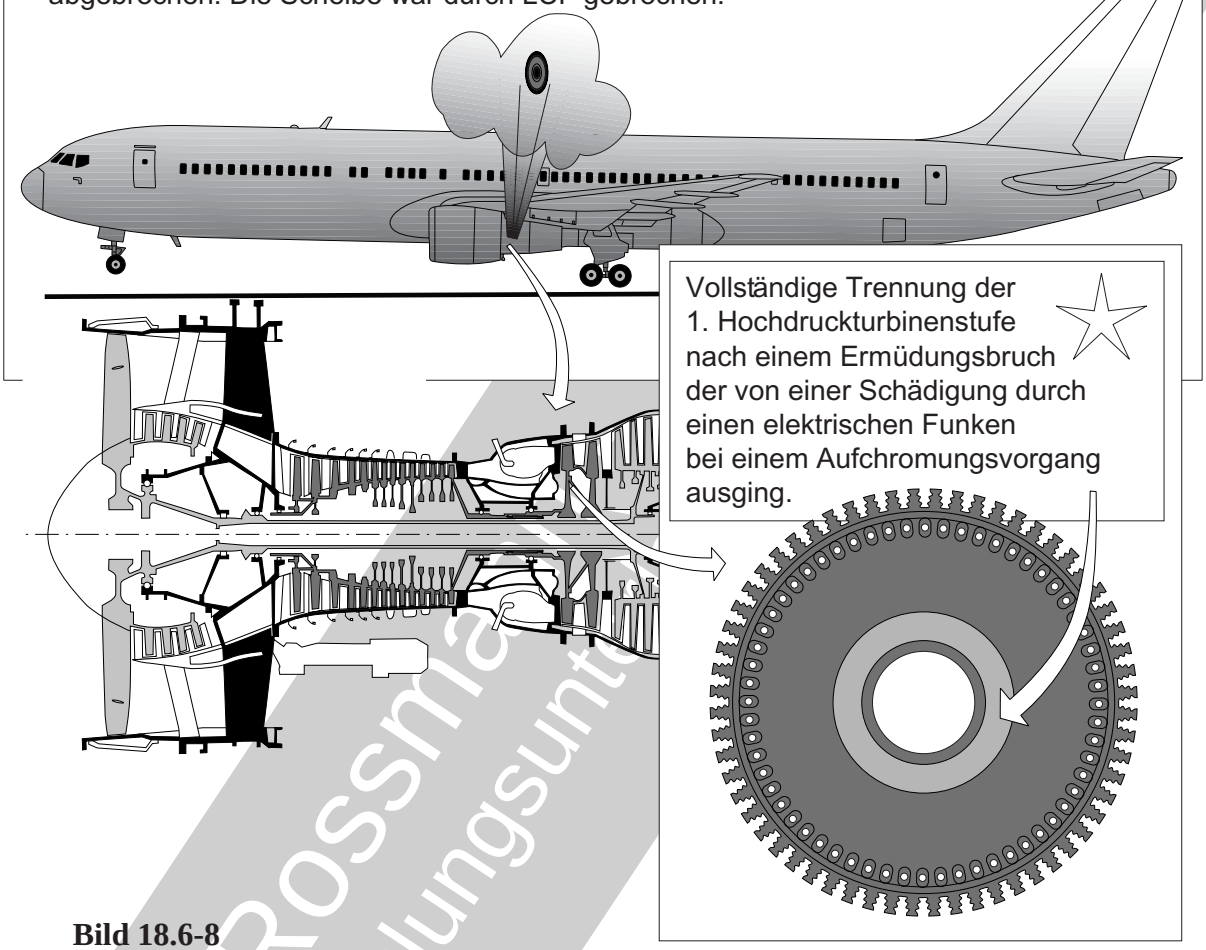


Bild 18.6-8

Bild 18.6-8 *(Lit 18.6-4 und Lit. 18.6-5): In diesem Fall entstand offenbar unbemerkt bei einer* ***Reparaturverchromung*** *ein* ***elektrischer Funke****. Dieser scheint die Scheibe derart geschädigt zu haben, dass es zum* ***Bruch und Abschleudern der Scheibe*** *kam. Leider gibt die verfügbare Literatur zu den genaueren Umständen keine weiteren Informationen. Trotzdem zeigt das Beispiel eindrucksvoll die Risiken elektrischer Funken und Lichtbögen bei Kontaktproblemen und/oder unbeabsichtigten Kontakten von Elektroden mit dem Bauteil.*

Merksatz:

Ungewollte elektrische **Funken an einer Bauteiloberfläche sind immer ein Alarmzeichen**. Gegebenenfalls ist eine Risikobewertung von einem Fachmann erforderlich.

© Axel Rossmann Ausbildungsunterlagen

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Selbst beim elektrochemischen Kennzeichnen sind gefährliche elektrische Funken nicht auszuschließen. Besonders unangenehm ist, dass es an unterschiedlichsten Teilen auftritt.

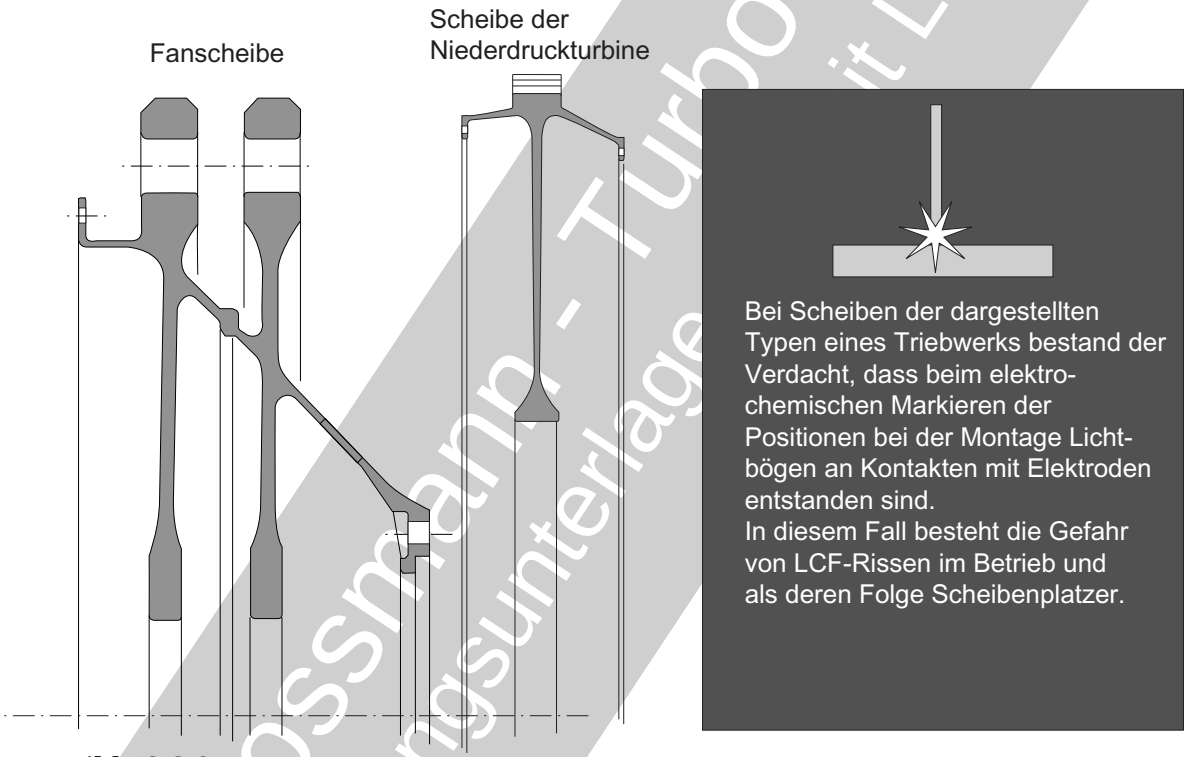


Bild 18.6-9

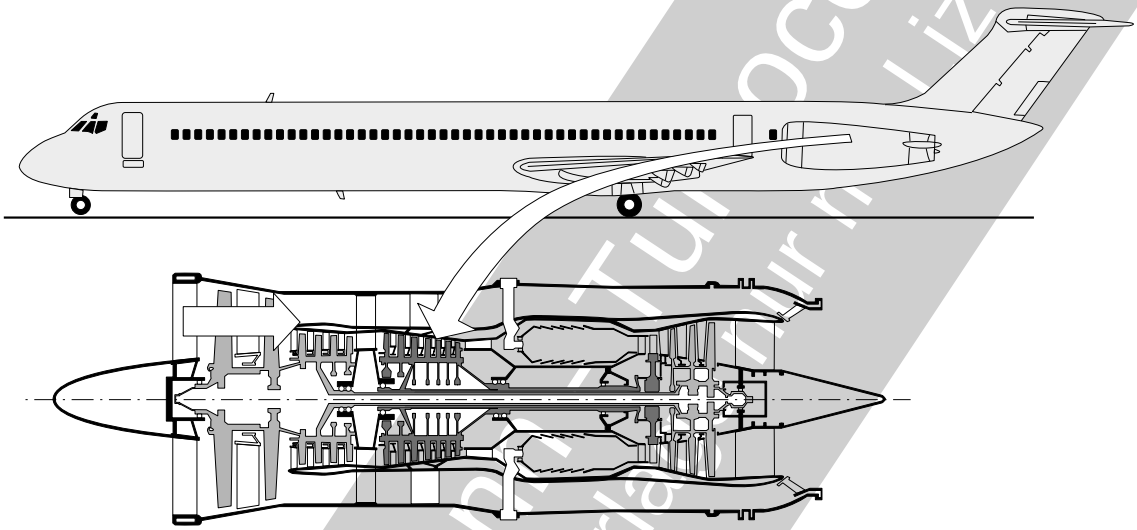
Bild 18.6-9 *(Lit. 18.6-6 und Lit 18.6-7): An einem zyklischen Bauteiltest kam es zu einem LCF-Versagen einer Niederdruck-**Turbinenscheibe** (NDT-Scheibe, engl. LPT-disk). Die anschließende Laboruntersuchung ergab, dass der LCF-Riss von einer „**Zündstelle**“ wie sie durch einen **Lichtbogen (engl. „electrical arc-out“) an einem schlechten elektrischen Kontakt** entsteht, ausging. Diese Fehlstelle entstand bei **unachtsamem Hantieren mit einer elektrochemischen Sonde** während der Positionskennzeichnung an der Scheibe in der Montage. Geraten solche Scheiben in das Triebwerk, ist nach einer ausreichenden Zahl von Betriebszyklen mit Scheibenbruch zu rechnen.*

*Suspekt waren verschiedene Scheibentypen aus der Niederdruckturbine und die Fanscheibe einer Vielzahl von Triebwerken der gleichen „Familie“. Die zuständigen Stellen schrieben als Maßnahme vor, die Teile **visuell** zu inspizieren und einer **Wirbelstromprüfung** zu unterziehen. Diese kombinierte Prüfung hat nach festgelegten Zyklenzahlen, für NDT-Scheiben nach jeweils 3100 Zyklen, zu erfolgen. Alternativ sind die Scheiben auszusondern.*
Die besondere Problematik war offenbar, dass die Schädigung bei der Montage auftrat, d.h. eine ausreichende Prüffolge nicht mehr zu erwarten war.

© Axel Rossmann - Turbo... als Schulungsunterlage mit Li...

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Funkenbildung an Kontaktstellen bei der galvanischen Beschichtung können Scheibenbrüche auslösen und ungeheure Kosten verursachen.



Bei der galvanischen Beschichtung der Verdichterscheiben mehrerer Stufen des Hochdruckverdichters bestand offenbar die Gefahr einer gefährlichen Funkenbildung an einer Kontaktstelle in Scheibenbohrungen.

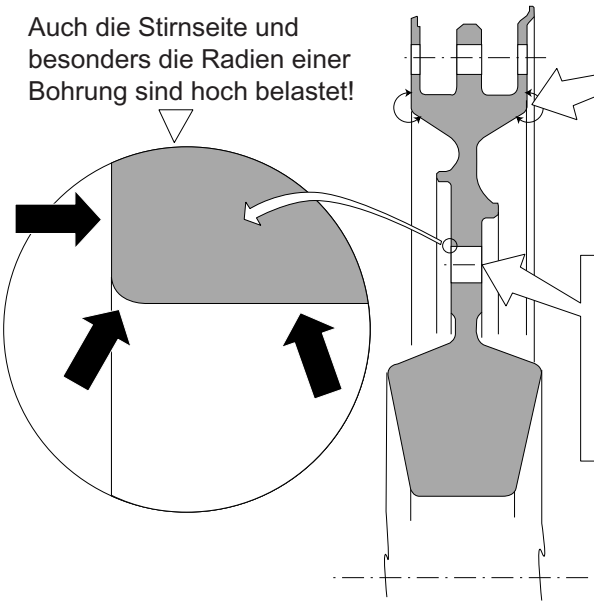


Bild 18.6-10

! Niemals Kontaktstellen zur Stromeinleitung in und um Bohrungen von Scheiben.

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Bild 18.6-10 *(Lit. 18.6-8): Betroffen waren* ***Scheiben mehrerer Verdichterstufen*** *einer Vielzahl von Varianten des gleichen Triebwerkstyps in unterschiedlichen Flugzeugen, die in großer Zahl zum Einsatz kommen (Skizze oben). Es bestand der Verdacht, dass Bohrungen von* ***Funkenbildung*** *geschädigt wurden (Skizze unten).* ***Weil es sich bei Bohrungen in Scheiben grundsätzlich um potenziell hochbeanspruchte, lebensdauerbestimmende Bereiche handelt, dürfen sie nicht zur Stromeinleitung verwendet werden****. Nicht nur die Bohrung selbst ist gefährdet, auch die Ringzone um den Ein- und Austritt. Die Verdichterscheiben dieses älteren Triebwerkstyps bestehen aus einem Vergütungsstahl. Dieser ist nicht ausreichend korrosionsfest und wird deshalb von einer galvanischen Ni-Cd-Beschichtung geschützt. Die Bohrungen in den Scheiben dienen unterschiedlichen Zwecken: Der Verschraubung, Luftführung und Spannungsentlastung des Lochkreises. Sie scheinen sich geradezu für die* ***Befestigung einer Stromführung (Verschraubung, Haken) anzubieten****. Ist das Galvanikpersonal nicht ausreichend fachkundig und/oder liegen Vorschriften die eine solche Stromeinleitung verbieten nicht vor, sind Voraussetzungen für eine Funkenbildung mit umfangreichen Folgeschäden gegeben.*

Merksatz:

Niemals Kontaktstellen zur Stromeinleitung in und um Bohrungen in Scheiben anbringen!

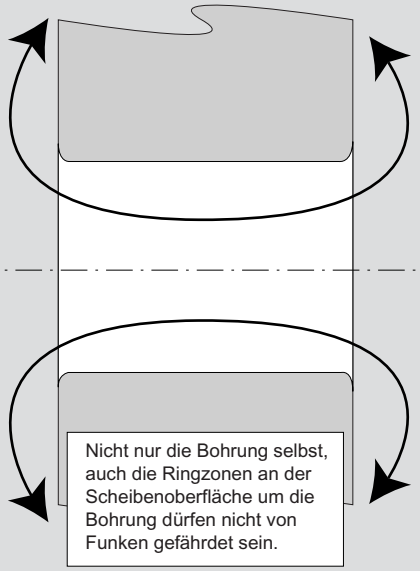


Bild 18.6-11: Anlauffarben *können ein* ***wichtiger erster Hinweis*** *für eine schädigende Temperatureinwirkung und deren Ursache sein. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass ungewöhnliche* ***Anlauffarben nicht mit einer Nacharbeit*** *(z.B. örtliches Polieren)* ***entfernt werden dürfen, bevor sie von einem zuständigen Fachmann begutachtet wurden****. Die Bewertung von Anlauffarben und deren Aussage ist durchaus problematisch. Dazu muss man sich vergegenwärtigen, dass Anlauffarben auf dünnen Oxidschichten beruhen. Solche Oxidschichten können sich auch bei niedrigen Temperaturen, z.B. als anodische Oxidation, bilden. Deshalb sind* ***Anlauffarben nicht von vornherein ein Anzeichen für eine Schädigung****. Sie können jedoch als Hinweis dienen, die betroffene Bauteilzone gezielt auf bedenkliche Erscheinungen zu kontrollieren. Das* ***„Blue Etch Anodizing“*** *(****BEA****, Band 3, Bild 11.2.2.1-6) von* ***Titanlegierungen*** *nutzt Anlauffarben zum Auffinden von Gefügebesonderheiten. Die Stärke der Oxidschicht beeinflusst die Farbe und wird von vielen Einflüssen bestimmt. Hierzu gehören:*

- *Werkstoff, Neigung zur Oxidation,*
- *Reaktivität der Oberfläche,*
- *Atmosphäre: Sauerstoffangebot,*
- *Verunreinigungen der Oberfläche,*
- *Zeit bei Oxidationsbedingungen wie einer erhöhten Temperatur.*

Besonders ***Titanlegierungen reagieren sehr sensibel auf kleinste Verunreinigungen der Oberfläche****. Das macht eine Anlauffarbe nur*

© Axel Rossmann - Technik als Schulungsunterlagen

sehr begrenzt aussagefähig zur Ursache ihrer Entstehung. Wichtiger sind Form bzw. Begrenzung sowie die Lage ***ungewöhnlicher Anlauffarben am*** *Bauteil (Skizze oben).*

Gradlinige Begrenzungen *weisen auf Kontakt mit einem anderen Bauteil hin, von dem sich die* ***Kante*** *abzeichnete. Das kann während der Temperatureinwirkung aber auch vorher (Verunreinigung) stattgefunden haben. Denkbar ist auch, dass die Begrenzung dem Spiegel eines Bads zugeordnet werden kann, in welches das Bauteil vor der Erwärmung teilweise eintauchte.*

Punktförmige Verfärbungen *weisen auf* ***Spritzer*** *von Verunreinigungen hin. Es handelt sich meist um Flüssigkeiten, Metalltröpfchen oder Staub (Bild 18.3-1 und Bild 18.3-2.1) von denen die Oxidation beeinflusst wird. Eine zur verfärbten Fläche zentrische,* ***fühlbar erhabene Veränderung*** *(Bild 18.6-13) weist auf einen Metallspritzer (Schmelzperle, Span) hin. Schmelzkrater sind dagegen die Folge eines Lichtbogens bei Stromdurchgang (Bild 18.6-7 und Bild 18.6-8).*

Fließspuren*: Anlauffarben mit der Spur einer stehenden oder abfließenden Flüssigkeit, charakteristisch um Kanten oder in „****schöpfenden****“ Vertiefungen, lassen auf Verunreinigungen vor einer Erwärmung schließen.*

Orientierung zu Bearbeitungsspuren *weist auf den Bearbeitungsvorgang (z.B. Schleifen, Hochgeschwindigkeitszerspanen) als Ursache für die Erwärmung hin.*

Konzentrische Anlauffarben *um Bohrungen können ein Heißlaufen des Bohrers anzeigen (Band 3, Bild 12.2.1.1-9.1 bis -9.5).*

Die Lage einer Verfärbung *am Bauteil kann ebenfalls wichtige Hinweise auf die Entstehungsursache geben. Bei Auflageflächen sind Verschmutzungen als Ursache naheliegend. Kleine verfärbte Bereiche an Kanten weisen auf Stromdurchgang hin (z.B. unbeabsichtigter Stromkontakt). Bestimmte Bauteilzonen können auf örtliche angewandte Bearbeitungsverfahren hinweisen.*

Unterhalb einer Verfärbung bzw. Anlauffarbe *können sehr unterschiedliche Beeinflussungen bis zur Schädigung liegen (Skizze unten, Bild 18.6-1). Ein besonderes Problem besteht darin,* ***Art und Ausbreitung dieser Schädigung*** *zu ermitteln (Bild 18.6-14). Wurden ausreichend hohe Materialtemperaturen erreicht, lässt sich eine Schädigung in erster Linie auf* ***Gefügeveränderungen*** *mit Festigkeitsabfall zurückführen. Dieser kann auf einer Kombination von Einzeleinflüssen wie Versprödung, Härteabfall, Kerbwirkung beruhen. Hinzu kommt der ungünstige Einfluss möglicher* ***Zugeigenspannungen*** *auf die Schwingfestigkeit des Bauteils.*

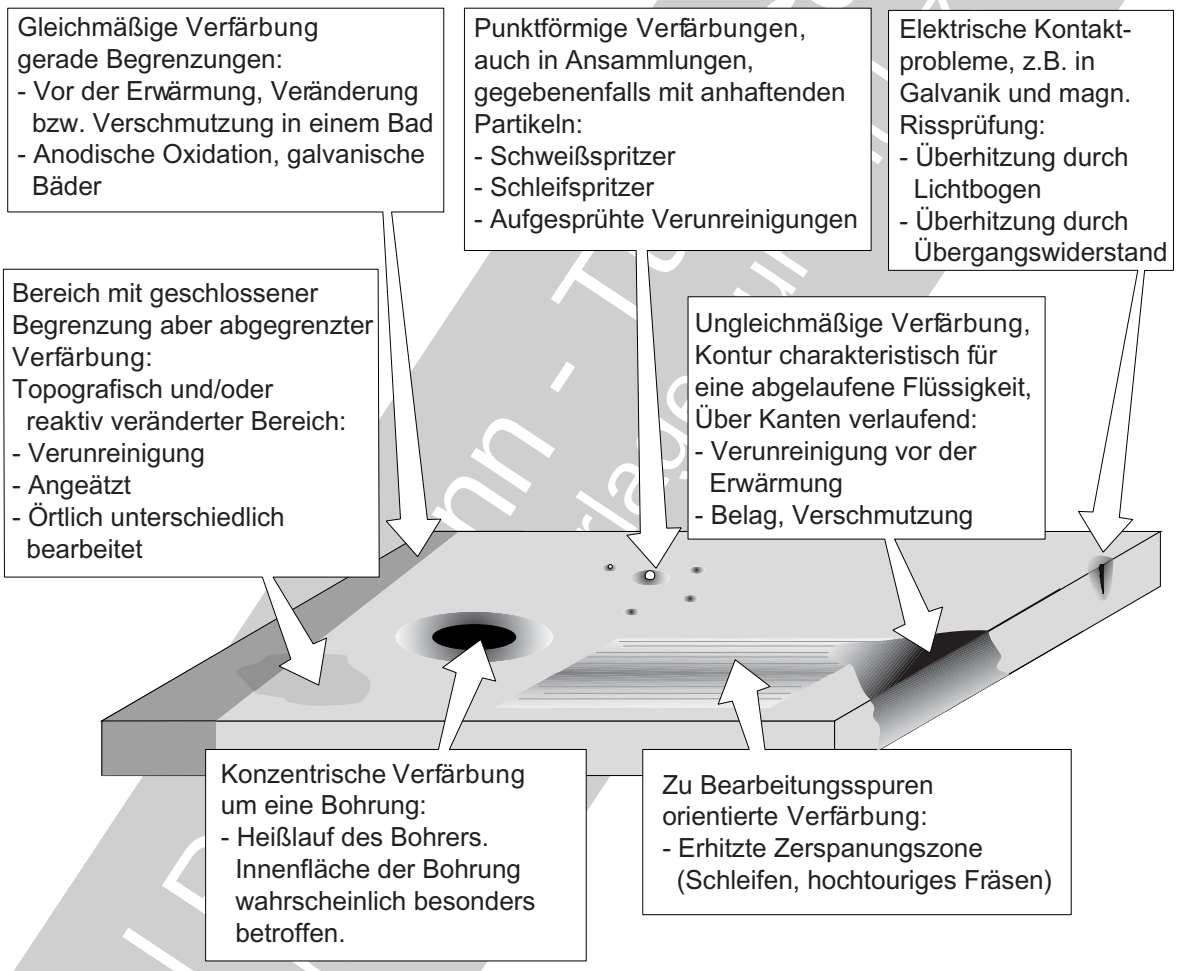
Bild 18.6-12: Prävention *gegen metallische* ***Spritzer bzw. Schmelzperlen*** *ist nachträglichem Suchen von Fehlstellen vorzuziehen. Es ist sicherer und kostengünstiger als ein Aussondern oder eine Nacharbeit. Solche Spritzer sind verfahrenstypisch, deshalb ist mit ihnen zu rechnen und gezielte Gegenmaßnahmen sind zu ergreifen. Nicht nur beim Elektronenstrahl- und Laserschweißen können gefährliche Metallspritzer auftreten, sondern erfahrungsgemäß auch beim Reibschweißen. Hier könnte eine Schutzgasatmosphäre in einem umschlossenen Raum des Bauteils (z.B. im Rotorinneren) schadensbegünstigend wirken, weil sich keine schützenden Oxidschichten bilden. Treffen Spritzer auf eine Werkstückoberfläche, ist mit einer deutlichen Abnahme der Schwingfestigkeit an der Kontaktstelle zu rechnen (Bild 18.6-5 und Bild 18.6-6). Um dieses Risiko zu vermeiden, muss ein direkter Kontakt der Metalltropfen bzw. Spritzer mit der Werkstoffoberfläche verhindert werden. Hierfür bietet sich eine* ***Zwischenlage bzw. Beschichtung***

Fortsetzung auf Seite 18.6-22

© Axel Possmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Was Anlauffarben und Verfärbungen über ihre Ursachen sagen.



Was sich unter einer Verfärbung verbergen kann:

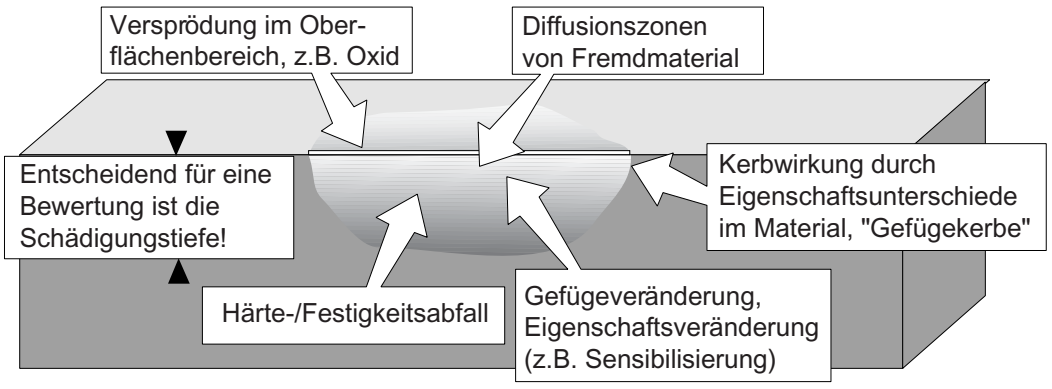


Bild 18.6-11

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Fortsetzung von Seite 18.6-20

oder eine Abschirmung *an. Dieser Schutz muss einige Anforderungen erfüllen:*

- ***Abschirmung*** *gegen direkten metallischen Kontakt und Überhitzung.*
- ***Keine Reaktion mit dem Grundmaterial*** *im Auftreffbereich des Spritzers.*
- ***Keine Beeinträchtigung des Schweißvorgangs*** *(z.B. kein Abdampfen im Vakuum)*
- *Kostengünstiges und* ***schädigungsfreies Aufbringen****.*
- *Kostengünstiges und* ***schädigungsfreies Entfernen und Entsorgen****. Sichere* ***Vermeidung von Rückständen*** *die bei nachfolgenden Fertigungsschritten (z.B. Wärmebehandlung) schädigend wirken können.*

In der Praxis haben sich die folgenden Maßnahmen als Schutz gegen auftreffende Schweißspritzer bewährt:

Aluminium-Klebefolien bzw. Klebebänder *(Skizze oben links): Die Schutzwirkung dieser Folien ist erfahrungsgemäß sicher. Die Aufbringung kann, abhängig von der Bauteilgeometrie und Komplexität, sehr aufwändig sein. Besonders wenn sphärische Flächen ein Tiefziehen der Folien erfordern. Auch das spätere Entfernen erfordert nicht zu vernachlässigende manuelle Tätigkeit.*

Temperaturbeständige Beschichtung *(Skizze oben Mitte): Erfolgversprechend sind* ***anorganische Hochtemperaturlacke*** *mit geeigneter Füllung. Meist handelt es sich um Al-Pulver in keramischem Binder, (siehe auch Band 3, Bild 12.2.1.5-2 „L“) oder Bornitridschlicker. Die sichere Funktion einer solchen Beschichtung ist in* ***geeigneten Versuchen nachzuweisen****. Neben einer an allen Abdeckflächen und Kanten zu gewährleistenden Mindestdicke und gleichmäßiger Qualität, ist auch ein unproblematisches Entfernen sicherzustellen. Zu vermeiden sind Schichtbestandteile die in nachfolgenden Fertigungsschritten schädigende* ***Rückstände*** *einbringen. Dazu gehören Halogene wie Fluor- und Chlorverbindungen („Teflon“) die bei einer Wärmebehandlung Spannungsrisskorrosion auslösen können (Band 3, Bild 12.2.1.7-8). Das gleiche gilt für Entschichtungsbäder. Dabei sind auch Verschmutzungen von Prozessmedien wie Bädern (Band 3, Bild 12.2.1.7-2) und/oder abrasivem Strahlgut (Bild 18.3-1.1) zu berücksichtigen die sich im Fertigungsprozess verteilen können.*

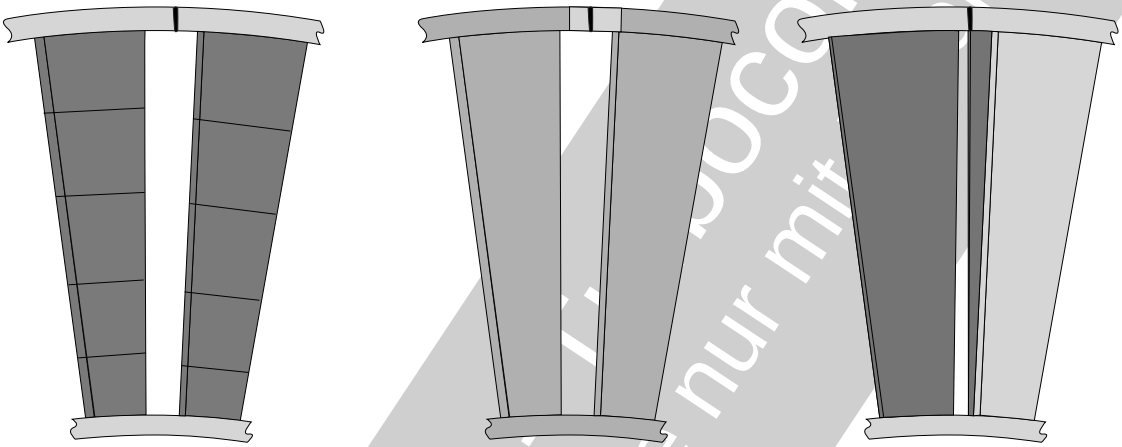
Lose Abdeckungen aus Blech oder anderen geeigneten Materialien *(Skizze oben rechts): Dieser Schutz kann für alle abgedeckten Flächen als sicher angesehen werden. Voraussetzung ist, dass keine Spalte vorhanden sind durch die Spritzer treten können. In geeigneten Fällen darf es sich um eine preiswerte Alternative handeln. Ein solcher Schutz ist gegebenenfalls wiederverwendbar. Problematisch ist die Anbringung vorgeformter Bleche an komplex gestalteten Bauteilen. So dürfte auch die Gefahr einer Beschädigung des Bauteils beim Anbringen und Entfernen der Abdeckung bestehen. Weiter ist darauf zu achten, dass kein Abrieb, der in späteren Prozessschritten schädigend wirken kann (z.B. Eisen auf Titan, Band 3, Bild 12.2.1.3-19 und Bild 12.2.1.7-9) auf dem Bauteil verbleibt.*

Ungünstige ***Bauteilgeometrien*** *können den sicheren Schutz später im Betrieb dynamisch hoch beanspruchter Oberflächen vor einem Kontakt mit Metallspritzern erfahrungsgemäß nur schwer gewährleisten. Als Beispiel kann ein verschweißter* ***Verdichterrotor*** *dienen. Die Skizze unten rechts zeigt den Fall einer Reibschweißung. Hier dürfte eine Abdeckung und eine sichere zerstörungsfreie Prüfung auf Schädigungen an der behinderten Zugänglichkeit scheitern.*
Bei der Elektronenstrahlschweißung in der Skizze unten rechts verhindert ein Ringsteg im Wurzelbereich Spritzer in der Rotortrommel. Voraussetzung ist, dass der Elektronenstrahl diesen nicht bei abweichenden Schweißparametern durchdringt.

© AVL Powertrain - Turbocharging
Lizenz nur mit Lizenzvertrag

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

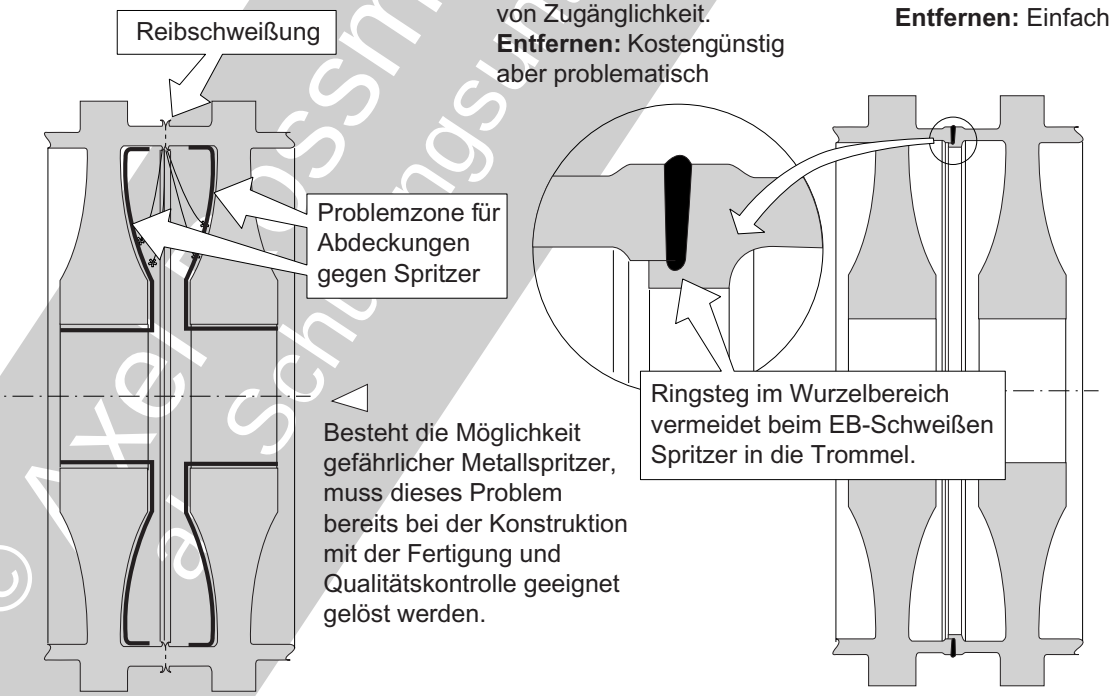
Präventive Maßnahmen zur Vermeidung eines Kontakts mit gefährlichen Spritzern beim Schweißen.



Abdecken mit metallischen (Al-) Klebefolien :
Wirkung: sicher
Aufbringen: Zeit- und kostenintensiv.
Entfernen: Zeit- und kostenintensiv.

Temperaturbeständige und gut entfernbare Beschichtung/Lackierung:
Wirkung: abhängig von Beschichtungsqualität.
Aufbringen: kostengünstig. Problematisch, abhängig von Zugänglichkeit.
Entfernen: Kostengünstig aber problematisch

Lose Abdeckungen:
Wirkung: sicher, Gefahr mechanischer Beschädigung des Bauteils.
Aufbringen: Abhängig von Geometrie.
Entfernen: Einfach



Besteht die Möglichkeit gefährlicher Metallspritzer, muss dieses Problem bereits bei der Konstruktion mit der Fertigung und Qualitätskontrolle geeignet gelöst werden.

Bild 18.6-12

© Axel Rossmann - Fachbuchverlag
als Schulungsunterlage nur mit

Welche Merkmale deuten auf eine örtliche Überhitzung hin?

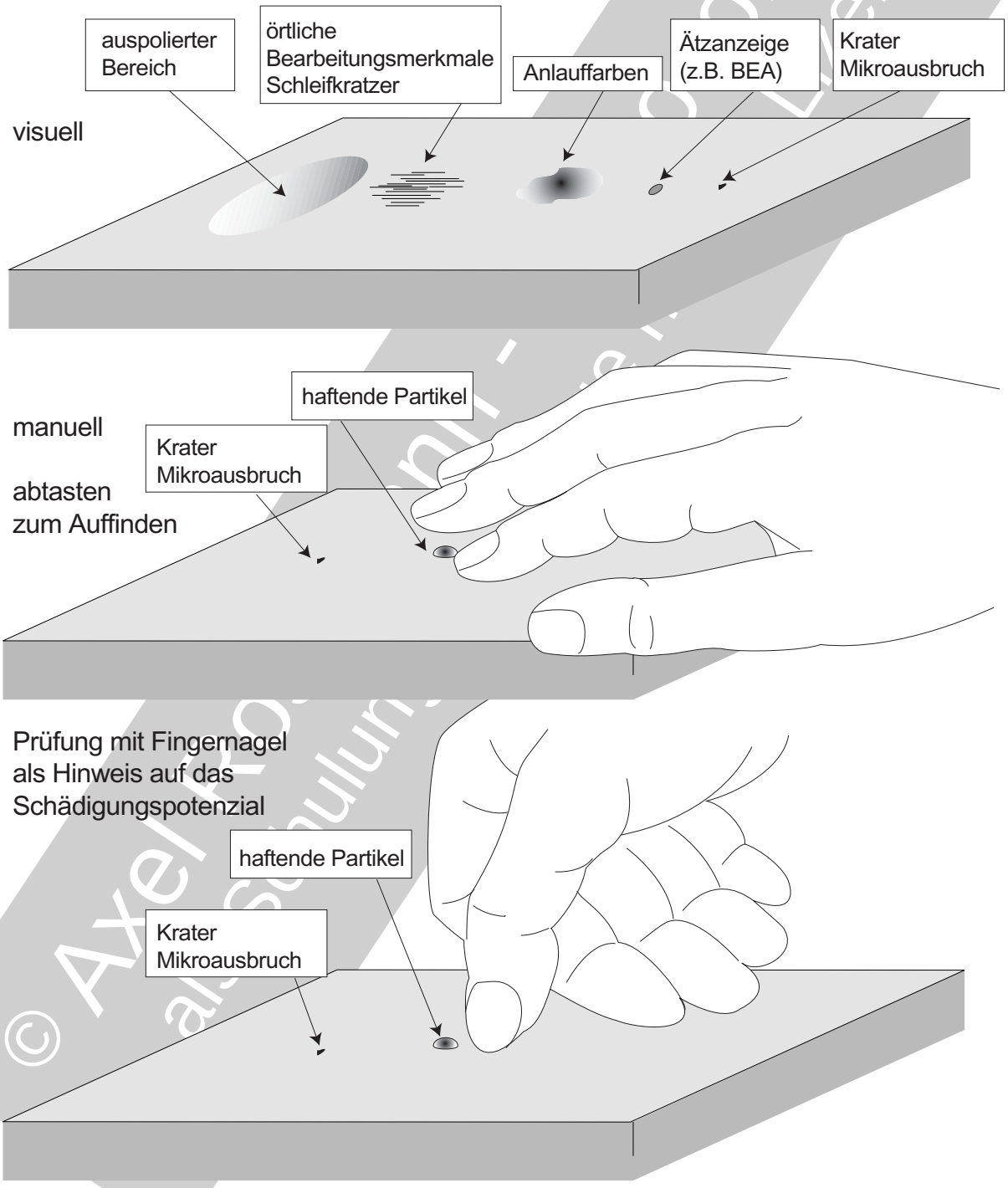


Bild 18.6-13

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Bild 18.6-13: *Es gibt einige Hinweise die bei* ***visueller und abtastender Inspektion*** *dem Praktiker die Möglichkeit einer örtlichen Überhitzung anzeigen können.*

Visuell : *Mit dem bloßen Auge kann der erfahrene Prüfer an einer Bauteiloberfläche schnell erstaunlich schwache Anzeichen einer Überhitzung oder verdächtiger Nacharbeiten erkennen (Skizze oben). Hierzu kann es erforderlich werden, die in Helligkeit, Farbe und Richtung ausreichend beleuchtete Oberfläche in verschiedenen Winkeln zum Licht und zur Beobachtungsrichtung zu positionieren und/oder zu bewegen.*
Natürlich sind ungewöhnliche Anlauffarben ein Indiz einer unzulässigen örtlichen Überhitzung. Sie sind jedoch leicht unkontrolliert zu entfernen. Potenzielle Schädigungen bleiben so unentdeckt. Deshalb ist auf solche Nacharbeiten zu achten. Bereits kleine, örtliche, sanfte Unebenheiten mit gegenüber der umgebenden Fläche (z.B. Drehfläche) veränderten Struktur können als Hinweis einer nicht dokomentierten Nacharbeit dienen. So zeigen sich nachträgliches Polieren und Schleifen gegebenenfalls auch mit Spuren die nicht in Richtung der ursprünglichen Bearbeitung verlaufen. Das kann eine Nachprüfung auf einen verborgenen unzulässigen Überhitzungseinfluss notwendig machen.
Örtliche Verfärbungen nach einer Ätzung oder Wärmebehandlung können ebenfalls Hinweise auf überhitzungsbedingte Werkstoffveränderungen sein.
Als dunkle Punkte lassen sich kleine Werkstoffausbrüche auf einer Bauteiloberfläche identifizieren. Wie gut das gelingt hängt von der Oberflächenstruktur ab, die am besten möglichst glatt ist (z.B. poliert). Mit dem Auge lassen sich besonders unter schrägem Blickwinkel Ausbrüche erkennen. Weil solche Ausbrüche auf ehemals fest angehaftete Schmelzperlen hinweisen, ist gegebenenfalls eine eingehende Prüfung auf verbliebene ausgedehnte Schädigungen, wie eine Überhitzung, notwendig.

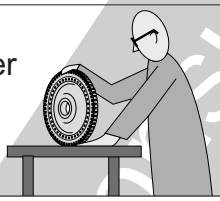
Manuell: *Das* ***Berühren von Titanteilen mit bloßen Händen ist problematisch*** *wenn eine nachfolgende Erwärmung über 450°C nicht auszuschließen ist (Bild 18.3-16). Im Zweifelsfall sind Baumwollhandschuhe zu verwenden, die ein ausreichendes Gefühl vermitteln können. Die Erfahrung zeigt, dass bei geometrisch komplexen und/oder schlecht einsehbaren Flächen wie in Trommelläufern oder integralen Leitapparaten das* ***Abtasten mit den Fingerspitzen*** *eine schnelle, sensible und deshalb relativ sichere Möglichkeit ist. Das gilt besonders für erhabene Anzeichen einer Überhitzung (mittlere Skizze). In erster Linie handelt es sich um* ***anhaftende oder aufliegende Partikel*** *(Bild 18.6-4 und Bild 18.6-6). Auch „verdächtige“ Partikel, die sich als loser Staub auf der Bauteiloberfläche befinden, sollten gegebenenfalls unter dem Binokular auf Charakteristiken von Bearbeitungsspänen und Schmelztropfen überprüft werden. Diese Prüfung lässt sich bei Zugänglichkeit in nicht vollständig geöffneten Verpackungen durchführen. Natürlich muss einem solchen Hinweis gegebenenfalls mit weiteren Prüfungen, wie einer ausreichenden visuellen Inspektion, nachgegangen werden. Weil andere Überhitzungshinweise wie Verfärbungen verständlicherweise mit Tasten nicht gefunden werden, wird die Zuverlässigkeit des Abtastens relativiert.*

Prüfung mit dem Fingernagel *(Skizze unten): Diese gezielte Prüfung ist erst nach dem Abtasten mit den Fingerspitzen und/oder einem visuellen Befund sinnvoll. Die Haftfestigkeit eines Partikels gibt einen Anhaltspunkt für das Schädigungsausmaß (Bild 18.6-4). Die Haftung metallischer Partikel an einer metallischen Bauteiloberfläche beruht wahrscheinlich auf einer Verklammerung mit den Rauigkeitsspitzen (Formschluss) und/oder auf einer Verschweißung (Materialschluss). Je mehr das Partikel an der Oberfläche haftet, umso wahrscheinlicher ist eine Schädigung und deren negative Auswirkung auf die Bauteileigenschaften.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Typisches systematisches Vorgehen bei einer sicherheitsrelevanten Nacharbeit im Bereich einer örtlichen Überhitzung.

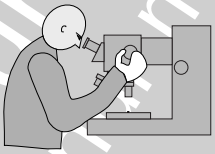


1 **Erkennen** einer Veränderung und Hinzuziehung der zuständigen Fachleute.

In dieser Phase nicht zulässig: "eigenmächtige" Veränderungen wie
- Entfernen von Anlauffarben
- Entfernen anhaftender Partikel
- Auspolieren betroffener Bereiche

!

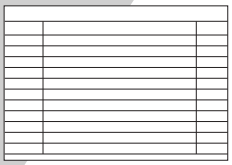
2 **Zerstörungsfreie bzw- beschädigungsfreie** Feststellung von Überhitzungsart und Ursache*:
- makroskopischer Befund, Makroätzung
- mikroskopischer Befund, Abdrücke
- Wirbelstrom
- Eigenspannungsmessung (röntgenografisch)



3 **Abschätzung des Schädigungsausmaßes:** möglichen "Tiefenwirkung" aus Größe und Art*.

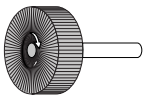
4 **Konzipierung und Festlegung der Nacharbeit*** möglichst in Zwischenschritten unter Berücksichtigung von
- Spezifikationen, Auslegung,
- zu erwartende Betriebseinflüsse
- Zustimmung der Zulassungsbehörden und gegebenenfalls des Lizenzgebers.

Vorschrift für die Nacharbeit

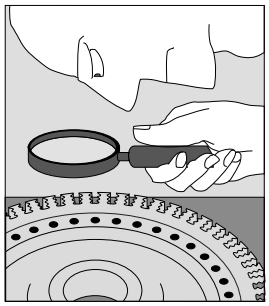


5 Schrittweise **Durchführung der Nacharbeit** mit Bewertung von Zwischenergebnissen*.

Falls entscheidungsrelevante Erkenntnisse gegebenenfalls iteratives Vorgehen



6 **Überprüfung und Dokumentation des Ergebnisses** der Nacharbeit durch zulässige*, d.h. nicht schädigende Schritte wie:
- lichtoptischer Befund
- Makroätzung
- Härtemessung
- Metallografie: Am Teil, Abdrücke
- REM: Abdrücke, falls möglich am Teil.
- Eigenspannungsmessung
- Wirbelstromprüfung



7 **Dokumentierte Freigabe des Bauteils** durch zuständige Fachabteilungen Behörden und Konstruktionsverantwortliche wie Lizenzgeber*.

Dokumentation und Freigabe

Bild 18.6-14

* In alle Entscheidungen sind die zuständigen Fachabteilungen einzubinden.

© Axel Nissmann - Turbo Consult
Nur Schulungsunterlage ohne Lizenz

Fertigung: Metallspritzer, Funken, Lichtbogen

Bild 18.6-14: *Die* ***Entscheidung über Verwendbarkeit*** *eines* ***örtlich überhitzten Bauteils*** *mit oder ohne Nacharbeit erfordert eine* ***systematische Vorgehensweise****.*

„1“ Erkennen einer Überhitzung: *Dazu wird in Bild 18.6-11 und Bild 18.6-13 Hilfestellung gegeben. Erschwerend kann sich eine „****unautorisierte****“* ***Nacharbeit*** *auswirken. Meist erfolgt diese bei dem Versuch, eine mögliche Schädigung zu erkennen oder zur Restaurierung des Oberflächenbildes. Dabei wird davon ausgegangen, dass keine Schädigung auftrat. Das kann jedoch ein Trugschluss sein. Generell sollte deshalb als Grundsatz gelten:* ***Keinerlei Veränderung der Oberfläche vor einer Entscheidung der zuständigen Fachleute über das weitere Vorgehen****. Entsprechend ist das Personal zu unterweisen. Darüber hinaus sollte eine „****Schulung****“* ***zur Sensibilisierung*** *gegenüber Überhitzungsschäden erfolgen. Einerseits sollten die Ursachen für die Überhitzung bekannt sein. Andererseits müssen Merkmale typischer Überhitzungen geläufig sein. Im Verdachtsfall muss die „Meldekette“ an die entscheidungsbefugten Fachleute vorgeschrieben und bekannt sein.*

„2“ Zerstörungsfreie Prüfung: *Besteht der Verdacht einer örtlichen Überhitzung an einem ausreichend kosten- und/oder terminintensiven Bauteil, muss dieses von zuständigen Fachleuten zerstörungsfrei überprüft werden. So wird die Chance einer Weiterverwendung oder Nacharbeit gewahrt. Dafür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, die je nach Fall einzeln oder in Kombination angewendet werden können. So wird sich eine Aussage zu Art, Größe und Schädigungseffekt absichern lassen.*

„3“ Schädigungsausmass: *Die* ***Tiefe der Schädigung*** *ist zur Abschätzung des Risikos einer Verwendung oder Nacharbeit zu ermitteln. Dafür gibt es durchaus auch zerstörungsfreie Methoden. Eine Ätzung gibt Hinweise auf den Durchmesser und eine mögliche Gefügeveränderung, (Bild 18.6-2). Daraus kann der Fachmann auf die wahrscheinliche Tiefe schließen. Eine Wirbelstromprüfung kann bei ausreichender Erfahrung ebenfalls Hinweise auf die Schädigungstiefe zulassen. Die Tiefe einer Schädigung lässt sich auch iterativ während einer Nacharbeit ermitteln. Eine typische Vorgehensweise ist das schrittweise Abarbeiten bzw. Abpolieren. Die Fläche wird dann jeweils geätzt und mit Hilfe eines Abdruckes (Band 1, Bild 2.2.2.4-4) metallografisch untersucht. Sind mehrere Teile betroffen, kann es sinnvoll sein, ein typisches, aussagekräftiges Teil für eine Untersuchung zu zerstören.*

„4“ Festlegung der Nacharbeit: *Diese erfolgt unter den Rahmenbedingungen spezifizierter (zeichnungsgerechter) Bauteileigenschaften und den vorangegangenen Untersuchungsergebnissen (Punkt „1“, „2“, „3“). Sie definiert die Grenzen der Nacharbeit und die Prüfung des angestrebten Endergebnisses. Wird dies nicht erreicht, ist das Teil „Ausschuss“. Natürlich müssen der dokumentierten und nachvollziehbaren Nacharbeit die zuständigen Bereiche und Fachleute zustimmen. Vorzugsweise jene, die bereits bei der Ausarbeitung der Anweisungen hinzugezogen wurden. Dabei ist gegebenenfalls auch die Zustimmung von Behörden und Kunden in der geeigneten Form einzuholen.*

„5“ Durchführung der Nacharbeit: *Die Nacharbeit hat von eingewiesenem fachkundigen Personal entsprechend der vorliegenden Festlegung (z.B. Arbeitsplan) zu erfolgen.*

„6“ Erfolgsnachweis der Nacharbeit: *Hierfür ist gewöhnlich eine Nachuntersuchung (z.B. metallografischer Abdruck) erforderlich. Sie bestätigt und dokumentiert das Endergebnis. Falls die Nacharbeit iterativ erfolgt, ist für die einzelnen Schritte entsprechend vorzugehen.*

„7“ Dokumentierte Freigabe: *Das in „6“ ermittelte Endergebnis ist vorschriftskonform den zuständigen Verantwortlichen zur Kenntnis zu bringen.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 18.6

18.6-1 S.Radhakrishnan, A.C.Raghuram, R.V.Krishnan, V. Ramachandran, „Fatigue Failure of Titanium Alloy Compressor Blades“, ASM „Handbook of Case Histories in Failure Analysis, Volume 2“, Kapitel „Rotating Equipment Fauilures“, Seite 299 und 300.

18.6-2 F.Rotvel, „The Non-Destructive Measurement of Residual Stresses“, AGARD-AG-201-Vol.II, AGARDograph No. 201 on „Non-Destructive Inspection Practices“, Seite 481.

18.6-3 Guy Bellows, „Surface Integrity of Electrochemical Machining“, ASME-Paper 70 GT 117 der „Gas Turbine Conference & Products Show“, Brussels, Belgium, May 24-28, 1970, Seite 1-16.

18.6-4 Australian Transport Safety Bureau, „In-flight uncontained engine failure and air turn-back, Boeing 767-219ER.ZK-NBC“,Air Safety Investigation Report 200205780, 8. December 2002, ISBN 1877071 83 8, Seite 40.

18.6-5 NTSB Report Identification: LAX911A376, Microfiche number 46630, August 29, 1991.

18.6-6 Airworthiness Directive for „General Electric Company CF34-3A1 and 3B1 Series Turbofan engines“, Docket No. FAA-2004-18648, Seite 1 und 2.

18.6-7 Airworthiness Directive des Commonwealth of Australia, Civil Aviation Safety Authority, für „General Electric Turbine Engines- CF34 Series“ 8/2001DM.

18.6-8 Airworthiness Directive der FAA, 14 CFR Part 39, Docket No. 81-ANE-03 , Amendment 39-9327, AD 95-16-07 und Docket 97-ANE-45-AD.

18.6-9 L.Engel, H.Klingele, „Rasterelektronische Untersuchungen von Metallschäden“, Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-13416-6, 1982, Seite 239.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.7 Rissbildung im Fertigungsprozess

In diesem Kapitel soll **Rissbildung an Bauteilen,** die auf den Fertigungsprozess ursächlich zurückzuführen ist, behandelt werden. Wann spricht man von einem Riss? Ist es bereits die Anzeige eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens wie der Eindringprüfung? Ist jede längliche Materialtrennung als Riss zu bezeichnen? Wie lässt sich in diesem Zusammenhang „länglich“ definieren? Sind weitere Merkmale notwendig um von einem Riss zu sprechen ?

Obwohl ein Riss als Materialtrennung verstanden werden kann, die sich auf ein Zerreißen des Werkstoffs zurückführen lässt, ist diese enge Definition erfahrungsgemäß praxisfremd. Es ist kaum zu vermeiden, dass auch Fehler wie Kaltschweißen, Bindefehler und (auflösender) Korrosionsangriff unter dem Begriff des Risses geführt werden, sobald es sich um längliche Trennungen, d.h. eine **Rissanzeige** handelt. In diesem Kapitel wird also unter einem Riss eine längliche Trennung, unabhängig von der Entstehung, verstanden (Bild 18.7-1.1).

Rissbildung stellt in vielen Fertigungsprozessen eine potenzielle Gefahr dar. Die Entstehung eines Risses erfordert nicht selten das Zusammenwirken mehrer Fertigungsfolgen. Die Auslösung kann von sehr unterschiedlichen Schadensmechanismen erfolgen. Deshalb wird Rissbildung in entsprechenden Kapiteln dieses Buchs eingehend behandelt, auf die in den Bildern dieses Kapitels hingewiesen wird. Zentrales Thema dieses Kapitels sind allgemeingültige Überlegungen und Effekte zur Rissbildung die **Rückschlüsse auf ursächliche Einflüsse** ermöglichen.

Es gibt zwei Haupteinflüsse der Fertigungsprozesse auf die Rissbildung die auch kombiniert wirken können. Festigkeitsabfall des Werkstoffs und Aufbau gefährlicher Zugspannungen (z.B. Wärmespannungen) bzw. Zugeigenspannungen.

Werden in der Fertigung Risse gefunden, ist die **Voraussetzung für eine gezielte und ausreichend erfolgversprechende Abhilfe die Feststellung des Schadensmechanismus** (Bild 15-11 und Bild 18.7-3). Damit sind auch die schadensursächlichen bzw. -begünstigenden Einflüsse be-

© Axel Rossmann Schoconsult als Schulungsunterlage Lizenz

kannt. So lassen sich rissauslösende Fertigungsschritte identifizieren und Risiken abschätzen. Typische, dem Gefüge zuordenbare Rissmerkmale (Bild 18.7-3), das Rissbild an der Bauteiloberfläche (Bild 18.7-4) und gegebenenfalls die Auswertung aufgebrochener Rissflächen (Bild 18.7-5) lassen wichtige Rückschlüsse zu.

Wie gefährlich Risse für die **Bauteilsicherheit** sind, zeigen Statistiken über Flugunfälle. Geschädigte oder angerissenen Bauteile, die auf Zerspanung zurückzuführen sind (Bild 18.7-6), spielen offenbar eine wichtige Rolle. Die Rissbildung und der Einfluss auf das Bauteilverhalten wird am Beispiel von Schleifrissen (Bild 18.7-6) behandelt. Darüber hinaus werden Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprödung als typische Schadensformen betrachtet, die mehrere Einflüsse wie Zugspannungen, Kerben und auslösende Medien benötigen (Bild 18.7-7, Bild 18.7-8 und Bild 18.7-9).

Besondere Aufmerksamkeit ist der Vermeidung fertigungsbedingter Rissbildung zu widmen. Dazu motivieren Kosten-, Prestige- und nicht zuletzt die Sicherheitsrelevanz. Sind Risse aufgetreten, muss eine sichere und gezielte Vorgehensweise mit wirkungsvollen Abhilfen gewährleistet sein (Bild 18.7-11)

© Axel Kossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Bild 12.2.2.7-1.1: *Auf den ersten Blick erscheint eine Antwort auf die Frage „**was ist ein Riss**“ einfach. In der Praxis ist jedoch die Antwort nicht eindeutig. Gewöhnlich wird als Riss jede längliche Fehlstelle bezeichnet. Dies ist insbesondere bei Befunden der Eindringprüfung üblich. Solche „**Rissanzeigen**“ können sehr unterschiedliche Fehlstellen wie Brüche als Materialüberlastung oder angeschnittene Poren und Lunker, die ohne ein Zerreißen entstanden sind, anzeigen.*

Bruch *als Rissbildung durch Zerreißen (Skizze oben links) ist auf eine Überlastung zurückzuführen. Unter statischer Last entsteht gewöhnlich der **Gewaltriss** (auch Kriech- und SpRK-Risse, Warmrisse). Bei **Schwingrissen** handelt es sich um einen Ermüdungsvorgang mit zyklischem Risswachstum. In allen Fällen weisen die Rissufer **Bruchmerkmale** auf.*

Bindefehler, Falten, Überlappungen *(Skizze oben Mitte) sind nicht Folge eines Zerreißvorgangs. Hierzu gehören Kaltschweißen (11.2-2.1) und Oxidhäute (Bild 11.2-10) an Gussteilen, Bindefehler an Fügungen (Löten, Schweißen, Band 3, Bild 12.2.1.3.1-8, Kapitel 12.2.1.3.3 und Kapitel 12.2.1.3.5) und Beschichtungen, Schmiedefalten und Dopplungen (Band 3, Bild 11.2.2.1-14) sowie Überstrahlungsfehler (Band 3, Bild 12.2.1.6-15).*

Chemische Auflösung (*Skizze oben rechts): Diese rissartigen Fehlstellen bilden sich durch örtlich verstärkte Auflösung, meist im Bereich von Korngrenzen (Band 3, Bild 12.2.1.7-5 und Bild 12.2.1.7-10). Man spricht in diesem Fall von interkristalliner Korrosion (IK). Solche Fehlstellen bilden meist Netzwerke und entstehen sowohl bei Korrosion als auch bei einer Ätzbehandlung.*

*Eine weitere Frage stellt sich für den Praktiker erfahrungsgemäß bei kleinen Rissen. Ab wann spricht man von einem technisch relevanten Riss? Eine Antwort lautet: Es handelt sich um eine **Rissgröße bzw. entsprechende Fehlergröße, die mit seriengeeigneten***

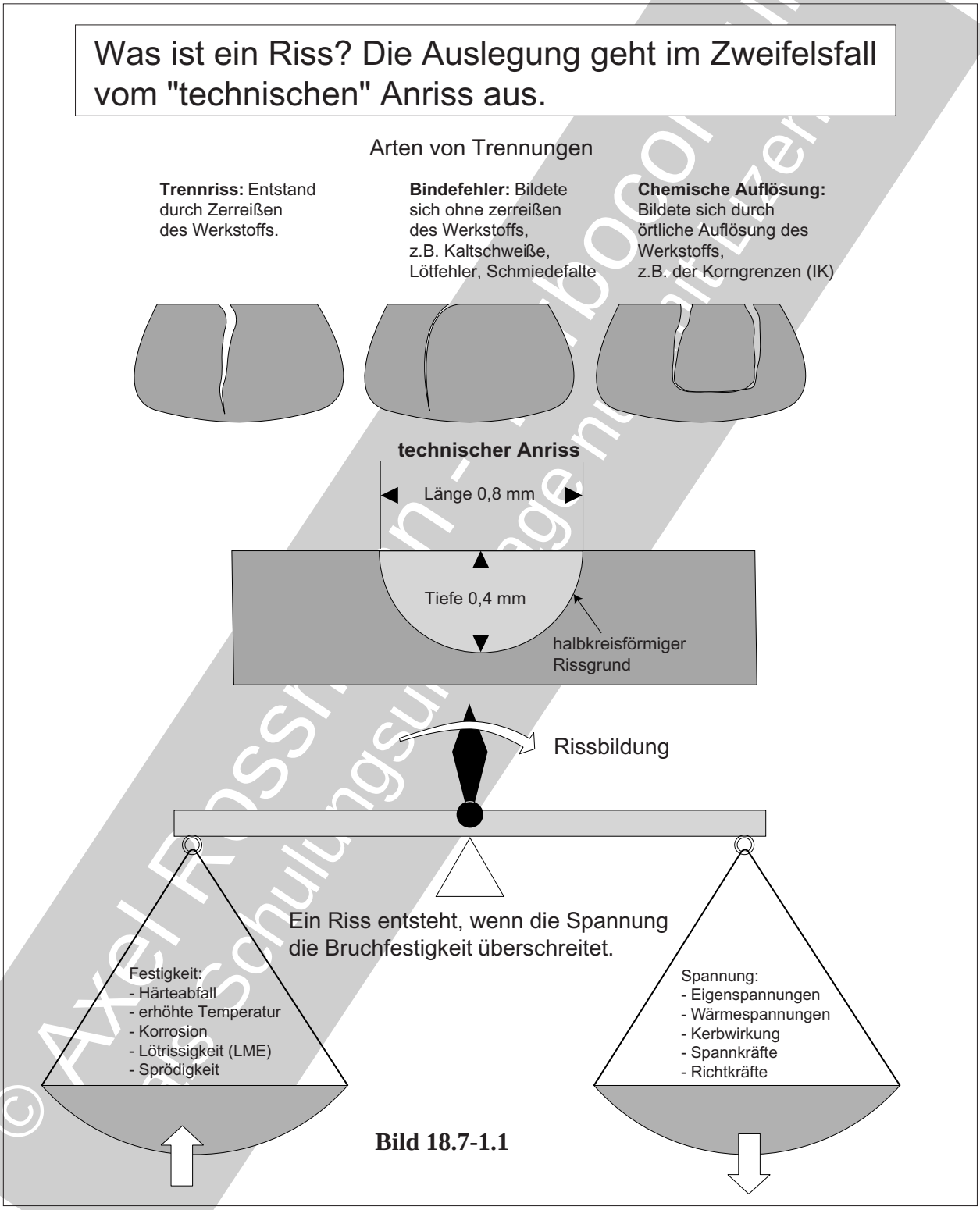


Bild 18.7-1.1

zerstörungsfreien Prüfverfahren ausreichend sicher gefunden wird*. Eine solche Begriffsbestimmung ist besonders für die Auslegung hochbelasteter Bauteile von entscheidender Bedeutung. Dafür wurde der sog. „****technische Anriss****“ definiert (Skizze Mitte). Es handelt sich um eine flächige Fehlstelle mit halbkreisförmiger Begrenzung und an der Oberfläche mit einer Länge von 0,8 mm bei einer Tiefe von 0,4 mm (mittlere Skizze).*

Ein Riss entsteht, wenn die mechanischen Spannungen die Bruchfestigkeit überschreiten. Obwohl dies trivial erscheint, kann ein solcher Zustand durchaus nicht offensichtlich auf vielfältige Weise im Fertigungsprozess auftreten (Skizze unten).

***Abfall der Festigkeit** erfolgt bei vielen Prozessen mit einem Temperaturanstieg. Typisches Beispiel ist das Schleifen bei zu wenig Kühlung und/oder zu aggressiven Parametern. An Stählen zeigt ein deutlicher Härteabfall (Anlasseffekt) den Festigkeitsabfall an. Liegen Bedingungen für **Spannungsrisskorrosion** (Band 3, Bild 12.2.1.7-8) vor, wird die Festigkeit erheblich abgesenkt. Ein ähnlicher Effekt liegt bei der Einwirkung von Metallschmelzen vor, man spricht von Lötrissigkeit (engl. LME, siehe Kapitel 18.3). Je spröder ein Werkstoff ist, umso mehr machen sich kleine Fehlstellen rissbildend bemerkbar. In diesem Zusammenhang ist **Wasserstoffversprödung** zu nennen (Band 3, Bild 12.2.1.7-14).*

***Anstieg der Spannung:** Auch die örtliche Belastung wird von Fertigungsprozessen stark beeinflusst. **Wärmespannungen** treten in vielen Fällen während des Prozessablaufs auf. Typisch sind Schweißen, Glühbehandlungen, Zerspanungsprozesse wie Bohren und Schleifen sowie thermische Spritzverfahren. Verbleibende **Eigenspannungen** (Bild 18.4-5.0) sind nach Verfahren wie galvanischen Beschichtungen, Schweißen, Wärmebehandlung, thermischen Spritzverfahren und spanenden Bearbeitungsverfahren zu erwarten. Die **Kerbwirkung** von Querschnittssprüngen und Fehlstellen, besonders bei spröden Grundwerkstoffen und Beschichtungen (Bild 18.7-1.2), kann die örtliche Belastung gefährlich erhöhen. Treten in der Fertigung **Spannkräfte** auf, sind besonders dünnwandige Bauteile mit spröden Schichten rissgefährdet (Bild 18.5-11 und Bild 18.7-1.2). Auch bei **Richtvorgängen,** die Belastungen im plastischen Bereich, d.h. oberhalb der Fließgrenze erfordern, besteht Rissgefahr (Bild 18.5-12 bis Bild 18.5-14).*

***Bild 18.7-1.2** (Lit 12.2.2.7-10): **Al-Diffusionsschichten** werden in großem Umfang mit Erfolg auf Heißteilen zum Oxidationsschutz verwendet. Ein besonderes Anwendungsgebiet sind die Blätter von Turbinenleit- (Skizze) und Laufschaufeln. Problematisch ist, dass sich diese **Schichten von Raumtemperatur bis ca. 400°C spröd** verhalten. Das lässt sich in den Diagrammen an der niedrigen Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur erkennen. In der Schicht ist der Al-Gehalt nicht gleichmäßig verteilt. Er folgt verfahrensbedingt einem bestimmten Verlauf (Detail). Dieser hängt auch vom Schichtaufbau ab (Band 3, Bild 12.2.1.8.1-2). **Die Sprödigkeit und damit die Empfindlichkeit für mechanische Beschädigungen** (Bild 14-5) **steigt deutlich mit dem Niveau des Al-Gehalts**. Leider erfordert ein hoher Oxidationswiderstand auch einen hohen Al-Gehalt. Dieser kann spezifikationsgemäß oder als Folge von Abweichungen im Beschichtungsprozess variieren. Damit werden die Bauteile unterschiedlich empfindlich. In einem solchen Fall ist nicht davon auszugehen, dass ein bewährtes Handling (z.B. Verpackung, Lagerung) sicher vor Beschädigungen schützt. Treten unerwartet Schichtrisse auf, empfiehlt es sich den Al-Gehalt der Beschichtung zu überprüfen.*

*Eine ebenfalls von den Prozessparametern abhängige **Schichtdicke** im üblichen Bereich beeinflusst dagegen die Sprödigkeit nur wenig (Diagramm unten). Kommt es jedoch zur Rissbildung, dürfte die mit der Schichtdicke wachsende Risstiefe eine schädigende Wirkung verstärken.*

© Axel Plessmann - Turnaround Consult
Assessmentunterlagen zum Lizenz

Fertigung: Rissbildung

Plastische Verformung einer spröden Diffusionsschicht erzeugt im Betrieb aber auch in der Fertigung Risse.

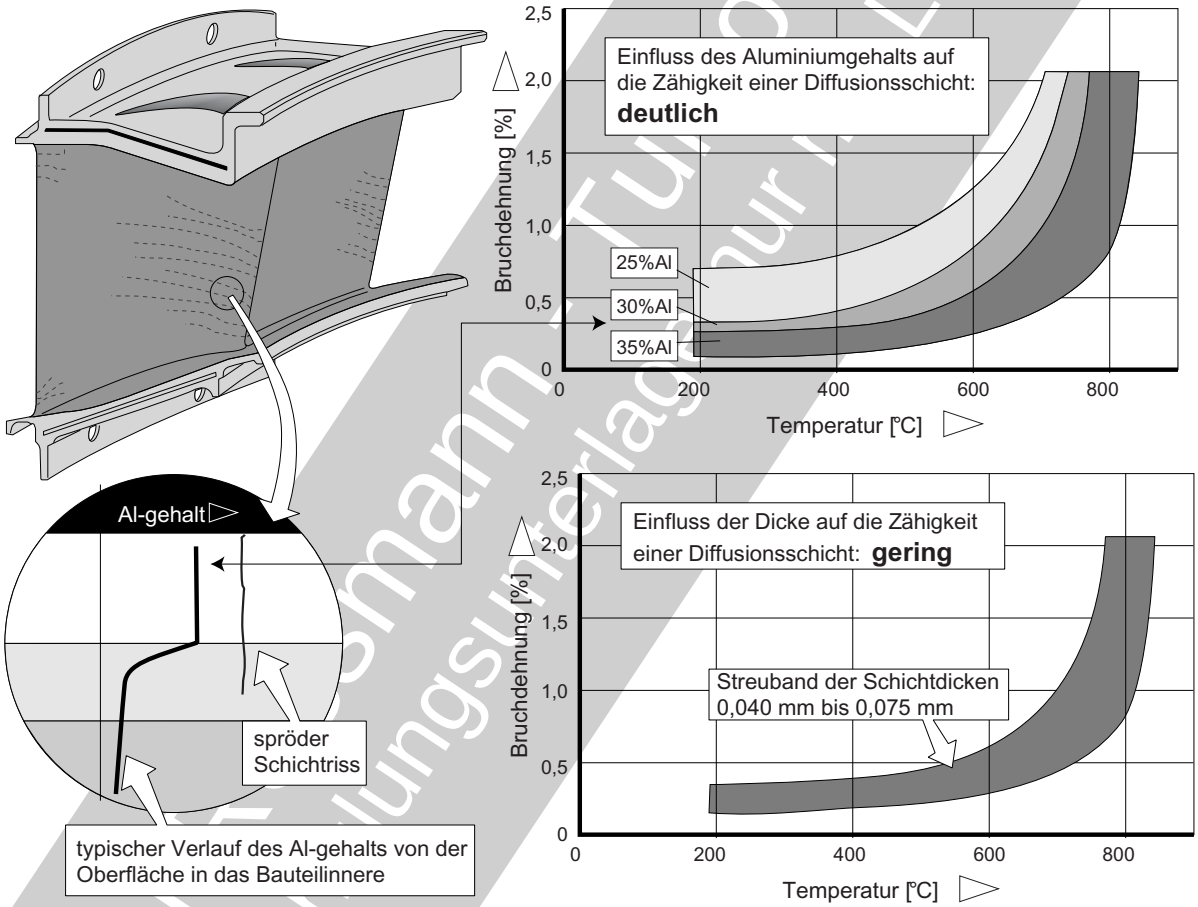


Bild 18.7-1.2

© Axel Kaufmann - Turboconsult als Schulungsunterlagen nur in Lizenz

Bild 18.7-2: *Die Entstehung von* ***Rissen in Beschichtungen*** *und ihre Auswirkung auf die* ***Schwingfestigkeit*** *des Bauteils, d.h. die Kerbwirkung auf den Grundwerkstoff, ist stark von den Schichteigenschaften abhängig. Dies ist leicht aus Extremfällen zu erkennen:*

Elastomere (z.B. Gummi) weisen einen sehr ***niedrigen Elastizitätsmodul,*** *d.h. eine hohe Nachgiebigkeit auf. Ein Riss in einem solchen Belag wirkt nicht nennenswert bruchmechanisch auf den Grundwerkstoff. Ein Schwingfestigkeitsabfall ist daher nicht zu erwarten. Das gilt auch für* ***poröse Spritzschichten*** *(Skizze rechts).*
Die ***Haftfestigkeit der Schicht*** *zum Grundmaterial wirkt sich besonders aus. Je höher sie ist, umso größere Kräfte können übertragen werden und im Grundmaterial Rissbildung bzw. Rissfortschritt einleiten.* ***Diffusionsschichten*** *weisen gewöhnlich eine hohe Haftfestigkeit bei großer Härte und geringer Zähigkeit auf. Dieses Verhalten zeigen* ***Al-Diffusionsschichten****, ein beliebter Oxidationsschutz für Ni-Legierungen. Auf Stählen sind typische Vertreter* ***Nitrier- und Einsatzschichten****. Sind diese vorhanden, heben sie die Schwingfestigkeit deutlich an. Tritt jedoch* ***Rissbildung*** *ein, kommt es wegen der großen Kerbwirkung spröder Ausbrüche und Risse zu einem* ***sehr deutlichen Schwingfestigkeitsabfall****. Dieser Effekt ist bei beschichteten Bauteilen wie Turbinenschaufeln von großer Bedeutung für das Handling und das Einspannen in der Fertigung (Bild 14-5).*
Mikrorissbildung tritt in keramischen Spritzschichten auf (Wärmedämmschichten*, Band 3, Bild 12.2.1.8.2-3.1) und ist dort als sog.* ***Segmentierungsrisse*** *erwünscht. Auch* ***Rissfelder*** *sind in* ***galvanisch aufgebrachten Cr-Schichten*** *(mittlere Skizze) typisch und in einer besonderen Ausprägung erwünscht. Die Risse mildern auf zweifache Weise den üblichen Schwingfestigkeitsabfall (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-3), wenn sie* ***Zugeigenspannungen abbauen*** *und/oder die Nachgiebigkeit der Schicht erhöhen.*

© Axel Rossmann - Triboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Rissbildung

Je härter eine Schicht und je fester sie haftet, umso größer ist bei Rissbildung ihr Schädigungspotenzial.

Die Absenkung der Schwingfestigkeit durch Risse in einer Schicht steigt mit folgenden Schichteigenschaften:

- Schichtsprödigkeit
- Schichtfestigkeit/Härte
- Schichtsteifigkeit (E-Modul)
- Haftfestigkeit
- Schichtdicke
- Zugeigenspannungen in der Schicht

Bild 18.7-2

*Ist eine Schicht **im Rissbereich abgelöst,** hat sie ebenfalls keinen Einfluss auf die Schwingfestigkeit.*
*Umgekehrt ist von einer **Schicht mit hohem E-Modul und hoher Festigkeit** bei Einzelrissen ein merklicher Schwingfestigkeitsabfall des Bauteils zu erwarten.*
*Je größer die **Schichtdicke,** umso größer ist die auf den Grundwerkstoff bruchmechanisch wirksame Risstiefe. Entsprechend lässt die Schicht die Schwingfestigkeit abfallen (Skizze links, Band 3, Bild 12.2.1.8.3-3).*

© Axel Rossmann - Verbocomult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Der **Rissverlauf im Gefüge** ist ein wichtiger Hinweis auf die Entstehungszeit, die Ursache und damit den Entstehungsort. Man muss ihn nur deuten können.

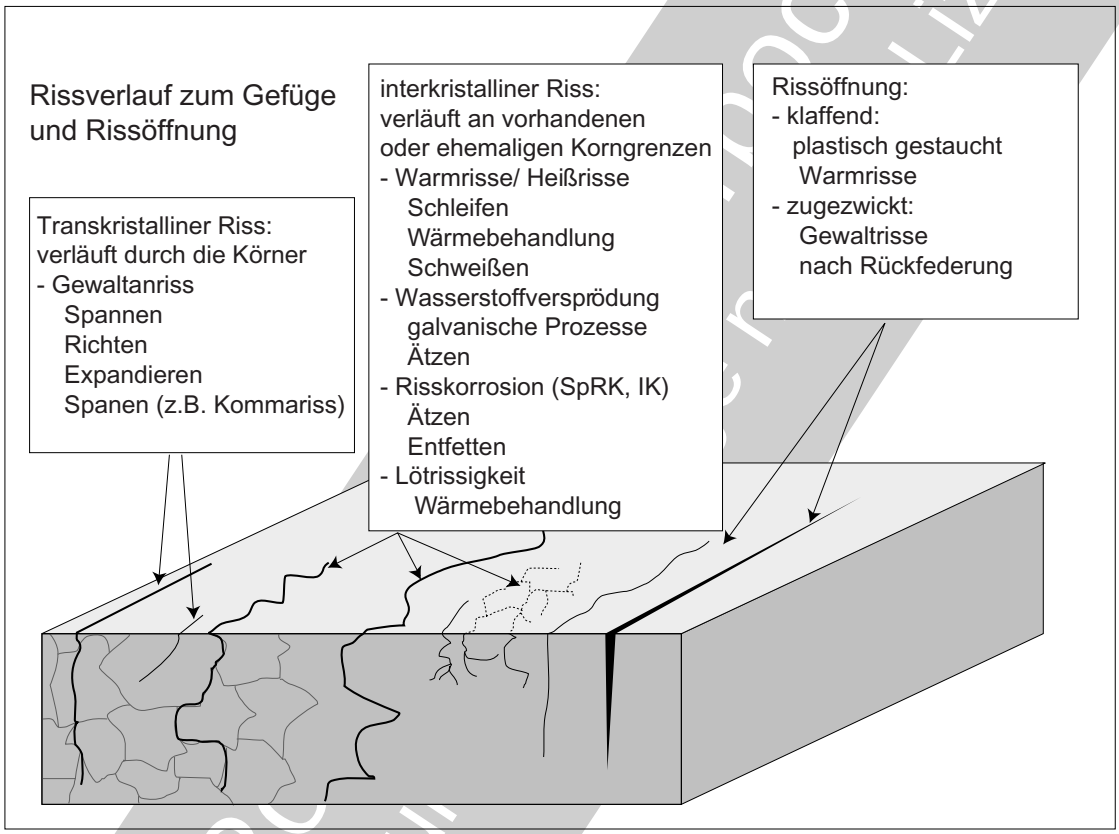


Bild 18.7-3

Bild 18.7-3: *Um Risse gezielt präventiv zu vermeiden und rückwirkend* ***Maßnahmen gegen weitere Rissbildung*** *vornehmen zu können, müssen die* ***ursächlichen Einflüsse bekannt*** *sein. So lassen sich auch* ***Entstehungsort*** *und die* ***Entstehungszeit*** *ausreichend eingrenzen. Sie ermöglichen den Rückschluss auf rissbildende Fertigungsprozesse, eventuell zeitweise Besonderheiten und die Risiken weiterer betroffener Teile.*

Ein wichtiges Merkmal ist der ***Verlauf des Risses im Gefüge****. Man unterscheidet Risse entlang der Korngrenzen, sog.* ***interkristalline Risse*** *von solchen die durch das Korn verlaufen, sog.* ***transkristalline Risse****. Natürlich kann sich der Rissverlauf unter verändernden Einflüssen ebenfalls ändern. Dazu gehören Spannungsniveau, Temperatur und Korrosion.* ***Transkristalline Risse*** *beobachtet man bei zähen Werkstoffen bevorzugt bei Kurzzeitüberlastung. Solche Situationen treten beim Einspannen, Richten, Expandieren und Zerspanen auf. Ein Beispiel sind sog. Kommarisse in Schmiede-Nickellegierungen (Band 3, Bild 12.2.1.1-2).*

Natürlich gibt es auch interkristalline Gewaltanrisse. Sie treten bevorzugt als Warm- oder Heißrisse (Band 3, Bild 11.1-8) bei Erweichungstemperaturen der Korngrenzen auf und sind für Verfahren wie Schweißen (Band 3, Bild

12.2.1.3.1-10), Schleifen und Wärmebehandlung typisch. Wirken Temperaturen bei Zugspannungen über längere Zeit, können sich Zeitstandrisse bilden. Diese verlaufen typischerweise entlang der weniger kriechfesten Korngrenzen (Band 1, Bild 5.3.2-7).
*Bei **Wasserstoffversprödung** als Folge einer Wasserstoffaufnahme in einem galvanischen Prozess, einer Diffusionsbehandlung (Einsatzhärtung) oder beim Ätzen werden Sprödrisse entlang den Korngrenzen ausgelöst (Band 1, Bild 5.7.1-2). Ein ähnliches Rissbild entsteht im Mikrobereich auch bei Spannungsrisskorrosion, bei der das Korrosionsmedium unter ausreichend hohen Zugspannungen einwirkt. Solche Bedingungen können in Ätzbädern vorliegen. Wenn **Halogene** (Chlor, Fluor, Bild 18.7-7) bei erhöhten Temperaturen auf **Titanlegierungen** einwirken, sind sie für diesen Schadenstyp besonders empfindlich.*
*Wenn benetzende **Metallschmelzen** auf eine Oberfläche unter Zugspannungen einwirken, können sie interkristalline Rissbildung, die sog. **Lötrissigkeit** (engl. LME) auslösen (Bild 18.3-10.1 und Bild 18.3-11). Typische Beispiele sind metallische Verunreinigungen (Bild 18.3-10.2 und Bild 18.3-11) wie auftropfende Lotreste bei Wärmebehandlungen (Bild 18.3-5).*
*Einen Sonderfall bildet rissartiger Korngrenzenangriff ohne Zugspannungen durch Korrosion oder Ätzangriff, man spricht von sog. **interkristalliner Korrosion** (**IK**, Band 3, Bild 12.2.1.2-7).*

*Auch die **Art der Rissöffnung kann wichtige Hinweise geben**: **Klaffen Risse** wie **Schweißrisse**, weist das auf einen plastischen Stauchvorgang vor der Entstehung hin. Die Folge sind hohe Zugspannungen und Rissbildung bei der Abkühlung. Umgekehrt können auch Risse „**zuzwicken**“ wenn Druckeigenspannungen aus einer Rückfederung oder aus Wärmedehnungen einwirken.*

***Bild 18.7-4:** Der **Rissverlauf gegenüber Bearbeitungsmerkmalen und Bauteilgeometrie** kann wichtige Aussagen zur Entstehung im Fertigungsprozess machen.*

***Rissorientierung:** Der Verlauf eines Risses zu Merkmalen des Bauteils wie **Bearbeitungsrichtung**, **Bauteilkontur**, **Gefügetextur** (z.B. Kornorientierung durch Schmieden, Erstarrungsrichtung) oder zu einer **Schweißnaht** ist ein Hinweis auf deren ursächlichen Einfluss. Auch ein Verlauf mit einer Orientierung zur Bearbeitungsrichtung (Zerspanungsrichtung) ist aussagefähig.*
***Schleifrisse, Rattermarken oder Kommarisse** eines Räum- oder Drehvorgangs verlaufen bevorzugt **quer zur Bearbeitungsrichtung** die aus den Bearbeitungsriefen erkennbar ist.*
*Eine **Längsorientierung zu Bearbeitungsriefen**, ist eher bei **Thermoermüdung** (Bild 18.5-7) zu erwarten. Orientiert sich der Riss an der Bauteilkontur sind Wärmespannungen verdächtig. Liegt **keine erkennbare Orientierung** vor, ist auch dies ein wichtiges Merkmal. Es schließt die erwähnten Möglichkeiten mit ausreichender Wahrscheinlichkeit aus. Als wahrscheinliche Ursache bleibt eine Überlastung. Eine solche **Gewalteinwirkung** weist auf Spannkräfte, Richtvorgänge oder Beschädigungen beim Handling hin.*

***Rissfelder: Parallel verlaufende Risse** sind Kennzeichen eines hohen Temperaturgradienten bzw. hoher Zugspannungen quer zu den Rissen. Typisches Beispiel sind **Schleifrisse** (Band 3, Bild 12.2.1.1.1-4).*
Rissnetzwerke**, d.h. ohne Orientierung, weisen eher auf auf einen flächigen Spannungszustand wie in **Cr-Schichten** hin. Eine weitere Möglichkeit sind **korrosionsbeeinflusste Korngrenzen.

***Risse im Bereich von Schweißnähten** sind immer ein Hinweis auf einen ursächlichen Einfluss der Schweißung. Natürlich können auch andere Einflüsse beteiligt gewesen sein. Riss-*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

orientierung und die Risslage zur Schweißung wird von Eigenspannungen, Formkerben (Einbrandkerben, Nahtüberhöhung, Band 3, Bild 12.2.1.3.1-2) Gefügemerkmalen, Zähigkeit (z.B. Versprödung) und Festigkeit in und um die Schweißnaht (Band 3, Bild 12.2.1.3.1-12) beeinflusst.

Risse im Bereich von Oberflächenveränderungen wie Verfärbungen und Rauigkeit: *Stehen Verfärbungen der Bauteiloberfläche in einer erkennbaren Anordnung bzw. Verteilung zu einer Rissbildung, ist dies ein wichtiger Hinweis auf die Rissursache (Bild 18.6-13).*
Verfärbungen können mehrere, auch kombinierte Ursachen haben und damit auf unterschiedliche Einflüsse hinweisen. Sie entstehen häufig als Anlauffarben bei erhöhten Temperaturen eines Zerspanungsprozesses. Treten ***Anlauffarben während einer Wärmebehandlung oder einem Schweißverfahren*** *(Band 3, Bild 12.2.1.3.1-18) unter Schutzgas oder im Vakuum auf, ist dies ein indirekter Hinweis auf mögliche Werkstoffveränderungen. Besonders* ***Titanlegierungen neigen nach Sauerstoffaufnahme zur Versprödung und Rissbildung****.* ***Titanlegierungen*** *sind auch sensibel für* ***Verunreinigungen*** *wie Bad- oder Hilfsstoffrückstände (z.B. Kühlschmiermittel, Band 3, Kapitel 12.2.1.1.1). So kann es zur Entstehung von* ***Anlauffarben ohne merkliche Temperatureinwirkung*** *kommen. Tritt in solchen Bereichen Rissbildung auf, ist bei halogenhaltigen Rückständen, meist Chlor, Spannungsrisskorrosion naheliegend (Band 3, Bild 12.2.1.7-8).*
Auch unbeabsichtigte spröde Beschichtungen können Ursache von Verfärbungen mit Rissbildung sein. Dazu zählen ***„Kriechbeschichtungen“*** *unter Abdeckungen bei Al-Diffusionsschichten an Füßen von Turbinenschaufeln (Band 3, Bild 12.2.1.8.1-3).*
Rauigkeitsänderungen*, z.B. als Folge einer unerwünschten Anätzung, können sich als flächige Veränderung abgrenzen. Rissanzeigen in solchen Zonen legen einen Korrosionangriff nahe (z.B. durch ein Ätzbad, Band 3, Bild 12.2.1.7-10). Wurden undokumentierte, örtliche Nacharbeiten durchgeführt, können sich diese mit einer* ***Veränderung typischer Bearbeitungsflächen*** *(z.B. Schleifen, Drehen) verraten. Risse in diesem Bereich lassen vermuten, dass sie bereits vor der Nacharbeit vorhanden waren oder ein damit im Zusammenhang stehendes Problem vorlag. Werkstoffveränderungen (Band 3, Bild 12.2.1.3-8) wie im Bereich von Reparaturschweißungen mit Rissbildung können das Oberflächenbild verändern. Ein solcher Effekt ist beim Strahlen (Band 3, Bild 12.2.1.6-10), Vakuumglühen oder Ätzen möglich. Dieser Effekt wird besonders bei komplexen Gussteilen beobachtet.*
Sind Risse verformt, zugedrückt oder verschmiert, lässt dies in einigen Fällen den Zeitraum der Rissentstehung eingrenzen. Entsprechendes gilt für Risse die von Strahlguteinschlägen zugedrückt wurden und/oder in denen Strahlgut steckt (Detail).

Risse im Bereich von Beschichtungen: *In diesem Fall empfiehlt es sich auf Grund unterschiedlicher rissbeeinflussender Eigenschaften zwischen Auflageschichten und Diffusionsschichten zu unterscheiden.*
Auflageschichten: *Typisch sind Risse durch hohe Zugeigenspannungen in galvanisch abgeschiedenen Schichten, typische Beispiel sind. Cr-Schichten. Gewöhnlich beschränken sich die beim Fertigungsprozess entstandenen Risse auf die Schicht. Häufig ist eine definierte Rissbildung erwünscht, um bestimmte Schichteigenschaften wie Notlaufeigenschaften bei Schmiermittelmangel zu gewährleisten. Auch ein Abbau gefährlich hoher Zugeigenspannungen durch Rissbildung kann angestrebt werden.Treten unter der Schicht Risse im Grundwerkstoff auf, handelt es sich meist um Spannungsrisskorrosion. In diesem Fall sind meist hohe Zugeigenspannugen in der Grundmaterialoberfläche von Bedeutung. Diese entstehen erfahrungsgemäß durch einen nicht optimalen Schleifprozess vor der Beschichtung*

© Kissel+Wolf - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Rissbildung

Was lässt sich aus dem **Rissverlauf gegenüber Bearbeitungsmerkmalen**, der Risslage am Bauteil und Rissveränderungen in Bezug auf den ursächlichen Fertigungsprozess schließen?

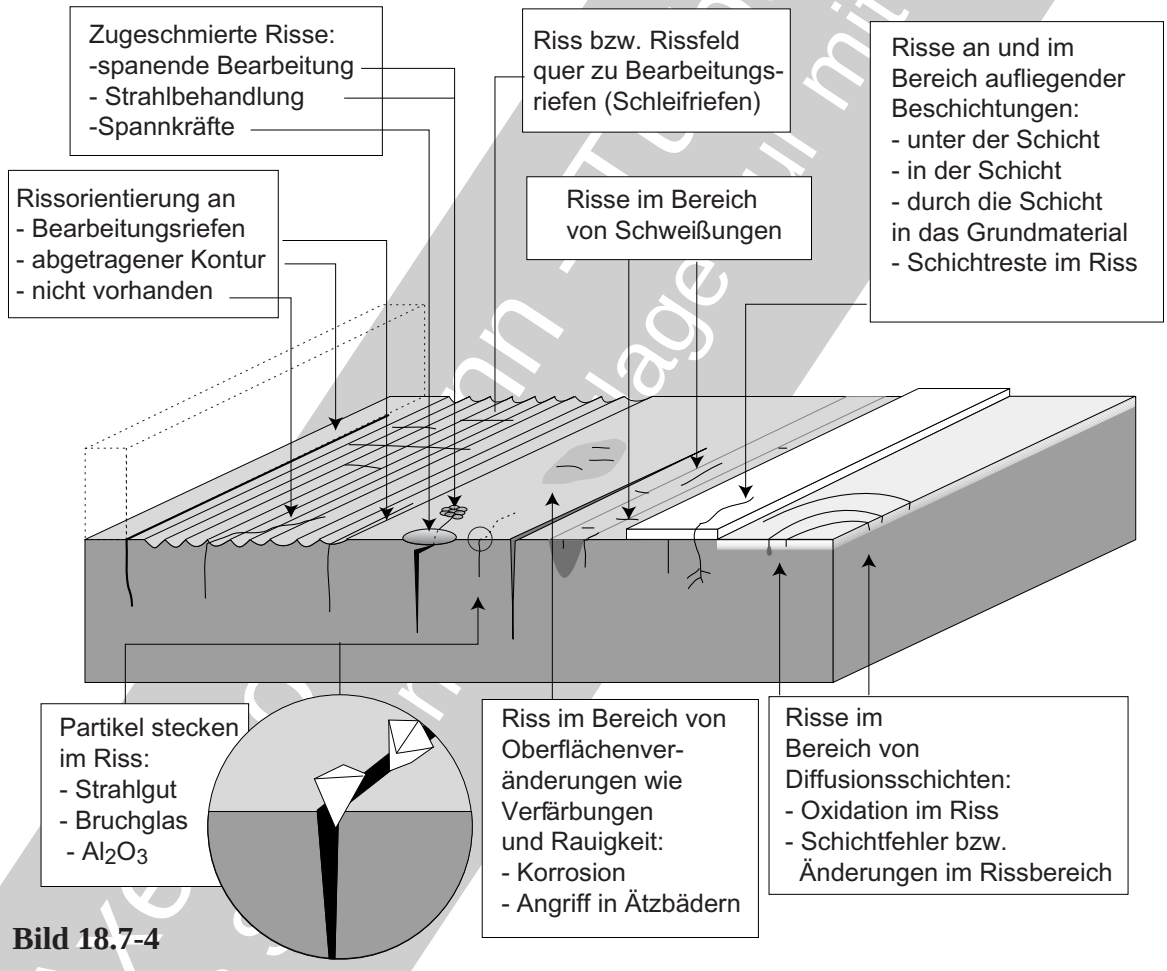
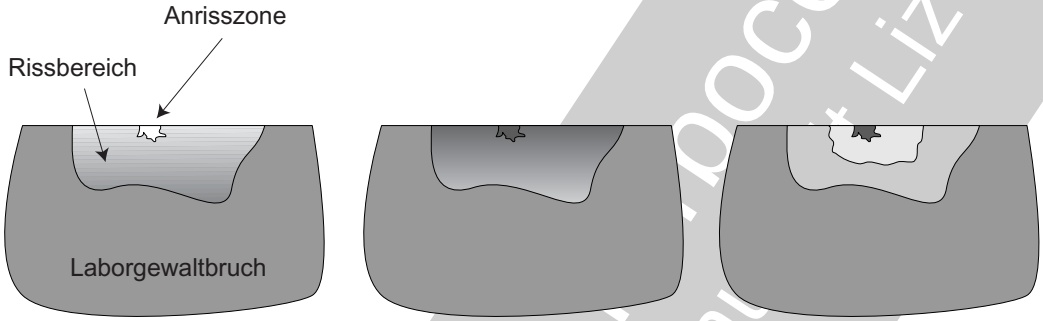


Bild 18.7-4

(Bild 18.4-12). Befinden sich Schichtreste im Riss (Bild 18.7-4) oder zeichnet sich der Rissverlauf in irgend einer Form im Schichtaufbau ab, ist dies ein sicheres Indiz für die zeitliche Reihenfolge von Beschichtung und Rissbildung. ***Diffusionsschichten*** *wie Al-, Nitrier- und Einsatzschichten, sind mit dem Grundmaterial innig „verwachsen“.* ***Bei Rissbildung ist also auch immer von einer Beeinflussung des Grundmaterials*** *(Schwingfestigkeit) auszugehen. Verhalten sich diese Schichten wie Al-Diffusionsschichten im Bereich niedriger Temperaturen spröd (Bild 18.7-1.2), lässt das die Ursache einer Rissbildung eingrenzen. Typisch ist eine plastische Verformung bei Raumtemperatur unter hohen Spannkräften, Richtversuchen oder infolge eines Handlingfehlers. Konzentrische Rissfelder ermöglichen bei etwas Glück Rückschlüsse auf die Krafteinleitung und die Art der Überlastung (Bild 18.5-11).*

Fertigung: Rissbildung

Aufgebrochene Risse, die in der Fertigung entstanden sind, können viel über Ihre Entstehungsursache verraten.



Beläge:

- Galvanisch: Cd, Cu, Ni, Cr, Ag,
- Brünierschicht
- Lot: Ag, Cu
- Diffusionsschicht: Al, Pt
- Rückstände von Eindringstoff
- Badrückstände: Cl
- Oxidschichten
- Korrosionsprodukte

Fremdpartikel (bei klaffenden Rissen):

- Strahlgut
- Beschichtungspulver

Verfärbungen:

- Anlauffarben/ Oxide
- Ablagerungen
  - galvanische Schicht
  - Brünierbad
  - Lot
- Ätzangriff
- Anreicherungen oder Verarmung von Legierungsbestandteilen.
- Reduktion (Entfernung von Oxiden)

Bruchgefüge:

besondere Merkmale von:

- Wasserstoffversprödung
- Lötrissigkeit (LME)
- Warmrissigkeit
  - Schleifen
  - Schweißen
  - Wärmebehandlung
  - Härten
- Gewaltbruch
- Schwingbruch
- Spannungsrisskorrosion
- Schadensursächliche bzw. schadensbegünstigende Werkstoffbesonderheiten

- Ätzangriff:

Aussagen zu:

- Rissausgang: Schwachstellen, Schadensmechanismus, Ursachen
- Entstehungsmechanismus: beeinflussende Fertigungsschritte
- Produktionsschritt (Ort) bei der Rissbildung
- Zeitpunkt der Rissbildung
- Schwächen und Mängel in der Qualitätssicherung bzw. Rissprüfung
- Verunreinigungen: Mängel im "Housekeeping"
- Abweichungen vom vorgesehenen (spezifizierten) Produktionsprozess bzw. Prozessparametern
- Rohteil/Halbzeug - und Werkstoffprobleme und Einflüsse

Bild 18.7-5

Bild 18.7-5: *Ist es möglich einen Riss im Rahmen einer zerstörenden Untersuchung aufzubrechen, lässt sich eine* ***Bruchflächenauswertung*** *durchführen. Die makroskopische und mikroskopische Untersuchung der Rissflächen liefert wichtige Hinweise auf Schadensmechanismus, Ursache, Fertigungsprozess und Zeitraum der Entstehung.*
Von besonderer Bedeutung sind ***mikroskopische Rissflächenuntersuchungen im REM*** *(Band 1 , Bild 2.2.2.4-3). Damit lassen sich typische Bruchflächenstrukturen identifizieren, die Rissursachen eindeutig zuordenbar sind. Hierzu gehören Warmrisse, Gewaltbrüche, Versprödungen, Schwingermüdung, Ätzangriff, Spannungsrisskorrosion und Werkstoffschwachstellen. Mikroanalysen im REM zeigen die Zusammensetzung von Belägen. Damit sind Rückschlüsse auf die Einwirkung von Beschichtungsverfahren, Diffusionsvorgängen und eindringenden Metallschmelzen (LME) möglich. Typische Bruchflächenmerkmale lassen sich drei Hauptgruppen zuordnen:*

Beläge und Fremdpartikel: *Es handelt sich um* ***Beschichtungen*** *die in den Riss eingedrungen sind. Sie können von galvanischen, chemischen oder Diffusionsprozessen stammen. Die Art der Ablagerungen lässt sich mit einer Mikroanalyse (im REM = engl. SEM) ermitteln. Aggressive Ätzbäder können mit Rückständen wie Chlor identifiziert werden. Ähnliches gilt für Korrosionsprodukte.*
War der Riss bereits bei einer ***Eindringprüfung*** *vorhanden, besteht die Chance Spuren der Komponenten (Eindringöl, Entwickler) nachzuweisen. Das würde zeigen, dass der Riss bei einer Prüfung nicht erkannt wurde.*
Oxidschichten *zeigen eine Aufheizung der Rissflächen bei Sauerstoffzutritt an, typisch für eine Wärmebehandlung in Atmosphäre.*
Auch ***Partikel wie Strahlgutbruch, Rückstände thermischer Spritzschichten oder Beschichtungspulver*** *können sich im Eintrittsbereich eines bereits vorhandenen Risses verklemmen und den Zeitpunkt der Rissentstehung eingrenzen.*

Verfärbungen: *Solche Merkmale lassen Rückschlüsse auf den genauen Ort des Rissbeginns zu. Damit erhöhen sich die Chancen auf rissauslösende Einflüsse rückzuschließen (Band 3, Bild 12.2.1.4-15). Die* ***Identifikation des Anrissorts*** *ist eine Voraussetzung für gezielte Mikrountersuchungen. Wurden die Rissflächen unter Sauerstoff (Luft) erwärmt, ist mit* ***Anlauffarben*** *zu rechnen. Damit zeigt sich meist eine Erwärmung an.* ***Quantitativen Temperaturangaben aus Anlauffarben auf Rissflächen ist aber noch mehr Skepsis*** *als an Bauteiloberflächen entgegenzubringen. Die frischen Metalloberflächen von Rissufern, ein mit der Risstiefe behinderter Sauerstoffzutritt, von Diffusion veränderte Werkstoffzusammensetzung und eventuelle Ablagerungen können Anlauffarben verwirrend beeinflussen. Wurde das gerissene Teil einer reduzierenden Glühbehandlung im Vakuum, Wasserstoff oder einer ätzenden Atmosphäre (Cl, F) unterworfen, können Anlauffarben bzw. Oxidation entfernt worden sein. Das begünstigt Fehlschlüsse.*
Rissflächen können auch von Belägen aus Bädern, eingedrungenen Metallschmelzen (LME) und diffusionsbedingten Veränderungen (z.B. Al-Diffusionsbeschichtung) eine Verfärbung erfahren die mit einer Mikroanalyse Zuordnungen ermöglicht.

Bruchgefüge: *Bereits die makroskopische Auswertung der Rissflächen bei denen auch die Verfärbungen eine wichtige Rolle spielen, lassen auf primäre Anrisszonen schließen. Typisches Beispiel ist eine ausgeprägte interkristalline Bruchzone in einem sonst zähen Bruch. Dabei ist eine konzentrische Anordnung um einen sich abzeichnenden Bereich ein zusätzliches Indiz. Ein solches Bruchbild lässt den Verdacht einer Wasserstoffversprödung oder Spannungsrisskorrosion aufkommen (Band 1, Bild 5.7.2-2). Ein* ***Saum an der Oberfläche*** *(Band 3, Bild 12.2.1.7-10) macht* ***interkristalline Korrosion*** *verdächtig.*

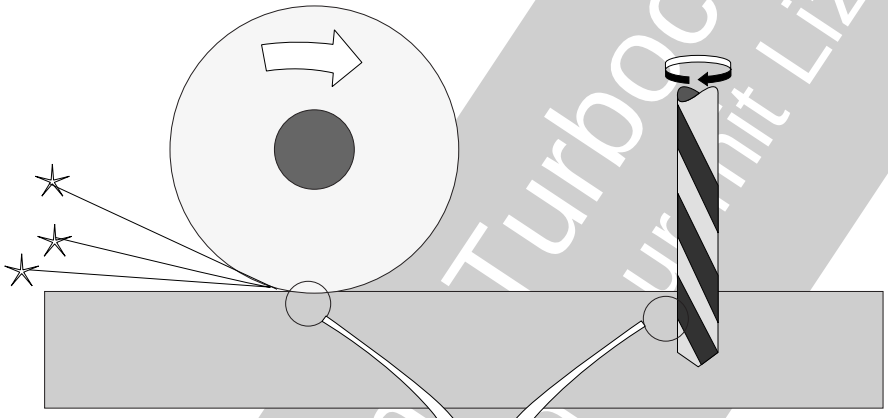
© Axel Plasmann - Turbosoft
Abschlussunterlage in Arbeit

Bild 18.7-6: Örtliche Aufheizung mit der Gefahr der Rissbildung *entsteht neben Effekten wie dem Einwirken von Funken und heißen Partikeln (Kapitel 18.6) in erster Linie bei zerspanender Bearbeitung (Skizze oben).*
Im Bereich des Werkzeugeingriffs erfolgt örtlich eine intensive Wärmeeinbringung. Hohe Temperaturen (Skizze unten Mitte) bis zur örtlichen (Korngrenzen) Werkstoffanschmelzung können die Folge sein. In dieser Phase wird das aufgeheizte Volumen vom umgebenden Material an der Dehnung behindert (siehe auch Bild 18.6-3). Kommt es dabei zu Druckspannungen über der Fließgrenze tritt eine plastische Stauchung ein. Nach dieser Aufheizung erfolgt eine sehr schnelle Abkühlung. Das umgebende kalte Material und äußere Kühlung, meist mit Kühlschmierstoff, leitet die Wärme intensiv ab. Dabei versucht sich das gestauchte Volumen zusammenzuziehen. Es wird aber von der Umgebung daran gehindert, was zu hohen Zugspannungen führt. Bei noch teigigen Korngrenzen kommt es zu Warmrissen (Skizze unten rechts,Band 3, Bild 11.1-8) mit typischen Bruchmerkmalen (Band 3, Bild 12.2.1.3.1-10). Werden von der Rissbildung Eigenspannungen nicht ausreichend abgebaut, ist nach dem Abkühlen mit hohen Zugeigenspannungen zu rechnen.
Dann besteht die Möglichkeit, dass ***Risse erst zu einem späteren Zeitpunkt entstehen****. Beispielsweise unter Korrosionseinfluss bei der Lagerung (Bild 14-3) oder Schwingbeanspruchung im Betrieb.*

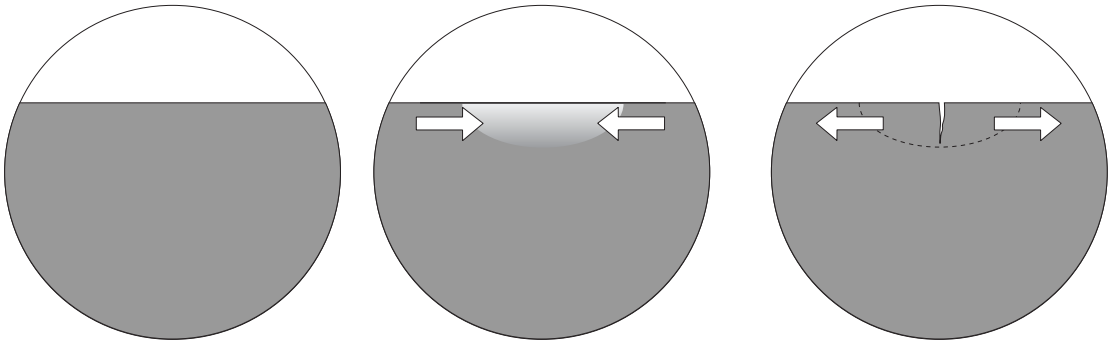
© Axel Rossmann - TU Dresden
als Schulungsunterlage nutzbar

Fertigung: Rissbildung

Rissbildung als Folge örtlicher Aufheizung ist bei spanender Bearbeitung ein typisches Phänomen. Wie ist es erklärbar?



Modell der Rissbildung



Vor dem Bearbeiten, unbeeinflusste Oberfläche

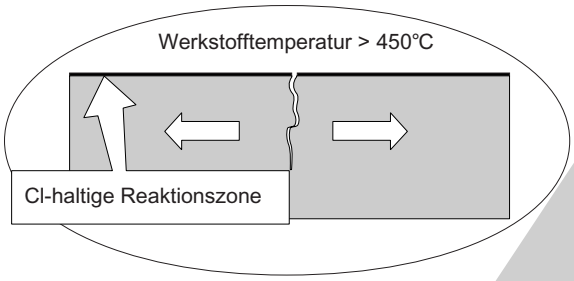
Örtliche Aufheizung beim Zerspanen. Druckspannungen infolge Wärmedehnung führen zu plastischem Stauchen.

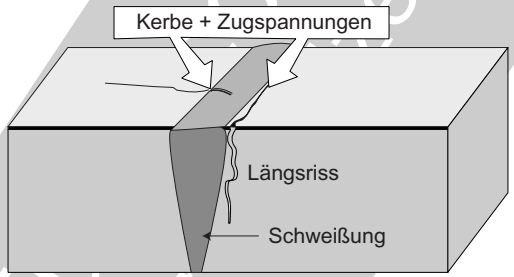
Abkühlung nach dem Zerspanen. Im gestauchten Bereich entstehen Zugspannungen mit der Gefahr von
- Warmrissbildung an den erweichten Korngrenzen.
- Spannungsrisskorrosion
- Schwingrisse

Bild 18.7-6

Zugspannungen und winzige Rückstände von Chlor sind für Titanlegierungen eine gefährliche Kombination!

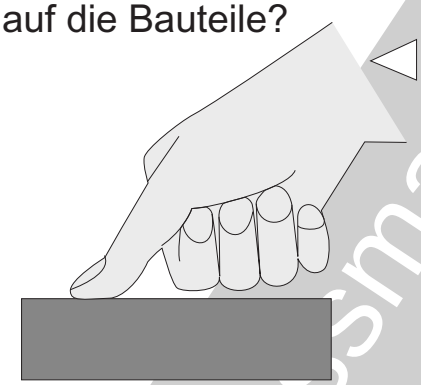
Bedingungen für Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen



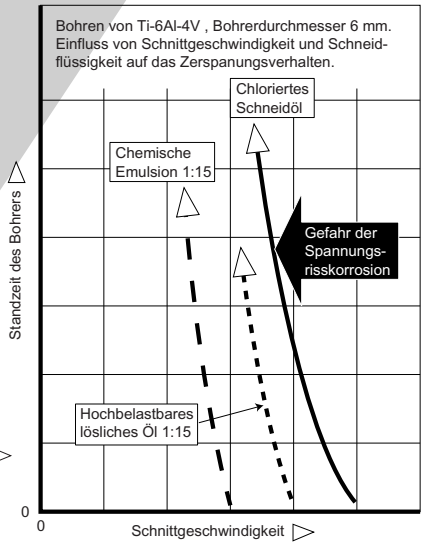


Typisches Beispiel für Spannungsrisskorrosion an einer Titanlegierung

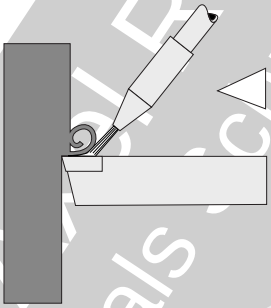
Wie kommen Halogenide, insbesondere Chlor, in der Fertigung auf die Bauteile?



Fingerabdrücke/Handschweiß vor Wärmebehandlungen oder Schweißungen



Schneidflüssigkeit/-paste Kühl-Schneidmittel



Einwirken von Cl-haltigen Zerspanungshilfsstoffen bei hohen Bearbeitungstemperaturen oder nachträglicher Wärmebehandlung

Einwirken von halogenhaltigen Reinigungs- und Entfettungsmitteln/-bädern vor der Wärmebehandlung oder dem Schweißen.

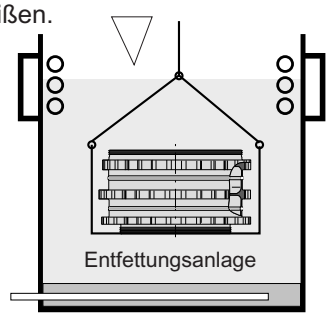


Bild 18.7-7

© Axel Rossmann - Technische Universität als Schulungsunterlagen

Bild 18.7-7: Spannungsrisskorrosion *(SpRK, engl. Stress Corrosion Cracking = SCC) kann an vielen Werkstoffen wie Stählen, Messing, Aluminiumlegierungen auftreten.* ***Je höher die Festigkeit, umso empfindlicher*** *ist ein Werkstoff für diesen rissbildenden Schadensmechanismus.*

Im Triebwerksbau besteht für Spannungsrisskorrosion an ***Titanlegierungen*** *ein besonderes Interesse (Band 3, Bild 12.2.1.7-8). Dies liegt an der intensiven Anwendung von Titanlegierungen in hochbelasteten, sicherheitsrelevanten Bauteilen wie Rotorkomponenten und Druckgehäusen.*

Voraussetzungen für Spannungsrisskorrosion *sind:*

- Korrosionsempfindlicher ***Werkstoffzustand***

- Korrosionsauslösendes ***Medium****, passend zum Werkstoffzustand.*

- Ausreichend hohe ***Zugspannungen****.*

Diese schadensauslösenden Einflüsse sind nicht nur im Triebwerk vorhanden, sondern auch im ***Produktionsprozess****. Betriebsschäden (Bild 18.7-9 und Bild 18.7-10) werden häufig erst mit Zugeigenspannungen und/oder einer Werkstoffbeeinflussung aus dem Produktionsprozess möglich.*

Titanlegierungen *benötigen kein wässriges Korrosionsmedium (Band 1, Bild 5.6.3.1.1-7) wie üblicherweise SpRK-Systeme bei Stählen. Hohe Zugspannungen machen bereits eine feste Halogenverbindung gefährlich. Im Fertigungsprozess handelt es sich meist um eine Chlorverbindung wie Kochsalz. Fluor, das z.B. beim Überhitzen von Fluorkohlenwasserstoffen („Teflon“, Trennmittel, Gleitmittel) frei wird, dürfte ebenfalls ein potenzielles Korrosionsmedium der Fertigung sein. Temperaturen oberhalb 450°C, verstärkt ab 500 °C sind zumindest bei Chlorverbindungen notwendig um Risse auszulösen (Skizze oben links). Solche Temperaturen treten bei Wärmebehandlungen (Bild 18.3-16) sowie Schweiß- und Lötprozessen auf. Die* ***notwendigen Zugspannungen sind häufig Eigenspannungen im Rohteil*** *(Schmieden) und* ***aus dem Fertigungsprozess*** *(Schleifen; Schweißen, Skizze oben rechts).*

Das notwendige Chlor kann aus vielen Quellen im Fertigungsablauf stammen.

- ***Handschweiß*** *beim Handling der Bauteile (Bild 18.3-16).*

- Cl-haltige ***Kühlschmierstoffe*** *bzw. Schneidpasten.*

- Cl-haltige ***Reinigungsmittel*** *bzw. Reinigungsbäder*

Ausreichend hohe Temperaturen zersetzen die Chlorverbindung, das aggressive Chlor wird frei. Das gilt für aufliegende Verunreinigungen wie Kochsalz (NaCl) und dünne Reaktionsschichten (Band 3, Bild 12.2.1.7-8).

Vor diesem Hintergrund ist das ***Verbot von Entfettungsbädern aus chlorierten Kohlenwasserstoffen*** *(Trichloräthan = Tri, Perchloräthan = Per) zu begrüßen.*

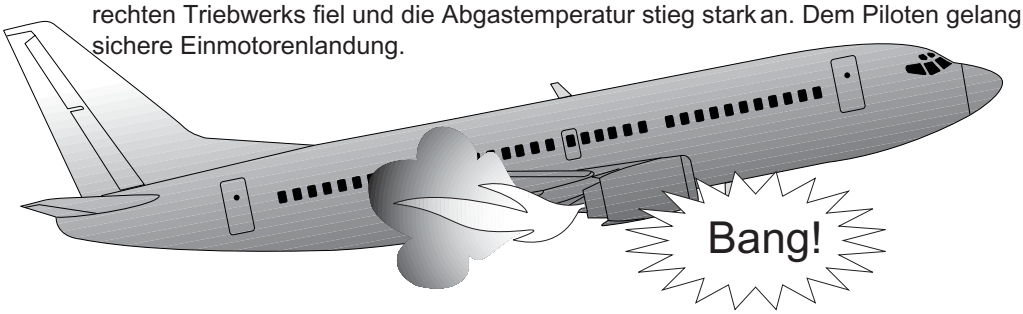
Trotz Verbesserung von Schnittleistungen bleibt unter dem Sicherheitsaspekt unverständlich, warum offenbar noch heute Cl-haltige Kühlschmiermittel für das Bohren von Titanlegierungen empfohlen werden (Diagramm, Lit 18.7-7).

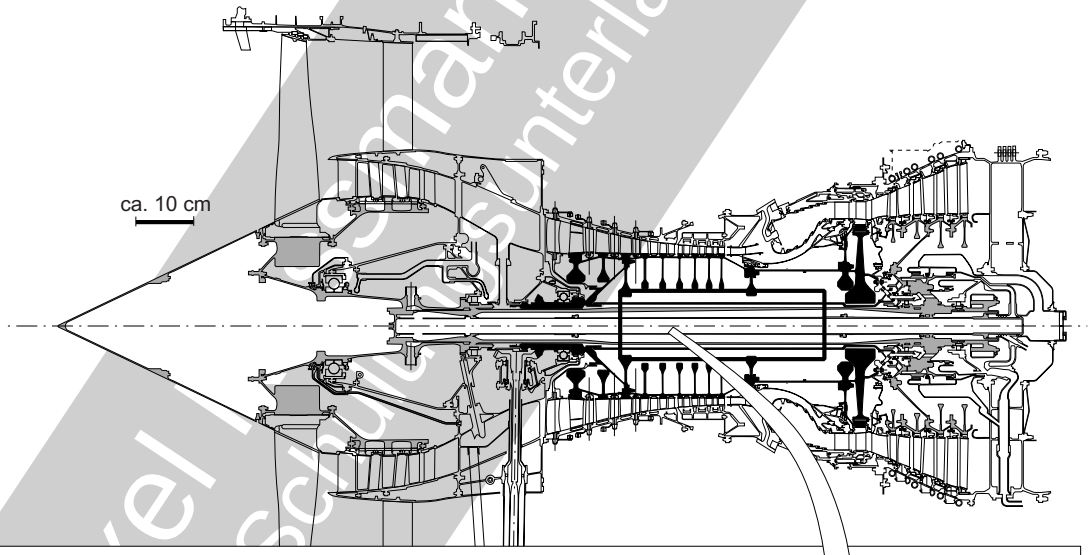
© Aydin Dissmann - Turbo Consult
Abschlussunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Rissbildung

Spannungsrisskorrosion und Bruch einer Stahlwelle und eines zentralen Lüftungsrohrs aus einer Titanlegierung durch die Einwirkung chlorhaltiger Medien und Wasserstoff bei der Überholung. Wahrscheinlich chlorhaltige Entlackungs- und/oder Entfettungsbäder.

Nach dem Start bei ca. 150 Metern Höhe hörte die Besatzung einen sehr lauten "Knall". Augenzeugen am Boden sahen kurzzeitig Flammen und Rauch aus dem Abgasrohr treten. Das Flugzeug begann nach rechts auszuweichen und abzukippen. Die Fandrehzahl des rechten Triebwerks fiel und die Abgastemperatur stieg stark an. Dem Piloten gelang eine sichere Einmotorenlandung.





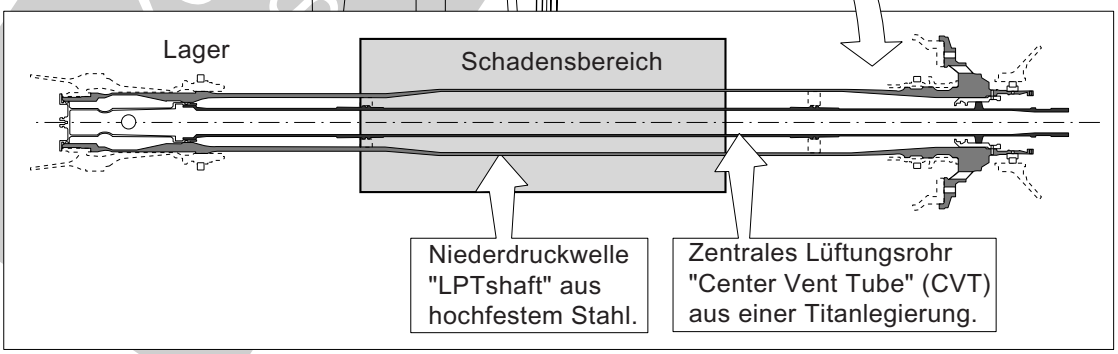


Bild 18.7-8

Bild 18.7-8 *(Lit. 12.2.2.7-4, Beispiel 12.2.2.7-1): Obwohl offenbar dieser Fall eher auf eine Überholung zurückzuführen ist, haben die beschriebenen Probleme auch für die Fertigung von Neuteilen große Bedeutung. Es handelt sich um die* ***Verwendung ungeeigneter oder potenziell gefährlicher Hilfsstoffe.*** *Wie sich zeigt, können Einflüsse oder Schädigungen aus der Fertigung erst zu einem sehr viel späteren Zeitpunkt unter betriebstypischen Bedingungen wirksam werden (Bild 18.7-10).*
Der Schaden in Form eines Bruchs der Niederdruckwelle aus einem hochfesten Stahl, trat während des Steigflugs (Skizze oben) auf. Also bei höchster Fanleistung und damit höchster Wellenbelastung (siehe Triebwerksskizze). Dieses Beispiel macht die Risiken der Auslösung von ***Betriebsrissen infolge ungeeigneter Entlackungs- und Reinigungsbäder*** *deutlich. Im vorliegenden Fall wurde die Welle aus Stahl von* ***chlorhaltigen Rückständen*** *angefressen. Die Korrosionskerben dienten als Ausgang von Ermüdungsrissen infolge einer Torsionsschwingung. Es kam zum Bruch der Niederdruckwelle (LPT shaft, Skizze unten) in viele Einzelstücke (Bild 18.7-9).*
Das zentrale Lüftungsrohr (CVT) in der Welle besteht aus einer ***Titanlegierung.*** *Es erfuhr durch* ***Wasserstoff und Chloreinwirkung eine Versprödung*** *und brach als Folgeschaden nach der Welle.*

Kommentar *zu den Schlussfolgerungen aus dem im Beispiel 18.7-1 auszugsweise zitierten Untersuchungsbefund:*

Die Lackierung lässt darauf schließen, dass die NDT-Welle offenbar aus einem ***hochfesten Stahl*** *besteht. Der Bruch in viele spröde Einzelstücke weist neben den schwingrissauslösenden Korrosionskerben durch die chlorhaltigen Badrückstände auf ein Risswachstum und/oder eine Rissbildung unter Korrosionseinfluss (Spannungsrisskorrosion, Schwingungsrisskorrosion) hin.*
Der Bruch des CVT, das aus einer Titanlegierung besteht, ist zwar ein Folgeschaden des ***Wellenbruchs****, das spröde Bruchbild ist jedoch ungewöhnlich. Es wurden offenbar Anzeichen für eine Wasserstoffversprödung als auch Cl-haltige Ablagerungen gefunden, die folgende Interpretation nahelegen:*
Im Beispiel wird dieVermutung geäußert, dass es sich um Wasserstoffversprödung handelt. Titanlegierungen neigen in Reinigungsbädern zu versprödender Wasserstoffaufnahme (Band 3, Bild 12.2.1.7-9) wenn Fe-haltige Verunreinigungen (z.B. an einer Scheuerstelle) zugegen sind. Für eine Versprödung die auf eine Schlagbeanspruchung reagiert, müssen sich jedoch spröde ***Titanhydride*** *gebildet haben. Ist der Wasserstoff wie in Stählen im Gitter gelöst, ist anzunehmen, dass eine rissbildende Versprödung eine statische Beanspruchung über länger Zeit erfordert (Band 1, Bild 5.7.1-6). Die in der Literatur beschriebene Mikrosrissbildung scheint eher auf einen anderen, titantypischen Schadensmechanismus hinzuweisen.*
Denkbar ist, dass sich, wie in Literatur 18.3-8 beschrieben, eine dünne Reaktionsschicht des Titans mit Chlor aus dem Reinigungsbad gebildet hat (Band 3, Bild 12.2.1.7-8). Diese ist durch nachträgliches Spülen verständlicherweise nicht zu entfernen. Bei der Betriebsspannung und -temperatur von über 450°C (?) kann es zur beobachteten Mikrorissbildung infolge ***Spannungsrisskorrosion*** *kommen. Dabei benötigt eine solche Korrosionsform, im Gegensatz zur NDT-Welle aus Stahl, keinen wässrigen Elektrolyten (Bild 18.3-16).*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schadensbild bei Spannungsrisskorrosion

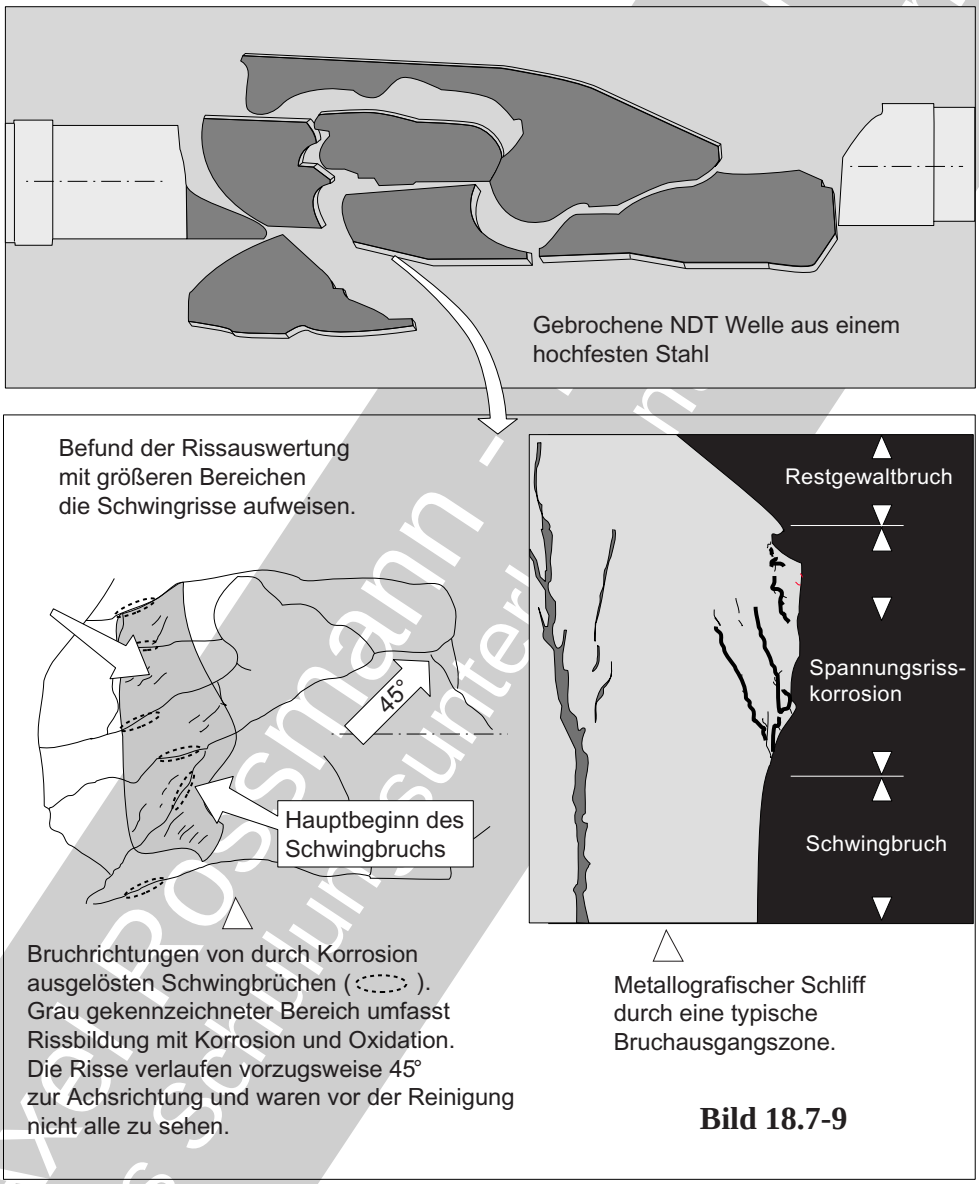


Bild 18.7-9

Bild 18.7-9 *(Lit 18.7-4, Beispiel 18.7-1): Das Bild zeigt ein Detail (Bild 18.7-9) der gebrochenen NDT-Welle aus einem hochfesten Stahl. Die Schwinganrisse entstanden unter Korrosionseinfluss. Die vielen* ***spröden Bruchstücke*** *(Bild oben) und die* ***verästelte Rissbildung*** *(Bilder unten) weisen auf zusätzliche Einflüsse hin. Das Bruchbild lässt auf eine* ***Versprödung mit Wasserstoffeinfluss*** *schließen. Hochfeste Stähle sind gegenüber* ***wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion*** *sensibel. Dabei* ***nimmt der Werkstoff während der Korrosion Wasserstoff auf*** *(Band 1, Bild 5.7.1-4). Das würde die Befunde und den Bruch der Welle einleuchtend erklären. Geht man davon aus, dass die Betriebstemperatur der Welle ein wässriges Korrosionsmedium nicht zulässt, dürften* ***Stillstandszeiten mit Schwitzwasserbildung*** *bei der Schadensentstehung eine wichtige Rolle gespielt haben.*

© Axel Rossmann - Ingenieurbüro
als Schulungsunterlagen

Beispiel 18.7-2 (Lit 18.7-4):

Zitat: „...The take off was normal, but between 400 and 500 feet in the initial climb the flight crew heard a loud 'bang' from the No 2 engine....The No 1 engine (fan) speed indication for the No 2 engine was reducing rapidly and the corresponding exhaust gas temperature (EGT) indication was in excess of 900°C.... several witnesses around the airport noted that for a brief period flames and smoke had appeared from the rear of the No 2 engine... An uneventful...single engine landing was carried out.

All engines utilise a four stage low pressure turbine (LPT) which drives a single stage fan and three stage...low pressure compressor (LPC) through the LPT shaft.(The examination of the engine) indicated that the low pressure (LP) shaft had failed since the fan, which appeared undamaged, was able to rotate freely whilst the low pressure turbine (LPT) did not rotate...The position of the damage on the No 4 (bearing) outer track...indicated that the rear section of the LP shaft had moved aft prior to the bearing failure...There had been no growth in the bore diameter of the LPT disks, and thus that the LPT had no overspeed...The LPT shaft had failed over a length between, approximately, the No 3 bearing and the aft end of the HPC. In this area **the shaft had fragmented into some seven segments** of various sizes...

The external surface of the shaft showed clear evidence, over its full length, of an aluminium-loaded protective paint finish, ...there were no obvious signs of corrosion. **The inner surface, however was devoid of this protective paint throughout its sealed length, bounded by the front and rear center vent tube (CVT)/LPT shaft seals, and the shaft had been affected by surface corrosion** over this same length. The corrosion was most severe in the fragmented region close to the areas of contact made by the forward CVT support ring, although there was evidence of the protective paint within the front and rear support ring areas of contact. Detailed examination showed the paint in these areas to have adhered to the surface, indicating that the corrosive attack on the inner paint surface had occurred after painting and the whole length of the shaft had probably been coated in paint. The shaft's inner surface was covered in compact patches of **dark brown powdery deposit**...which suggested that the whole surface had been covered prior to the failure...The shaft had failed as a result of **torsional fatigue** mechanism, from multiple origins, precipitated by corrosion pitting of the shaft inner surface... A microsection taken near the primary origin revealed the presence of a **multi-branched stress-corrosion cracking** in addition to fatigue mechanism...the cracking mechanisms had been relatively longterm.

The protective paint...is essentially a silicon-based paint loaded with 40% aluminium...The painting process involves, after degreasing, the application of several layers...The degreasing process involves the **use of chlorine based solvents (such as trichlorethylene**)…An element analysis of the corrosion deposits, however, revealed the presence of chlorine in the form of aluminium (and other) chlorides. Evidence of chlorides were also found… throughout the sealed region of the LPT shaft. The **CVT had failed** as a direct result of the LPT shaft failure...(the) significant **fragmentation had occurred due to hydrogen embrittlement of the titanium** with the outer surface showing the presence of small oxidised cracks in which chlorine enrichment was detected...it originated from a **chlorine aromatic derivative from the chlorobenzene family**. This potentially corrosive agent is commonly used as a paint stripper.....it probably derived from an agent **introduced inadvertendly, or used as temporary alternate**...

This was the **first failure** of this nature to have occurred to this engine type...**although cracks in at least one shaft** had been detected, during a shop visit, in the outer surface (of the LPT) resulting from an area of fretting.

Kommentar: Siehe Bild 18.7-8 und Bild 18.7-9.

© Axel Pressmar - TU Dresden
Nur zum Unterlagenaustausch im Lehrbetrieb

Merksätze:.

- **Keine nicht zugelassenen Hilfsstoffe**, insbesondere Bäder, zur Reinigung/Entfettung anwenden.

- Besondere Vorsicht bei der unvermeidlichen Anwendung **chlorhaltiger Hilfsstoffe an Titanlegierungen**.

- Vorsicht bei der **Neuzulassung von Hilfsstoffen** und beim Lieferanten- bzw. Produktwechsel.

- Schäden durch ungeeignete Hilfsstoffe können sich auch erst zu einem viel **späteren Zeitpunkt nach der Herstellung** zeigen.

Bild 18.7-10: *Viele Praktiker können aus Erfahrung auf Beispiele hinweisen, in denen* ***nach intensiver Rissprüfung als rissfrei erkannte Bauteile später Risse aufwiesen,*** *ohne dass eine nennenswerte äußere Belastung eingewirkt hatte. Solche Risse werden gewöhnlich im Zwischenlager oder beim Kunden nach der Auslieferung, d.h. zu einem deutlich späteren Zeitpunkt festgestellt. Meist ist die erste Reaktion die Vermutung, dass die Prüfung Risse nicht gefunden hat. Dies mag der Fall sein (Bild 17.3.1-2), es ist aber durchaus möglich, dass es sich um eine sog.* ***„verzögerte Rissbildung"*** *(engl.* ***delayed cracking****, Lit. 18.7-9, Band 3, Bild 12.2.1.3-18 und Bild 14-3) handelt. Es sei jedoch davor gewarnt, von vorneherein jeden nach einer Prüfung gefundenen Riss einer verzögerten Rissbildung zuzuordnen.*
Eine verzögerte Rissbildung kann unterschiedliche Ursachen haben:

- ***Ungünstige Wärmebehandlung*** *die für Einflüsse wie ungünstiges Gefüge, hohen Zugeigenspannungen und Kerbstellen verantwortlich ist.*

- Aufnahme von Wasserstoff mit ***Wasserstoffversprödung****. Begünstigend wirken Zugspannungen und eine hohe Werkstofffestigkeit.*

- ***„Stress relief cracking"*** *bei Schweißungen (Band 3, Seite 12.2.1.3.1-17, Tabelle 1) als eine Form von Kriechrissen. Tritt auch bei nachfolgenden Wärmebehandlungen (Spannungsarmglühen) auf.*

- ***Spannungsrisskorrosion*** *unter geeigneten Medien und ausreichenden Zugspannungen.*

Eine andere Form späterer Rissbildung kann an Bauteilen mit spröden Beschichtungen auftreten. Dazu neigen Al-Diffusionsschichten die zum Oxidationsschutz dienen bei unsachgemäßem ***Handling*** *mit örtlicher plastischer Dehnung. Es bestehen gute Chancen mit einer Laboruntersuchung anhand typischer Schadensmerkmale, diese Risse von verzögerter Rissbildung zu unterscheiden.*

© Axel Rossmann - Turbosoft
als Schulungsunterlage im Unterricht

Fertigung: Rissbildung

Risse in geprüften Neuteilen müssen nicht übersehen worden sein, sie waren möglicherweise tatsächlich zur Zeit der Rissprüfung noch nicht vorhanden.

- "Stress Relief Cracking" an Schweißungen und gehärteten Stählen
- Rissbildung durch Wasserstoffdiffusion, z.B. an kadmierten Federn.
- Unterkritisches Risswachstum bei unsachgemäßer Lagerung, z.B. durch Spannungsrisskorrosion.
- Plastische Verformung von Bauteilen mit harten Schichten beim Handling.

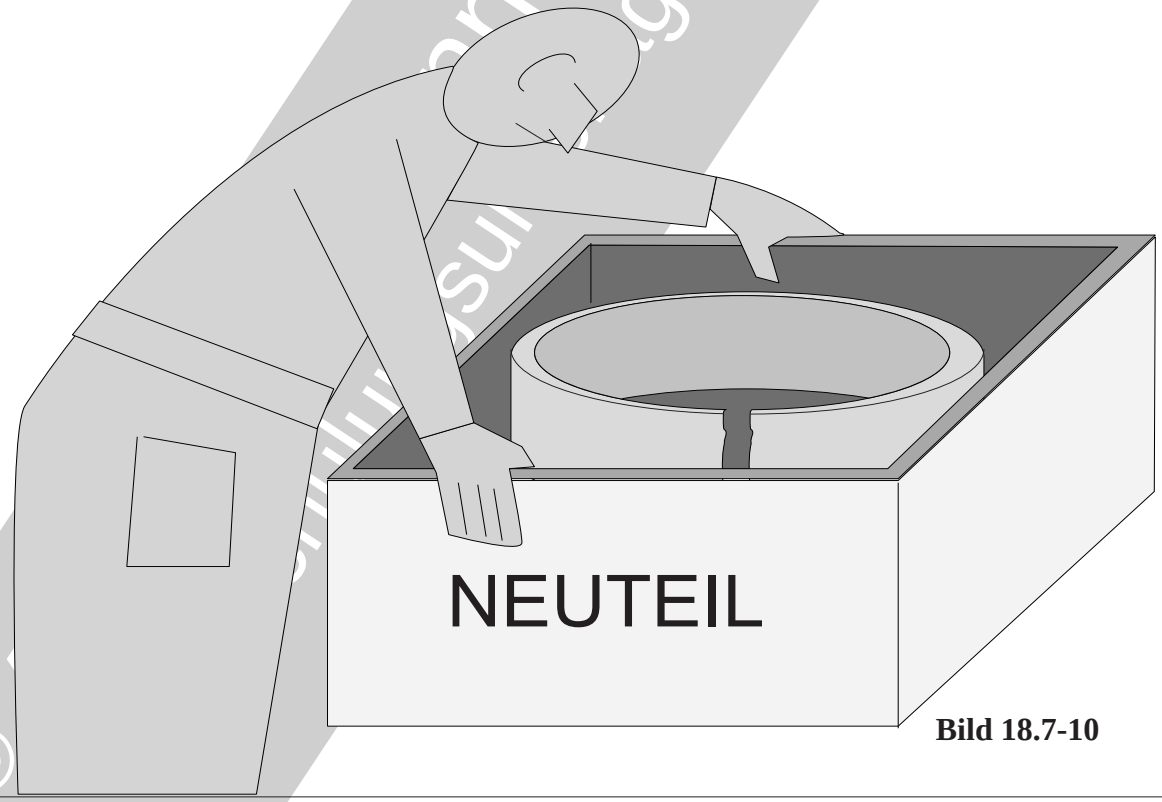


Bild 18.7-10

© Universitätsbibliothek

Vermeidung von Rissbildung, Vorgehen und Abhilfen bei Rissbildung im Fertigungsprozess.

A Vermeidung von Rissbildung:

1. Ausreichende Erprobung der Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozesse (ZfP)
2. Übernahme des erprobten Fertigungsablaufs ohne Änderungen in die Serie
3. Einhalten erprobter und spezifizierter Prozessparameter
4. Verwendung erprobter Bearbeitungsmaschinen (Typen)
5. Verwendung erprobter und zugelassener Bäder und Hilfsstoffe
6. Handling der Bauteile entsprechend den Vorschriften
7. Bei Serienbeginn erste relevante Bauteile zerstörungsfrei prüfen, dann erst die Serie durchziehen.

B Vorgehen bei Rissbildung:

1. Ermittlung des Rissbildungsmechanismus bzw. der Ursachen
2. Ermittlung des Fertigungsprozesses bei dem die Rissbildung erfolgt und eventuell ursächlich beitragender Fertigungsprozesse
3. Klärung der Frage: Warum wurden die Risse erst jetzt gefunden?
4. Verifizierung der Untersuchungsergebnisse durch Verfolgung der Produktionsschritte und/oder eventuell durch Versuche
5. Stop der verdächtigen Fertigungsprozesse bis zur Definition der Abhilfen
6. Gezielte Abhilfen definieren, einleiten und deren Wirksamkeit verifizieren.
7. Ermittlung der Risiken:
   - Betroffene Bauteile,
   - Ausgelieferte Bauteile
   - Beeinflussung des Betriebsrisikos
8. Vorgehen bei eventuell verbauten Teilen erarbeiten, zulassen und einleiten.
9. Nacharbeitsmöglichkeit mit den zuständigen Fachabteilungen untersuchen
10. Gegebenenfalls Nacharbeit für betroffene Bauteile erproben und zulassen

Bild 18.7-11

Bild 18.7-11: *Rissbildung gefährdet die Sicherheit der Bauteile und muss zuverlässig vermieden werden. Bestimmte* ***Vorgehensweisen*** *können dabei hilfreich sein (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):*

„A“ ***Vermeidung von Rissbildung:*** *Die Vorgehensweise empfiehlt sich als vorbeugend.*

„A1“: *Eine* ***ausreichende Erprobung*** *der Qualitätssicherungs- und Fertigungsprozesse ist zur* ***Festschreibung der optimierten Verfahren*** *unverzichtbar. Dies gilt selbst bei Lizenzfertigung. So ist zu gewährleisten, dass z.B. das Verhalten der Werkzeuge und Anlagen den Forderungen des Lizenzgebers genügt. Ein Beispiel sind Elektronenstrahlschweißungen, deren Ergebnis sehr von den Maschineneigenschaften abhängen kann (Band 3, Bild 12.2.1.3.1-4 und Bild 12.2.1.3.1-5). Von diesen Vorschriften bzw. Arbeitsanweisungen ist keinesfalls eigenmächtig abzuweichen.*

„A2-5“: *Einer ausreichenden* ***Übertragung optimierter Verfahren aus der Fertigungsentwicklung oder von einem Lizenzgeber in die Serie*** *stehen oft unerwartete Probleme entgegen. Offenbar besteht bei Technikern und Ingenieuren ein „innerer Zwang“ nichts „unverbessert“ zu übernehmen. Häufig sind aber die Hintergründe für, auf den ersten Blick scheinbar nicht optimale Fertigungsabläufe im Serienbereich, unbekannt. So besteht erfahrungsgemäß die Gefahr, dass Probleme in der Serie wieder auftreten die bereits in der Entwicklung als gelöst galten. Solche „Verschlimmbesserungen“ (Band 1, Bild 3.2.2-2 und Bild 3.2.2-3) können bereits mit einem* ***von der Erprobung abweichenden Maschinentyp*** *beginnen. Das Wechseln auf* ***scheinbar effektivere Hilfsstoffe*** *wie andere Schneidstoffe oder Kühlschmiermittel ist zerstörungsfrei kaum nachweisbar, kann aber fatale Folgen haben. Dazu gehören Zugeigenspannungen welche die zyklische Lebensdauer des Bauteils im Betrieb unzulässig verkürzen. Diese Überlegungen gelten in übertragenem Sinn auch für die Qualitätssicherung.*

„A6“: *Das Handling der Bauteile mit Fixierung und Einspannen, Lagerung und Verpackung hat entsprechend den Vorschriften zu erfolgen. Bei Überlastung mit plastischer Verformung, z.B. durch versehentliche Stoßbeanspruchung, kann es zur Rissbildung, insbesondere an spröden Beschichtungen kommen (Bild 18.7-1.2 und 18.7-2).*

„A7“: *Zu Beginn einer Serie hat es sich im Hinblick auf eine Schadensminimierung bewährt, die* ***ersten Teile zwischen den einzelnen Prozessschritten genau zu prüfen****. Gegebenenfalls ist eine Rissprüfung vorzuziehen, bevor eine große Serie folgt. Typisches Beispiel ist die Eindringprüfung nach Schleifbearbeitung. Um das Problem der typischen Verschmierung und damit der schlechten Erkennbarkeit der Risse zu vermeiden, sollte ein zugelassener Wärmebehandlungszyklus vor der Prüfung durchgeführt werden (Bild 17.3.1-7).*

„B“ Vorgehen bei Rissbildung: *Sind bereits Risse aufgetreten, steht die* ***Risikominimierung*** *in Sicherheit, Zeitaufwand, Kosten und Prestige im Vordergrund (Bild 15-11).*

„B1“: *Voraussetzung für gezielte Maßnahmen ist die* ***Ermittlung der Ursachen****. Gewöhnlich handelt es sich nicht nur um eine Ursache, sondern um mehrere die zur Rissbildung beigetragen haben. Mit den ursächlichen Einflüssen steht die Kenntnis des* ***Schadensmechanismus*** *im wechselseitigen Zusammenhang. Hierfür stehen heute äußerst sensible und aussagesichere Untersuchungsmethoden der Metallografie (Band 1 Bild 2.2.2.4-2) und das REM (Band 1 Bild 2.2.2.4-3) zur Verfügung.*

„B2“: *Sind die Ursachen soweit möglich geklärt und bewertet, lassen sich die zugehörigen Fertigungsprozesse identifizieren. So lässt sich der Zeitraum der Rissentstehung und der*

© Axel Possmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Umfang eventuell betroffener Bauteile eingrenzen.

„B3“: *In einigen Fällen kann sich die Frage stellen warum Risse erst zu einem späten Zeitpunkt entdeckt wurden. Besonders wenn bereits mehrere Fertigungs- und Qualitätssicherungsschritte seit der Rissbildung abgelaufen sind oder Risse sogar erst am Fertigteil gefunden wurden.*
Die Klärung dieser Frage ist wichtig, um Schwachstellen in der Qualitätssicherung, meist der zerstörungsfreien Prüfung, zu erkennen. Vorauszuschicken ist, dass auch die beste ZfP keine hundertprozentige ***Auffindwahrscheinlichkeit*** *für Risse garantiert (Bild 17.3.1-2). Natürlich ist eine fallspezifische Optimierung angeraten. Eine typischer Grund sind ungünstige Arbeitsfolgen. Wenn z.B. direkt nach dem Schleifen von Nickellegierungen eine Eindringprüfung erfolgt, die zur Öffnung der Verschmierungen notwendige Wärmebehandlung aber erst nach mehreren weiteren Prozessschritten.*

„B4“: *Die Erfahrung lehrt, dass gerade bei Fertigungsschäden die Wahrscheinlichkeit falscher Schlussfolgerungen besteht. Grund ist die Komplexität der Schadensmechanismen und die Vielfalt möglicher ursächlicher Einflüsse. Um dieses Risiko zu minimieren, kann es von entscheidender Bedeutung sein,* ***Folgerungen zu verifizieren****. Dafür hat sich die minutiöse und deshalb sehr aufwändige* ***Verfolgung des Produktionsprozesses****, gegebenenfalls mit zusätzlichen Zwischenprüfungen, bewährt. Eine weitere Möglichkeit ist die* ***versuchstechnische Reproduktion der Schäden****. Das sollte möglichst im originalen Fertigungsablauf erfolgen.*

„B5“: *Dass die verdächtigen Fertigungsschritte so lange gestoppt werden bis die Ursachenfindung befriedigend abgeschlossen ist und Abhilfemaßnahmen eingeführt sind, erscheint selbstverständlich. Zwänge der Praxis wie Liefertermine und Kosten können diese Vorgehensweise deutlich erschweren. Voraussetzung für ein erneutes Anlaufen der Produktion ist, dass zumindest der zeitlich erste für die Rissbildung ursächliche Einfluss bekannt und eliminiert ist.*

„B6“: *Die Definition gezielter Abhilfen setzt das* ***ausreichend sichere Verständnis des Mechanismus der Rissentstehung und der daran beteiligten ursächlichen Einflüsse*** *voraus („B1“). Nachdem die Abhilfemaßnahmen eingeleitet wurden ist deren* ***Wirksamkeit****, zumindest für das erste folgende Serienlos, zu* ***verifizieren****. Dies sollte vorteilhaft, über die Prüffolgen der Serie hinaus,* ***nach jedem Prozessschritt*** *erfolgen. Erst wenn sich die Abhilfen als wirksam erwiesen haben, sollte wieder auf Serienbedürfnisse zurückgegangen werden.*

„B7“ *und* ***„B8“:*** *Neben der direkten Vermeidung von Rissen mit Abhilfemaßnahmen stellt sich die Frage, ob bereits rissbehaftete* ***Bauteile zur Auslieferung*** *gelangten. Lässt sich das nicht ausreichend sicher ausschließen, sind die Risiken abzuschätzen. Hierzu gehört die Ermittlung der eventuell betroffenen Bauteile nach Zahl und Identifikation (z.B. Seriennummern) und deren Standort bzw. Endabnehmer.*
Die Beeinflussung des Betriebsverhaltens potenziell fehlerhafter Bauteile ist ein wichtiges Sicherheitsrisiko- und Entscheidungsmerkmal. Um dies abzuschätzen ist es notwendig, rechtzeitig die zuständigen

- Fachabteilungen (z.B. Festigkeit),
- Sicherheitsgremien,
- Dienststellen und Behörden,
- Lizenzgeber und Kunden,

zu ***informieren und einzubinden****. Hier müssen auch weitere eventuell notwendige Maßnahmen (z.B. Überwachung verbauter Bauteile) erarbeitet und beschlossen werden. In den oben genannten Gremien ist auch über eventuelle Nacharbeiten (Kapitel 17.5) betroffener Bauteile zu entscheiden.*

© KOPPmann - Tribocontact
Lizenz unter Creative Commons

„B9“ *und* ***„B10“****: Die Frage nach einer eventuellen* ***Nacharbeit*** *(Bild 17.5-1) stellt sich erfahrungsgemäß dann, wenn wichtige Zwänge (Liefertermine, Kosten) bei einem akzeptierten Risiko vorliegen (Bild 15-11). Dies ist von den zuständigen Stellen („B7“) zu prüfen. Selbstverständlich gilt für eine Nacharbeit auch der Unbedenklichkeitsnachweis, gegebenenfalls mit einer Erprobung unter Serienbedingungen und entsprechende Optimierung, sowie Festschreibung.*

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 18.7

18.7-1 L.Engel, H.Klingele, „An Atlas of Metal Damage“, Wolf Publishing Ltd, 1981, ISBN 0 7234 0750 9.

18.7-2 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 104

18.7-3 ASM Handbook Volume 5, „Surface Engineering“, ISBN 0-87170-377-7, 1999, Seite 144.

18.7-4 Department for Transport, AAIB Bulletin No.: 4/97 Ref: EW/C96/11/1 „Severe internal damage to No 2 engine“, 1996, Seite 1-5.

18.7-5 M. Field, J.F. Kahles, „Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke, ‘Surface Integrity’ “, Zeitschrift „Fertigung“, Ausgabe 5/72, Seite 145-156. (2121)

18.7-6 E.Schreiber, „Die Eigenspannungsausbildung beim Schleifen gehärteten Stahls“, Zeitschrift „Härterei-Technische Mitteilungen“, 28 (1973) Heft 3.

18.7-6 E.Schreiber, „Härterisse und Schleifrisse- Ursachen und Auswirkungen von Eigenspannungen“, Zeitschrift „ZwF“, 71 (1976) 10, Seite 460-465.

18.7-7 „Machining Titanium Alloys“, www.supraalloys.com/Machining_titanium.htm, 1.0.4.2004, Seite 1-12.

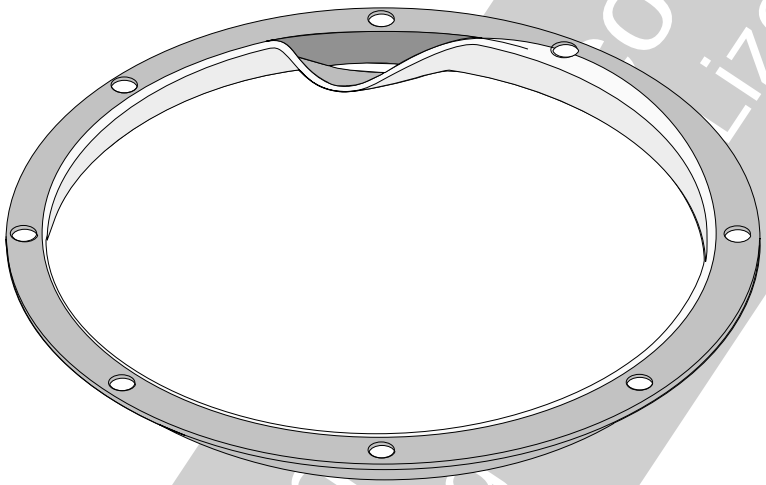
18.7-8 H.Simon, „Oberflächenreaktionen an Titanwerkstoffen“, Zeitschrift „Metall Oberfläche“ 5-1982, Seite 211-217. (437)

18.7-9 ASM Metals Handbook Ninth Edition „Volume 11 Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-377-7, 1986, Seite 95, 98-99, 249, 359, 664-666.

18.7-10 E.E.Affeldt, L.Cerdan de la Cruz, L.Peichl, „Influence of Aluminide Coatings on the Mechanical Behaviour of Aero Engine Turbine Components“, Vortrag auf dem Turbine Forum „Advanced Coatings for High Temperatures“, der „International Conference, Forum of Technology“, April 21st-23rd, 2004, Nice,/Port Laurent, France.

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.8 Haftfestigkeitsprobleme an Beschichtungen und Fügungen



Bauteile übernehmen immer mehr Funktionen. Turbinenschaufeln müssen neben ausreichender Lebensdauer (Kriechen, Thermoermüdung, Oxidation) bei extremen Gastemperaturen auch einen minimalen Spitzenspalt (Dichtwirkung) bei günstigem Anstreifverhalten und höchster LCF-Festigkeit im Fuß, garantieren. Um dem gerecht zu werden, kommen immer mehr Beschichtungen zum Einsatz. Damit erhält die Verbindung der Schicht zum Träger einen besonderen Stellenwert.

Zwei Begriffe charakterisieren diese Verbindung (Lit. 18.8-5). Die **Haftfähigkeit** bezeichnet die Qualität des Verbundes zwischen Grundwerkstoff und Schicht. Unter **Haftfestigkeit** wird ein Messwert in der Dimension einer Spannung bzw. Festigkeit verstanden. Sie wird mit einem Zugversuch an Proben ermittelt (Bild 18.8-5). Dagegen ist die Belastung einer Verbindung im Betrieb häufig nicht **Zug** sondern **Schub/Scherung und Schälung**. Insofern ist der an Zugproben ermittelte Festigkeitswert von eingeschränkter Aussagekraft für das Bauteilverhalten im Betrieb. Er dient eher als Qualitätsmerkmal, denn als Auslegungskennwert.

Systeme, deren Haftfestigkeit eine entscheidende Auswirkung auf das Schadensrisiko im Betrieb hat, sind in erster Linie **Beschichtungen**. Es handelt sich meist um thermische Spritzschichten, galvanische Schichten und **Lacke** (Bild 18.8-1). Bei ungenügender Haftfestigkeit kann ein Versagen zu unzulässigen Veränderungen des Betriebsverhaltens des direkt betroffenen Bauteils (Primärschaden) führen. Oft haben jedoch Folgeschäden die gefährlichen Auswirkungen. Beispielsweise können abgeplatzte Partikel einer Labyrinthpanzerung einen Wälzlagerschaden auslösen.

In der Hauptsache wirken an der Haftfläche **Adhäsion als mechanische Verklammerung und Kohäsion in Form der Werkstofffestigkeit** kraftübertragend (Bild 18.8-2). Dazu kommen weitere Effekte wie **Eigenspannungen und Gasblasen** als Folge einer Wasserstoffdiffusion. Die Beeinflussung der Haftfestigkeit im Zusammenwirken dieser Eigenschaften und Effekte ist bis heute noch nicht vollständig verstanden (Lit. 18.8-2).

In der Fertigung wirkt eine Vielzahl von Einflüssen auf die Haftfestigkeit (Bild 18.8-3.1, -3.2 und 18.8-4.1,-4.2). Dabei handelt es sich nicht nur um Parameter des **Verbindungsprozesses** und der **Vorbehandlung**. Auch Einwirkungen wie beim Handling und eventueller Reinigungsverfahren nachdem die Verbindung hergestellt wurde, sind zu berücksichtigen.

© Axel Rossmann Consult als Schulungsunterlage Lizenz

Fertigung: Haftfestigkeitsprobleme

Typische Beispiele für ungenügende Haftfestigkeit von Beschichtungen und die Folgen.

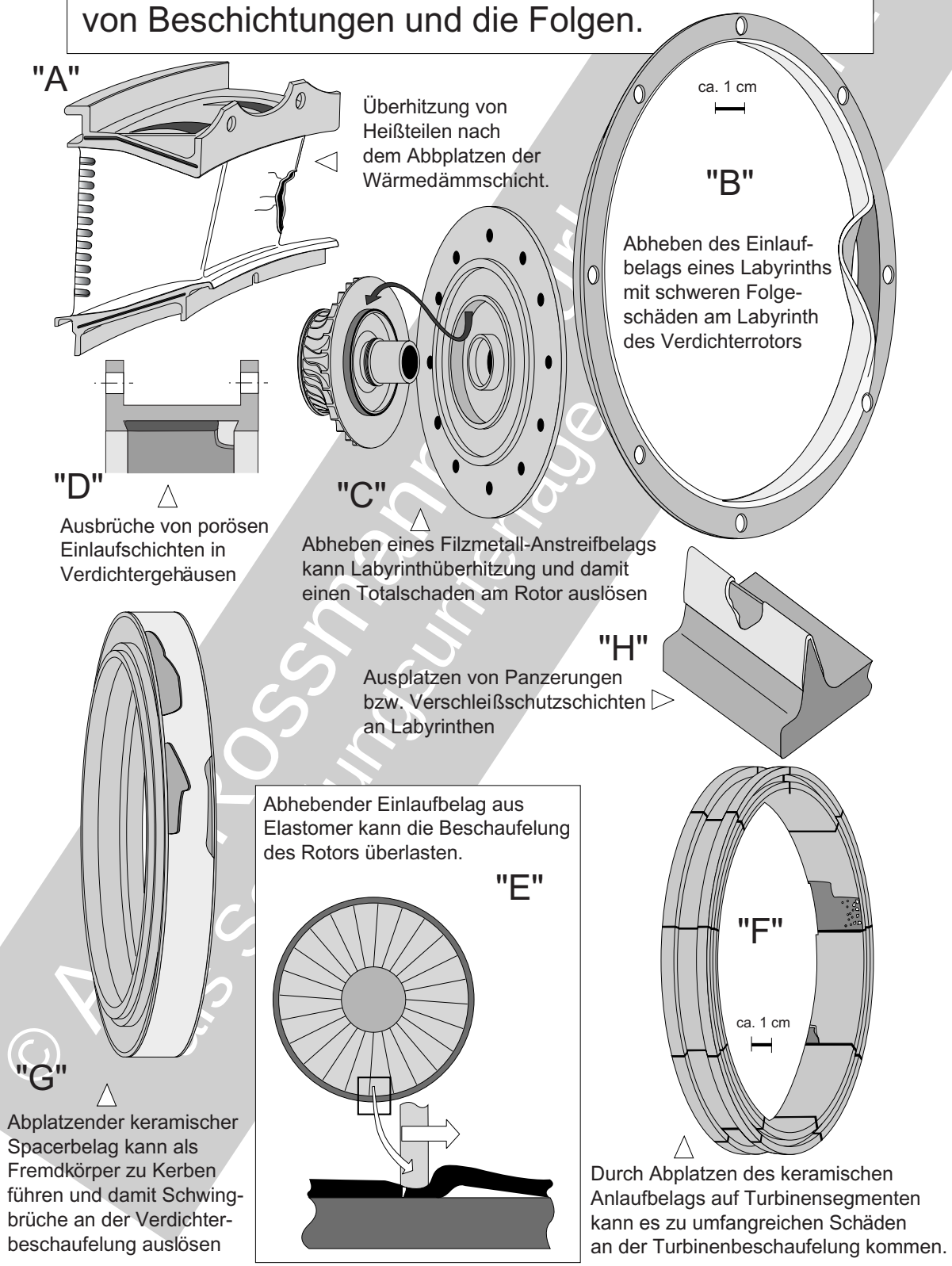


Bild 18.8-1

Bild 18.8-1: *In Triebwerken kommen* ***Beschichtungen,*** *deren Haftfestigkeit das notwendige Betriebsverhalten ermöglicht, in großer Zahl zum Einsatz. Ein* ***Versagen der Verbindung zum tragenden Grundmaterial (Substrat) birgt die Gefahr eines Ausfalls des Bauteils mit umfangreichen Folgeschäden*** *für andere Bauteile. Nachfolgend wird der Einfluss der Haftfähigkeit und Haftfestigkeit auf das Verhalten typischer Triebwerksbauteile und mögliche Auswirkungen behandelt:*

„A" Wärmedämmschichten: *Die lebensdauerbestimmende Größe ist die Haftfestigkeit. Diese wird von hohen Wärmespannungen zwischen metallischem Substrat und der keramischen Schicht beeinflusst.*
Wird die Haftfestigkeit der Beschichtungen und Verbindungen in die Festigkeitsauslegung des Bauteils einbezogen, ist mit besonders gravierenden Auswirkungen bei einem Versagen zu rechnen (Band 1, Bild 3.2-3).
Ist die Haftfestigkeit der Wärmedämmschicht einer Turbinenschaufel unzureichend, kommt es nach einem Ausplatzen der Beschichtung zu einem gefährlich verstärkten Wärmefluss vom Heißgas in das tragende Grundmaterial. Im Fall, dass die ***Schicht in die Auslegung des Bauteils*** *einging, kommt es zur schnellen,* ***kaum abfangbaren Zerstörung*** *des Bauteils.*

Einlaufschichten *bestehen bei älteren Triebwerkstypen oft aus* ***dichten Schichten weicher Metalle****. Beispiele sind Aluminium in Verdichtergehäusen und Silber in Labyrinthen in thermischer Spritztechnik oder als Lötschicht. In modernen Triebwerken kommen bevorzugt poröse, damit weiche* ***thermische Spritzschichten*** *(z.B. Ni-Grafit) und* ***aufgeklebte oder aufgelötete poröse Metallfilze*** *zum Einsatz.*

„B": *Bei den üblichen weichen metallischen* ***Lotschichten*** *aus Silber- oder Kupferlegierungen gibt es Benetzungsprobleme. Wärmespannungen zwischen dem Substrat (meist ein Stahl) und der Schicht begünstigen eine Ablösung an solchen Schwachstellen. Die Folge ist ein Aufwerfen der Schicht das vom Aufheizen eines Anstreifvorgangs beschleunigt wird. Eine Folge sind schwere Schäden im Rotorbereich (Band 3,. Bild 12.2.1.4-22).*

„C": Anstreifschichten aus Metallfilzen *werden in erster Linie als Beläge in Labyrinthdichtungen verwendet. Wegen ihrer Saugfähigkeit stellen sie erfahrungsgemäß ganz besondere Anforderungen an die Herstellung der Bindung zum Grundmaterial (Band 3, Bild 12.2.1.4-12). Sie werden als Klebeverbindung oder Lötung ausgeführt. Die sichere Haftung ist nur von einem bauteilspezifisch ausreichend erprobten und überwachten Prozess zu erwarten. Gelingt dies nicht, besteht die Gefahr einer Ablösung größerer Flächen oder des gesamten Belagrings mit katastrophalem Versagen des Labyrinths und umfangreichen Folgeschäden (Band 3, Bild 12.2.1.5-8).*

„D": Weiche, poröse thermische Spritzschichten *kommen bevorzugt in Gehäusen von Verdichtern zum Einsatz. An den Kanten nicht eingefasster Schichten ist das Beschädigungsrisiko besonders hoch, weil sie zum Ausplatzen neigen. Hochfrequente Schwingungen können bei nicht ausreichender Haftfestigkeit größere Ablösungen erzeugen.*
. ***Beschichtete Innen- und Außenkanten*** *sind als Ausgang von Ablösungen prädestiniert. Das liegt an den* ***erschwerten Spritzbedingungen*** *und damit schlechterer Schichtqualität und Haftung (Band 3, Bild 12.2.1.8.2-7).*

„E": Einlaufschichten aus Elastomeren *(meist gefüllter* ***Silikongummi****) werden im vorderen Verdichterbereich als Dichtfläche gegenüber Schaufelspitzen oder Zwischenstufenlabyrinthen genutzt. Sie werden in die metallischen Gehäuseringe bzw. Innendeckbänder der Leitapparate direkt eingegossen oder eingeklebt. Gerade der scheinbar einfache Eingießvorgang kann bei scheinbar kleinen Abweichungen im Prozess zu ungenügender Haftfestigkeit führen (siehe auch Band 3, Bild 12.2.1.5-3). Typische*

© Axel Rossmann - Turbopoint
Abschlussunterlagen mit Lizenz

Fertigung: Haftfestigkeitsprobleme

Probleme treten bei der Vorbehandlung der Substratfläche und Variationen der Prozessparameter auf. Umgebungsbedingungen wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu. Solche Fehler werden gewöhnlich erst im Betrieb bei einer ***Ablösung*** *bekannt. Reisst der Belag großflächig heraus, besteht die Gefahr einer Überlastung der Schaufeln.*

„F“: Keramische Wärmedämmschichten *schützen viele Heißteile wie Gehäusesegmente, Brennkammern und Beschaufelung (siehe „A“). Das spezifische Problem sind Wärmespannungen auf Grund Wärmedehnungsunterschieden zum metallischen Grundwerkstoff. Bricht die Schicht aus, besteht neben Überhitzungsgefahr für den Schichtträger auch die Möglichkeit einer Beschädigung anderer Bauteile. Das gilt besonders für Turbinenrotorschaufeln beim Auftreffen größerer abgeplatzter Schichtstücke. Kommt es zu plastischen Verformungen der Schaufelwand, kann das den inneren Kühlluftdurchfluss beeinträchtigen und eine örtliche Überhitzung auslösen. Im Bereich von Einschlägen in Diffusionsschichten die zum Oxidationsschutz dienen, können Risse entstehen die ihrerseits Folgeschäden (z.B. Schwingbrüche) auslösen.*

„G“: Keramische Schichten *wie Al-Oxid* ***auf rotierenden Zwischenringen (Spacer)*** *mit ungenügender Haftfestigkeit können unter der zyklischen Beanspruchung nach längeren Betriebszeiten zum Abplatzen neigen. Abfliegende Schichtstücke können eine filigrane Verdichterbeschaufelung gefährlich beschädigen. An den Einschlagkerben besteht die Gefahr von Schwingrissen mit Schaufelbrüchen.*

„H“: Keramische Panzerungen *werden an* ***Labyrinthspitzen*** *aufgebracht, um das Anstreifverhalten (geringere Wärmeentstehung und Wärmeeinleitung) zu verbessern. Ein Ausplatzen dieser Schicht, insbesondere bei einem Anstreifvorgang kann Warmrissbildung in den Labyrinthspitzen begünstigen (Band 2, Bild 6.10.3.1.2-9.2). Befindet sich das Labyrinth in einem ölführenden Bereich, z.B. einer Lagerkammer, besteht in Einzelfällen die Gefahr, dass harte Schichtpartikel in die Lager gelangen und dort Laufbahnschäden auslösen.*
Werden die abrasiv wirkenden Partikel im Wellensystem gefangen, können sie über längere Zeit umlaufen und Querschnitte gefährlich schwächen oder gar durchtrennen (Band 1, Bild 5.5.1.1-6).

Bild 12.2.2.8-2: *Die* ***Haftfestigkeit einer Beschichtung*** *bzw. Verbindung beruht auf dem Zusammenwirken verschiedener Mechanismen. Zunächst soll eine Begriffsbestimmung erfolgen:*

Haftfestigkeit: *Dieser üblicherweise in der Praxis verwendete Begriff sollte nur dann angewandt werden, wenn sich ein Messwert in der Dimension einer Spannung bzw. Festigkeit angeben lässt (Lit. 18.8-5, Bild 18.8-5).*
Ist dies nicht möglich, wird in der Literatur empfohlen von ***Haftfähigkeit*** *zu sprechen (Bild 18.8-6). Diese beschreibt* ***die Qualität des Verbundes*** *zwischen Beschichtung und Grundwerkstoff.*

Kohäsion *beschreibt die Kräfte auf Grund* ***chemischer Bindung*** *(nichtmetallischer Bindung). Sie ist für die Eigenfestigkeit des Werkstoffs verantwortlich. Die Kräfte wirken innerhalb des Werkstoffs. Klebstoffe nutzen die Kohäsion beim Aushärten mit der „Verfilzung“ langer Molekülketten (Lit 18.8-8).*

Adhäsion *ist das Haften an der Substratoberfläche auf Grund* ***chemischer Bindung****. Innerhalb eines Stoffes sind die Bindungskräfte zwischen den* ***Molekülen*** *ausgeglichen. Am Rand liegen dagegen Bindungen frei, die sich bei genügender Annäherung eines anderen Stoffs bemerkbar machen. Weil Adhäsionskräfte nur über sehr kleine Abstände wirksam wer-*

Fortsetzung auf Seite 18.8-6

© Axel Rossmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Haftfestigkeitsprobleme

Das Zusammenwirken aller Mechanismen der Haftfestigkeit ist bis heute nicht restlos geklärt. Trotzdem ist die Kenntnis der Effekte für das Verständnis und die Analyse von Problemen wichtig.

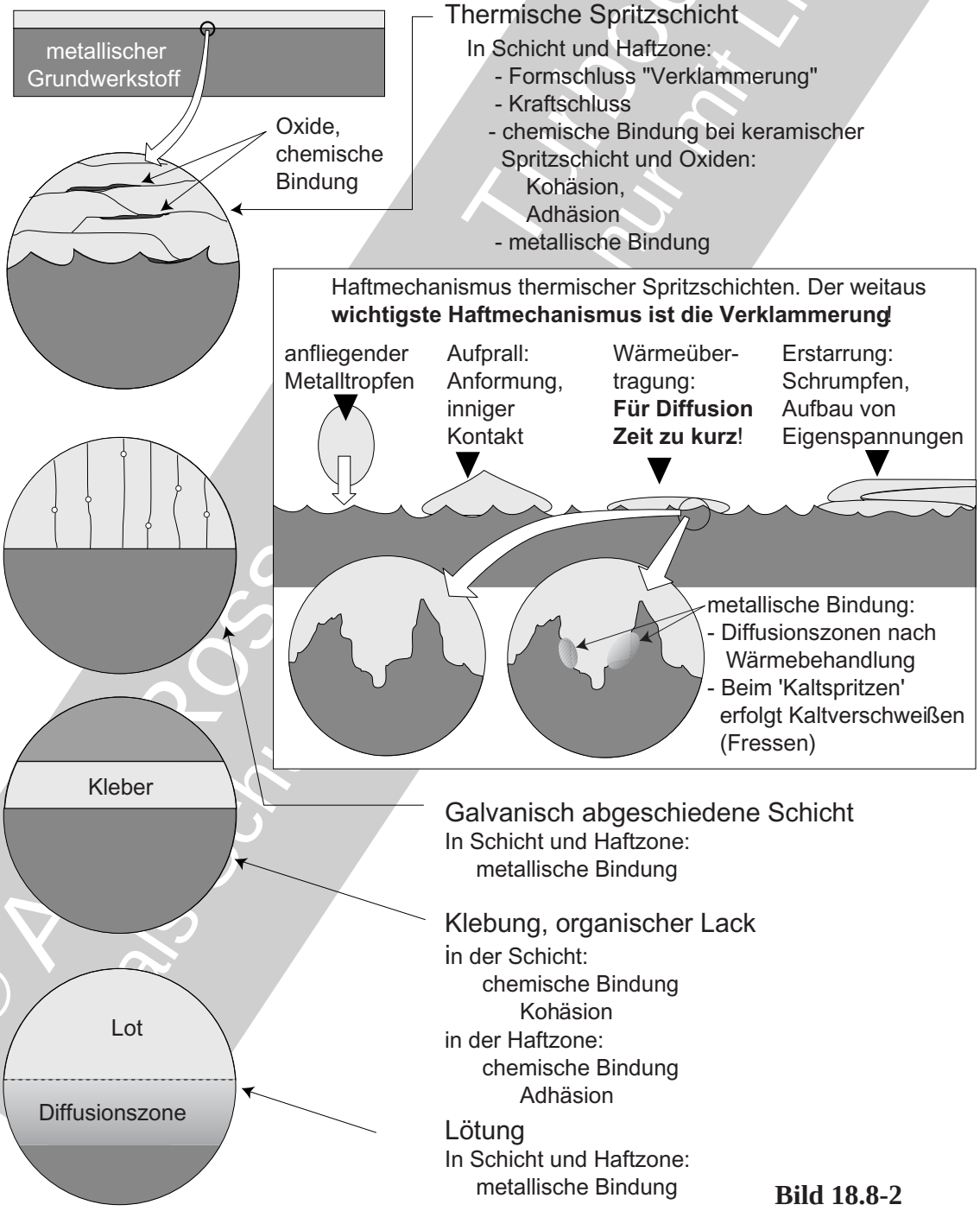


Bild 18.8-2

Fortsetzung von Seite 18.8-4

den, hat ein Kleber die Aufgabe, von der ***Rauigkeit*** *beeinflusste Abstände zu überbrücken. Dazu muss er möglichst gut* ***benetzen****.*

Chemische Bindungen *schließen Kohäsion und Adhäsion ein. Sie liegen auch bei Oxiden vor, aus denen z.B. keramische Wärmedämmschichten bestehen. Das gilt auch für Oxide die sich beim Flug durch die Atmosphäre um einen Metalltropfen bildeten und in die Spritzschicht eingebaut wurden, oder auf dem heißen Grundmaterial entstanden sind.*

Metallische Bindung *erfolgt über das Metallgitter. Sie entsteht im Zusammenhang mit metallischen Beschichtungen, Löten, Plattieren und Diffusionsvorgängen.*

„Verklammerung" der Rauigkeitsspitzen (Formschluss und Kraftschluss) *ist rein mechanisch. Ihr Beitrag zur Haftfestigkeit wird von Dehnungsunterschieden (Eigenspannungen) beeinflusst (Band 3, Bild 12.2.1.8.2-3.2). Spannungen in der Schicht bzw. dem verbundenen Querschnitt müssen über die Verbindung zum Grundwerkstoff (Substrat) eingeleitet werden. Je fester die Schicht, d.h. je größer die Kohäsion, umso größer sind die zur Haftfläche übertragbaren Spannungen. Diese müssen dort von Adhäsion, metallischer Bindung und mechanischer Verklammerung (Formschluss) aufgenommen werden.*
Weiche, elastische Übergangsschichten wie organische Kleber können mit ihrer Kohäsion Spannungsspitzen zwischen Schicht und Grundmaterial ausgleichen. Die kraftübertragenden Einflüsse wirken bei verschiedenen Beschichtungen und Verbindungsarten durchaus unterschiedlich.

Thermische Spritzschichten *(Detail oben): In der Schicht und der Haftzone sind, mit unterschiedlichem Anteil, alle Bindungsformen vertreten (siehe Rahmen, Lit. 18.8-4). Eine in Tiefe und Form optimale Rauigkeit verbessert die Haftfestigkeit. Dabei wirken Verklammerung und Adhäsion in der großen reaktiven Substratoberfläche.*

Galvanisch abgeschiedene Schichten*(zweites Detail von oben): Die Haftfestigkeit wird in erster Linie von metallischer Bindung innerhalb der Schicht und zum Grundmaterial bestimmt (Lit 18.8-5). Dies ist der Grund, warum diese Schichten im Gegensatz zu thermischen Spritzschichten,* ***auf glatten Flächen besser haften****. Häufig wirken in galvanischen Schichten hohe Zugeigenspannungen die von der guten Haftfestigkeit auf den Grundwerkstoff übertragen werden und zu einem Abfall der Schwingfestigkeit führen. Besonders Vergütungsstähle neigen zur* ***Aufnahme von Wasserstoff*** *während der Beschichtung oder der Vorbehandlung in einem Ätzbad. Nach der Beschichtung, vorzugsweise bei einer Erwärmung im Rahmen einer Entsprödung, kann der Wasserstoff ausdiffundieren. Unter dichten Schichten kann sich ein Wasserstoffdruck aufbauen, der die Haftfestigkeit der Schicht überwindet. Das führt bei dünnen, zähen Schichten (Silber, Kupfer, Nickel) zur Ablösung und Blasenbildung (siehe auch Band 3, Bild 12.2.1.6-10).*

Chemisch abgeschiedene Schichten: *Hierzu gehören stromlos abgeschiedene* ***Nickelschichten****. Neben Verfahrensparametern ist die Sauberkeit der zu beschichtenden Fläche für die Haftfestigkeit entscheidend (Lit. 18.8-10).*

Klebeverbindungen *(zweites Detail von unten) wirken über chemische Bindung. In der Kleberschicht wirkt Kohäsion, an den Haftflächen Adhäsion. Übersteigt die Kleberschicht eine optimale Dicke, kommt es zu einem Abfall der Haftfestigkeit. Dieser Effekt wird auch an Lötungen beobachtet (Band 3, Bild 12.2.1.4-3) und beruht auf der stützenden Wirkung des festeren und steiferen Grundwerkstoffs. Ein Anstieg der Rauigkeit, mit entsprechend vergrößerter reaktiver Haftfläche, lässt einen Anstieg der Haftfestigkeit erwarten. Klebeverbindungen sind gegenüber einer abschälenden*

© Axel Pößnecker - Technoconsult
Schulungsunterlagen Maschinenelemente

Fertigung: Haftfestigkeitsprobleme

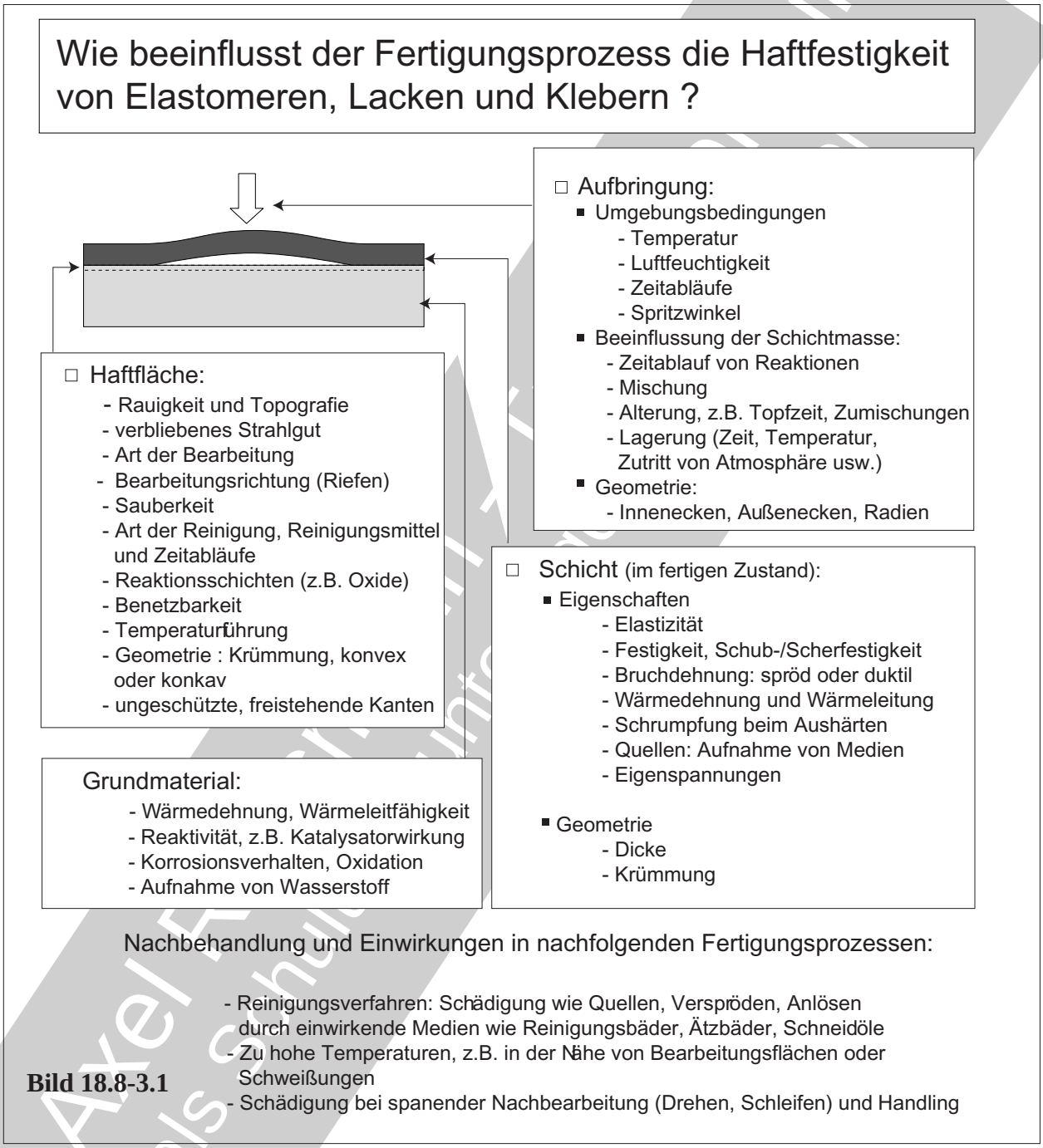


Bild 18.8-3.1

Belastung äußerst empfindlich (Band 3, Bild 12.2.1.5-6).

***Lötungen** (Detail unten): Die Haftfestigkeit ergibt sich durch die metallische Bindung, bei der Diffusion eine wichtige Rolle spielt. Auch hier ist die Festigkeit der Verbindung dünner Schichten besser (Band 3, Bild 12.2.1.4-3). Sie steigt mit der Grundmaterialfestigkeit der verlöteten Teile. Ähnlich wie Klebeverbindungen sind Lötungen gegenüber einer Abschälung (genutzt beim „Fischbüchsendeckel“) wenig belastbar (Band 3, Bild 12.2.1.4-18).*

***Bild 18.8-3.1** und **Bild 18.8-3.2:** Der **Fertigungsprozess beeinflusst auf sehr vielfältige Weise die Haftfestigkeit organischer Schichten** und Verbindungen. Dafür gibt die Darstellung einen Überblick ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Die Einflüsse lassen sich vier Gruppen zuordnen:*

Haftfläche: *Weil die Haftfestigkeit organischer Werkstoffe gegenüber Metallen in der Hauptsache auf Adhäsion beruht, spielt alles was die reaktive Fläche beeinflusst eine besondere Rolle. Hierzu gehören Rauigkeit, Topografie, Sauberkeit, Reaktionsschichten und Benetzung. Kontrollierte Zeitabläufe müssen verhindern, dass Einflüsse wie Korrosion oder Oxidation das Ergebnis negativ beeinflussen. Um einen möglichst gut haftenden chemischen Zustand der Oberfläche zu erzielen, kann diese vor der Beschichtung geeignet vorbehandelt werden. Üblich ist das Aufbringen eines* ***Primers****.*
Die ***Temperaturführung*** *muss eine ausreichend niedrige Viskosität zum Auffüllen der Rauigkeit und die Festigkeit bei Aushärtungsvorgängen gewährleisten.*
Die ***Krümmung der Haftfläche*** *kann abhängig von Zug- oder Druckeigenspannungen als Folge von Schrumpf- oder Quellvorgängen in der Schicht die Haftfestigkeit beeinflussen. Besonders empfindlich sind* ***ungeschützte Kanten*** *an denen ein* ***Schälvorgang*** *auftritt und die Haftfestigkeit mit einem Zutritt von Umgebungsmedien (Kraftstoff, Öl, Reinigungsmittel, Wasser) vermindert wird.*

Grundmaterial: *Als Träger der Haftfläche hat das Grundmaterial einen wichtigen Einfluss auf die erzielbare Haftfestigkeit. Der niedrige E-Modul organischer Schichten lässt nur deutlich niedrigere Eigenspannungen entstehen als das bei keramischen Beschichtungen der Fall ist. Von größerer Bedeutung dürfte dagegen die Wärmeleitfähigkeit sein. Sie beeinflusst über Wärmezu- oder -abfuhr die Temperatur, die Viskosität und die Aushärtungsvorgänge.*
Reagiert der Grundwerkstoff mit der Beschichtung oder beeinflusst er die chemischen Abläufe in der Beschichtung ist die Haftfestigkeit betroffen. Oxidieren oder korrodieren Werkstoffe vor dem Beschichten, ist sofort oder über längere Zeiträume (z.B. Unterkorrosion) mit einem Abfall der Haftfestigkeit zu rechnen.

Aufbringung: *Dieser Prozess reagiert bei organischen Beschichtungen* ***äußerst sensibel auf die Umgebungsbedingungen*** *(Band 3, Bild 12.2.1.5-3). Scheinbar kleine Änderungen in Temperatur und Luftfeuchte können die Haftfestigkeit unerwartet stark beeinflussen. Prozessparameter wie Zeitabläufe oder die Art des Auftrags können ebenfalls für das Endergebnis entscheidend sein. Umgebungsbedingungen wirken sowohl auf die Haftfläche als auch auf den Schichtwerkstoff vor dem und beim Aufbringen. Beispielsweise kann eine zu hohe Luftfeuchte auf der Haftfläche als dünner Wasserfilm kondensieren. Wasseraufnahme kann die Viskosität und Aushärtungseigenschaften von Kunstharz verändern und so die Haftfestigkeit beeinflussen.*
Nicht zu unterschätzen sind Auswirkungen auf die Beschichtungsmasse vor dem Aufbringen. Das beginnt mit einer Lagerung über das Ablaufdatum hinaus oder in aufgebrochenen, nur ungenügend gegen Atmosphärenzutritt verschlossenen Behältern. Die Zumischung von Resten aus teilweise gefüllten Behältern ist erfahrungsgemäß problematisch, weil die Atmosphäre einwirken kann. Selbstverständlich sind spezifizierte Lagerungsbedingungen wie die Temperatur (z.B. in einer Kühltruhe) einzuhalten. Stromausfälle mit zwischenzeitlicher Erwärmung können sich sehr negativ auswirken.
Ein vorgeschriebener, meist intensiver Mischvorgang vor der Verarbeitung der Schichtmasse ist genauestens einzuhalten. Von ihm hängt die mit einer Aushärtung erreichbare Schicht- und Haftfestigkeit ab. Mehrkomponentensysteme erfordern die exakte Einhaltung der Mischungsverhältnisse als Voraussetzung einer optimalen Haftfestigkeit.

Schicht *im fertigen Zustand:* ***Physikalische und chemische Eigenschaften bestimmen in hohem Maße die Haftfestigkeit*** *der Schicht (Bild 18.8-3.1). Übertragbare Kräfte bzw. Spannungen und damit die Beanspruchung der Haftzone sind von Schichtfestigkeit, Elastizi-*

© Kersten - TU Dresden
Nur zur Ausbildungsunterlage nicht zur Lizenz

tät und Bruchdehnung abhängig. Je höher die Wärmedehnung der Schicht gegenüber dem Substrat und je steifer die Schicht, umso höhere Eigenspannungen sind möglich. Spröde oder von Medien und/oder zu hohen Temperaturen versprödete Schichten neigen zur Rissbildung und Ablösung.

Schrumpfen oder Quellen der Schicht induziert Eigenspannungen. Solche Medien sind beispielsweise ungeeignete Reinigungs- und Entfettungsbäder oder Konservierungsöl. Gleichzeitig wird die Haftfestigkeit der Schichtfestigkeit bis zum Abheben abgebaut.

Auch die ***Bauteilkontur****, der die Schicht folgen muss, beeinflusst die Haftfestigkeit (Bild 18.8-3.2). Wie sich das auswirkt, hängt von Eigenspannungen und den bereits diskutierten Schichteigenschaften ab. Je schärfer die Krümmung bzw. die Außenkante, umso eher dürften Druckeigenspannungen zum Abheben führen (Bild 18.8-4.3). Andererseits wird die Haftfestigkeit an Innenkanten von Zugeigenspannungen geschwächt. Kanten beeinflussen auch die Schichtdicke von Lackierungen. Ohne besondere Maßnahmen ist im Kantenbereich mit dünneren Lackschichten zu rechnen.*

Der Vollständigkeit sei hier erwähnt, dass spröde Schichten wie keramische Spritzschichten (Wärmedämmschichten) ein ähnliches Verhalten zeigen (Bild 18.8-4.1). Bei Druckspannungen neigen sie dazu an Außenkanten abzuheben. An Innenkanten ist aus technologischen Gründen mit schlechter Haftfestigkeit und Schichtfehlern zu rechnen (Bild 12.2.1.8.2-7). Galvanische Schichten bauen auf Grund des elektrischen Felds an Außenkanten, im Gegensatz zu Lacken, stark auf (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-5). An Innenkanten ist dagegen mit einer deutlich dünneren Schicht, im Extremfall keine Beschichtung zu erwarten.

Die Haftfestigkeit eines Belags hängt auch von der Geometrie der Beschichtungsfläche ab. Hier als Beispiel eine elastomere Schicht.

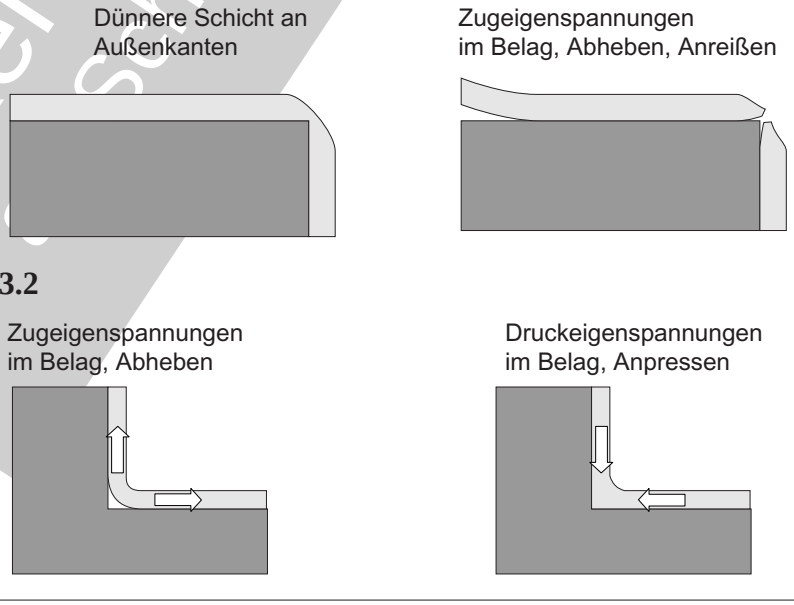
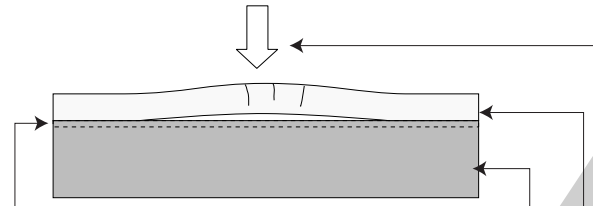


Bild 18.8-3.2

© Axel Grießmann - TU Dresden, Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung, Professur Maschinenelemente - Nur zur Verwendung mit Lizenz

Was beeinflusst die Haftfestigkeit im Fertigungsprozess von thermischen Spritzschichten?



□ Aufbringung:
- Umgebungsbedingungen
  - Sauerstoffzutritt
  - Staubentstehung und Ablagerung
  - Verfahren
  - Spritzparameter
- Schicht:
  - Temperaturführung, Vorheizung
  - Zahl der Durchläufe
  - Spritzpulvereigenschaften

□ Haftfläche/Haftschicht:
- Rauigkeit und Topografie
- Sauberkeit
  - Spritzstaub (Abpraller)
  - verbliebenes Strahlgut (Beladung)
  - Ablagerungen (z.B. Öl, Fett)
- Reaktionsschichten (z.B. Oxide)
- Temperaturführung
- Geometrie : Krümmung, konvex oder konkav

□ Schicht (im fertigen Zustand):

Eigenschaften
- Elastizität
- Festigkeit, Schub-/Scherfestigkeit
- Bruchdehnung: spröd oder duktil
- Wärmedehnung
- Wärmeleitfähigkeit
- Eigenspannungen
- Porosität, Rissbildung (Segmentierung)
- Struktur: lamellar, kolumnar

Geometrie
- Dicke
- Krümmung

Grundmaterial:
- Wärmedehnung, Wärmeleitfähigkeit
- Reaktivität
- Korrosionsverhalten, Oxidation

Nachbehandlung und Einwirkungen in nachfolgenden Fertigungsprozessen:
- Ätzverfahren, z.B. Glukolsäure greift keramische Schichten an.
- Eindringen von ungeeigneten Hilfsstoffen in Porosität und/oder Risse.
- Überlastung bei einer Nachbearbeitung (z.B. Schleifen oder Drehen).
- Plastische Verformung durch Handling oder Spannkräfte.

Bild 18.8-4.1

Bild 18.8-4.1, - 4.2, - 4.3: *Die Haftfestigkeit thermischer Spritzschichten reagiert äußerst sensibel auf* ***Veränderungen im Beschichtungsprozess****. Die sehr unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften bzw. Festigkeit und Bruchzähigkeit wirken sich schichtspezifisch aus.*

Haftfläche *von Grundmaterial oder Haftschicht: Um besondere Eigenschaften der Haftfläche wie erhöhte Rauigkeit oder Oxidationsbeständigkeit zu erzielen, erhält das Grundmaterial eine sog. Haftschicht. Bei dieser handelt es sich meist ebenfalls um eine thermische Spritzschicht. Möglich sind aber auch andere Beschichtungstechniken wie Sintern eines anorganischen Schlickers.*

© Axel Schuhmacher, als Schuhmacher-Institut

Rauigkeit und Topografie sind wichtige Eigenschaften einer Haftfläche. Die Haftzugfestigkeit steigt gewöhnlich von einer Mindestrauigkeit näherungsweise linear mit der mittleren Rauigkeit „Ra“ an (Lit. 18.8-2). Die Topografie hat sich jedoch als aussagekräftiger herausgestellt. Der Effekt ist offenbar nicht nur auf eine mechanische Verklammerung, sondern auch auf die wirksame reaktive Haftfläche zurückzuführen.

*Ablagerungen wie eine „**Beladung**“ mit stecken gebliebenem Strahlgut, können einen großen Einfluss auf die Haftfestigkeit haben. Bei Spritzstaub handelt es sich um einen äußerst schädigenden und häufigen Einfluss auf die Haftfestigkeit thermischer Spritzschichten. Man spricht wegen der runden Partikel vom „**Kügelcheneffekt**“ (Band 3, Bild 12.2.1.8.2-4).*

Von einer reaktiven Haftfläche ist eine innige chemische und metallische Verbindung und damit eine gute Haftfestigkeit zu erwarten. Die Reaktivität kann sich jedoch auch negativ auswirken, wenn störende Oxidbeläge gebildet werden. Deshalb muss die Beschichtung gegebenenfalls in einer geeigneten Atmosphäre erfolgen (Schutzgas, Niederdruck).

Die Temperaturführung beeinflusst besonders die Haftfestigkeit spröder Schichten wie keramische Wärmedämmschichten. Dabei wirken Wärmespannungen und verbleibende Eigenspannungen.

Der Einfluss der Geometrie einer Beschichtungsfläche (Bild 18.8-4.3) ist nicht zu unterschätzen. Sie wirkt sich in mehrfacher Hinsicht aus: Besonders bei spröden Schichten unterstützen Druckspannungen an konvexen Radien ein Abheben. Zugspannungen führen eher zur Rissbildung durch die Schicht. Das kann ein Ausbrechen begünstigen. In konkaven Radien bzw. Innenkanten wird die Schicht von Druckspannungen eher angepresst. Es ist jedoch, wegen Verwirbelung des Spritzstrahls und Abprallern, mit einer schlechteren Schichtqualität und niedriger Haftfestigkeit zu rechnen (Bild 18.8-4.2).

***Grundmaterial** (ohne Haftschicht): Wärmedehnungen wirken sich bei thermischen Spritzschichten mit hohem E-Modul besonders auf die Haftfestigkeit aus. Sie beeinflussen mit Vorgaben an Wärmespannungen und Eigenspannungen den optimalen Temperaturverlauf beim Beschichtungsprozess. Die Reaktivität, zu der auch das Oxidations- und Korrosionsverhalten zählt, ist bei der Vorbehandlung der Haftfläche zu berücksichtigen. Damit ist eine eventuelle Zwischenlagerung von Bedeutung.*

***Aufbringung:** Die prinzipbedingten relativ hohen Prozesstemperaturen mit Thermogradien-*

Ein typisches Problem thermischer Spritzschichten ist eine schlechte Beschichtung in Innenecken

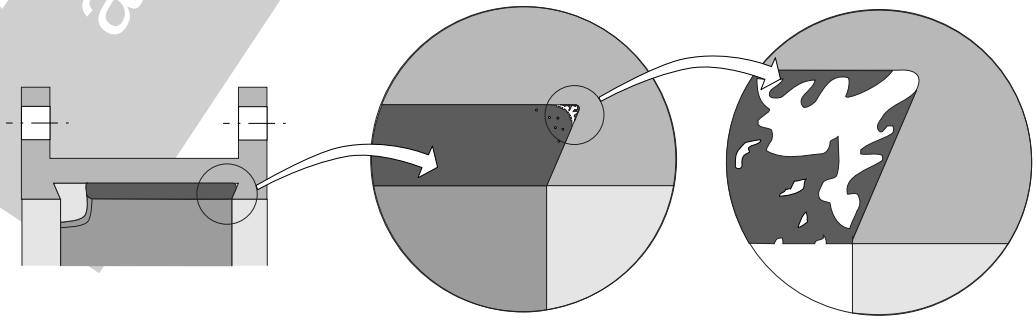


Bild 18.8-4.2

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

ten, Wärmespannungen und Oxidation wirken sich erschwerend aus, um eine gute Haftfestigkeit zu gewährleisten. Auf die ***Temperaturführung*** *in Schicht und Bauteil ist deshalb ein besonderes Augenmerk zu richten. Sie steht in engem Zusammenhang mit verfahrensspezifischen Spritzparametern wie* ***Vorwärmung*** *und Zahl der Durchläufe. Die Atmosphäre des Spritzprozesses muss Eigenschaften des Spritzpulvers und des Grundmaterials berücksichtigen. Gegebenenfalls ist Schutzgas oder Teilvakuum (z.B. Niederdruckplasmaspritzen) erforderlich. So ist unzulässige Oxidation der Spritzpartikel und der Haftschicht vermeidbar.*

Schicht *(in fertigem Zustand): Physikalische Schichteigenschaften wie Steifigkeit, Festigkeit, Bruchdehnung, Wärmedehnung und Wärmeleitfähigkeit bestimmen die Wärmespannungen. Diese bilden sich während der Beschichtung und induzieren Eigenspannungen nach der Beschichtung. Überschreiten sie die Festigkeit, kommt es bei Zugspannungen zur Rissbildung in Form der erwünschten* ***Segmentierung,*** *die Wärmedämmschichten gegen ein Abheben schützt. Druckspannungen begünstigen dagegen eine Rissbildung entlang der Haftfläche und damit ein Ausbrechen der Schicht.*
(Bild 18.8-4.3).

Die Oberflächenkontur hat einen wichtigen Einfluss auf die Auswirkung der Eigenspannungen auf die Haftfestigkeit einer Schicht.

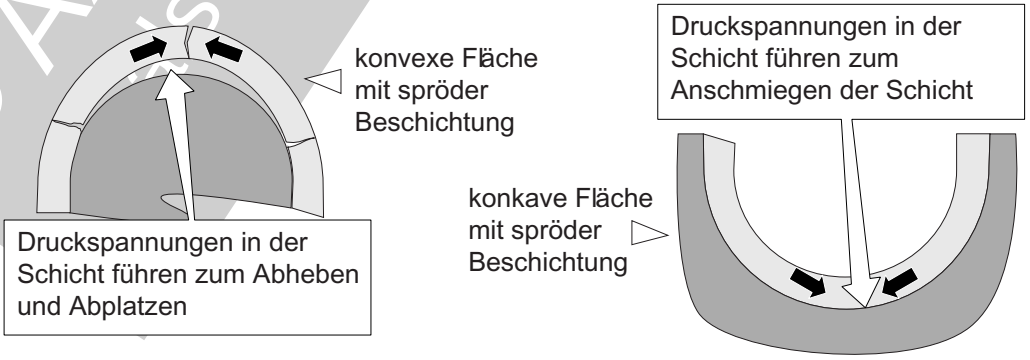


Bild 18.8-4.3

© Axel Rosshirn - Turboconsult
Diese Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Haftfestigkeitsprobleme

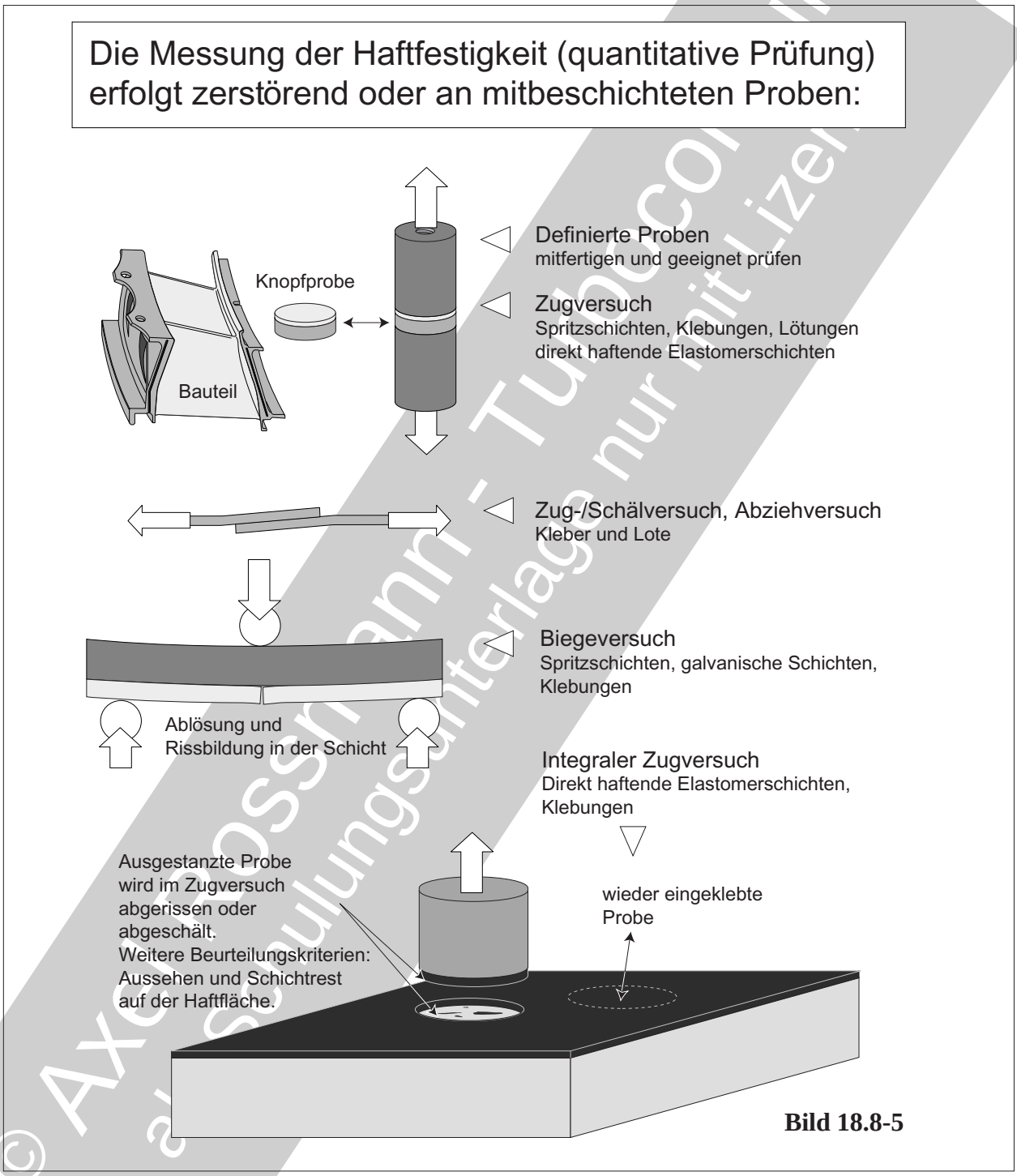


Bild 18.8-5

Bild 18.8-5: *Die hier dargestellten Versuche dienen zur* ***quantitativen Ermittlung der Haftfestigkeit****. Versagenskriterien sind Rissbildung und Ablösungserscheinungen in der Schicht. Es handelt sich meist um Probenversuche (obere drei Skizzen), bei denen die Beschichtung zerstört wird und nachträglich neu aufgetragen werden muss.*

Die unterste Skizze zeigt einen quasi zerstörungsfreien integralen Versuch bei dem ein freigeschnittenes Stück der Beschichtung abgezogen wird. Das abgerissene Stück kann bei ausreichender Haftfestigkeit wieder, falls eine geeignete Klebung zur Verfügung steht, eingeklebt werden.

© Axel Rossmann - Turbocomplt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Die Ermittlung der Haftfähigkeit (qualitative Prüfung) ist häufig nur indirekt und vergleichend möglich.

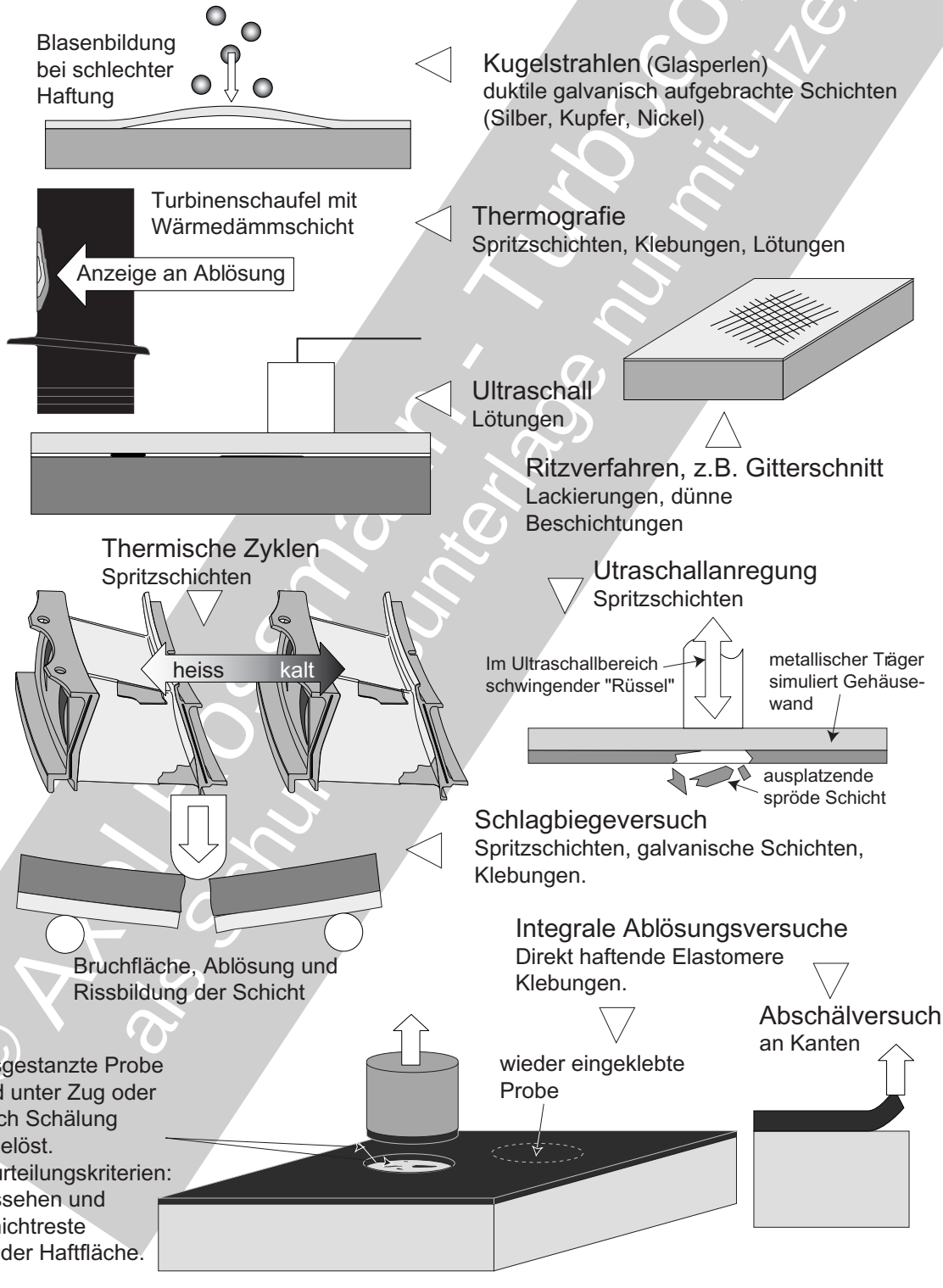


Bild 18.8-6

© Axel Hoffmann - Turbocomplt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Haftfestigkeitsprobleme

Bild 18.8-6: *Für die Haftfähigkeit gibt es eine Anzahl* ***Prüfmöglichkeiten****, d.h. ohne quantitativen Festigkeitswert. Deswegen ist Voraussetzung für eine Bewertung Erfahrung bzw. eine Vergleichsmöglichkeit.*
Mit ***Glasperlenstrahlen*** *lassen sich in duktile metallische Schichten Druckspannungen einbringen, die an örtlichen Haftungsmängeln Blasen aufwerfen (Skizze oben links, Band 3, Bild 12.2.1.6-10).*
Mit Hilfe der ***Thermografie*** *ist es möglich, die örtliche größere Erwärmung als Folge einer schlechteren Wärmeleitung in Bereichen von Ablösungen zu nutzen.*
Ultraschallverfahren *setzen geeignete Schichtwerkstoffe mit genügend Homogenität und ausreichender Dicke voraus. Im Bereich guter Haftung muss sich der Schalldurchgang von Schwachstellen unterscheiden, um etwas über die Qualität der Haftung aussagen zu können. Lötungen können diese Voraussetzung bieten.*
Mit ***Ritzverfahren****, wie dem* ***Gitterschnitt****, lassen sich Beschichtungen und Lackierungen, nicht aber die meisten thermischen Spritzschichten und Elastomere, prüfen. Kriterium sind Ablösungen in den freigeschnittenen Rauten der Schicht.*
Thermozyklen *werden vorzugsweise zur Qualitätsprüfung von Wärmedämmschichten an Heißteilen angewandt. Versagenkriterium sind Ablöseerscheinungen der Schicht. Kennwert ist die dabei erreichte Zyklenzahl. Diese Prüfung hat sich in der Verfahrensentwicklung und als Stichprobenprüfung in der Serienproduktion bewährt.*
Schlagbiegeversuche *an Proben mit zähen Beschichtungen (Lit. 18.8-5) ermöglichen mit einer Bewertung der Schichtbruchfläche, eventueller Rissbildung und Ablösungserscheinungen eine Aussage zum Haftverhalten.*
Ein Schichtstück dickerer Elastomerschichten lässt sich ***freischneiden und dann mit Schälung*** *ablösen. Der subjektive Widerstand gegen die Ablösung (Zug oder Schälung) lässt eine auf Erfahrung basierende Bewertung zu. Ein ähnlicher Versuch lässt sich auch an zugänglichen Schichtenden bzw. -kanten durchführen. Der Vorteil dieser Prüfung ist, dass die gelösten Bereiche später, nach einem befriedigenden Ergebnis, wieder verklebt werden können.*

Bild 12.2.2.8-7: *Es gibt Fertigungsprozesse wie die* ***Beschichtungstechnik*** *deren Produkte kaum seriengeeignet, befriedigend zerstörungsfrei prüfbar sind. In solchen Fällen bleibt zur Qualitätssicherung nur noch eine Überwachung und Dokumentation relevanter Prozessparameter. Diese müssen vorher in der Verfahrensentwicklung, ermittelt und festgeschrieben werden.*

Die Prozessüberwachung ist zwar gegenüber der direkten zerstörungsfreine Prüfung nur die "zweite Wahl", für die Absicherung der Haftfestigkeit aber häufig die Einzige.

→ Prozessüberwachung überprüft:

- Anwendung und Einhaltung ausreichend spezifizierte Parameter.
- Ermittlung und Dokumentation möglichst vieler relevanter Prozessparameter.

Bild 18.8-7

© Rossmann-Tutorconsult Schulungsunterlagen nur mit Lizenz

Literatur zu Kapitel 18.8

18.8-1 R.Dietrich „Fehlern auf der Spur, Haftungs- und Benetzungsstörungen an lackierten Bauteilen, “ Zeitschrift „Metalloberfläche“, 49 (1995) 3, Seite 190 und 191.

18.8-2 R.St. Siegmann, C.H.Brown,“Einfluss der Haftgrundvorbereitung auf die entstehende Topographie und Schichthaftung: Ein dreidimensionales Fraktalanalyse-Verfahren“ Proceedings des 2. GTV Kolloquium, Germany (2002), ISSN 1610-0530, Seite 1-11.

18.8-3 ASM Handbook „Volume 5, Surface Engineering“, Feb. 1999, ISBN 0-87170-377-7, Seite 497-509.

18.8-4 T. Grünbeck, „Thermisches Spritzen in der Luftfahrtindustrie“, IMW-Institutsmitteilung Nr.23 (1998), Seite 39-46.

18.8-5 M.Gugau, F.W.Hirth, H.Speckhardt, „Prüfung der Haftfähigkeit“, www.heid-metallveredelung.de, 02.11.04, Seite 1-4.

18.8-6 F.Bordeaux, R.G.Saint-Jacques, C.Moreau, S.Dallaire, J.Lu, „Thermal Shock Resistance of TiC Coatings Plasma-Sprayed on Macroroughened Substrates“, Proceedings of the 4th National Thermal Spray Conference, Pittsburgh, PA, USA, 4-10 May 1991, Seite 127-134.

18.8-7 H.A.Nied, „Edge Stress Concentrations in Layered Ceramic-Metal Composites Due to Thermal Mismatch“, Proceedings of the 4th National Thermal Spray Conference, Pittsburgh, PA, USA, 4-10 May 1991, Seite 315-322.

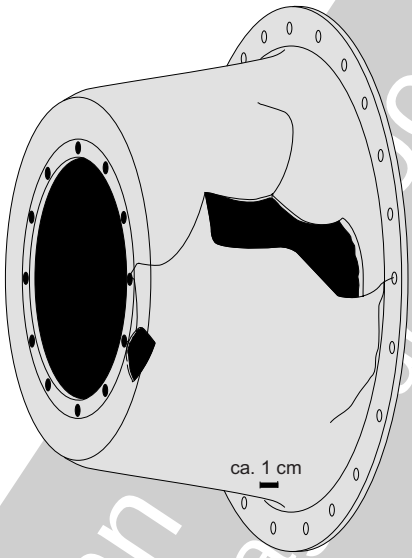
18.8-8 „Kleben, Definition “ www.konstruktionsatlas.de , 2.11.2004, Seite 1 und 2.

18.8-9 D.Münster, „Fehlern auf der Spur-Haftungs- und Benetzungsstörungen an lackierten Bauteilen “ Zeitschrift „Metalloberfläche“, Carl Hanser Verlag München, 49 (1995) 3, Seite 190 und 191.

18.8-10 K.Stallmann, F.W.Hirth, H.Speckhardt, ,,Außenstromlos abgeschiedene Nickel-schichten“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 38 (1984) 4, Seite 143 bis 150.

© Axel Rossmann - Turboconsult
Ausschnittsauflage nur mit Lizenz

18.9 Abweichungen von Maßen und der Bauteilgeometrie



© Axel Rossmann Ingenieurconsult mit Lizenz

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit **Ursachen und Auswirkungen von Maßabweichungen im Fertigungsprozess**, die auf **Sondereinflüsse bzw. Nebeneffekte** zurückzuführen sind. Weil solche Effekte nicht immer bekannt und/oder bewusst sind, werden sie hier zusammenfassend behandelt. Nicht behandelt werden Maßabweichungen, die auf Ungenauigkeiten maßgebender Abtragungsverfahren wie einer Zerspanung zurückzuführen sind. Die Entwicklungstendenz zu steigender Leistungskonzentration und besseren Wirkungsgraden der Triebwerke erfordert erfahrungsgemäß immer genauer gefertigte Bauteile. Scheinbar gegenläufige Tendenzen bestätigen bei genauerem Hinsehen diesen Trend. Die **aus Kostengründen notwendige Minimierung der Bauteilzahl führt gewöhnlich zu engeren Maßtoleranzen** um das gewünschte, anspruchsvollere Betriebsverhalten zu ermöglichen. Typische Beispiele findet man in modernen **Vedichtern**. Blätter mit großen Sehnenlängen („wide chord“) erhöhen das Gewicht der einzelnen Schaufel. Die extrem hohen Umfangsgeschwindigkeiten (Rotordrehzahlen) führen in modernen Verdichtern zu **Fußbelastungen** im technischen Grenzbereich. Dadurch erhält die reproduzierbare **Topografie der Kontaktzonen** einen besonderen Stellenwert. So muss eine optimale Verteilung der Flächenpressung durch Ansprüche an die Formtoleranz gewährleistet sein (Bild 18.9-4).

Ein weiteres Beispiel ist der Übergang von „gebauten“ Bauteilen wie Rotorscheiben mit eingeschobenen Schaufeln zu integralen Bauteilen wie **Blisks** (Bild 18.9-3 und Bild 18.9-12.1). Die fehlende Reibungsdämpfung im Fußbereich kann extreme Anforderungen an die Profilgenauigkeit der Schaufelblätter stellen, um eine akzeptable Schwingbelastung im Betrieb zu garantieren.

Heute stehen einer modernen Fertigungstechnik ausreichend Möglichkeiten zur Verfügung, auch extreme Forderungen nach Maßhaltigkeit zu erfüllen. Je höher diese sind, umso mehr dürfte tendenziell der Aufwand im Fertigungsprozess selbst und die Qualitätssicherungsmaßnahmen, d.h. die Kosten für das Endprodukt, dürften steigen. Um diesem Kostentrend entgegenzuwirken ist man gehalten, den Fertigungsaufwand auf das absolut notwendige Minimum zu beschränken. Man wird also versuchen, unnötig hohe Maßgenauigkeit zu vermeiden. Das Problem ist die Kenntnis aller für die Bauteilfunktion notwendigen Einflüsse und der dafür **notwendigen Toleranzen**.

Ein Beispiel zeigt die Skizze am Kapitelanfang. **Dünnwandige Strukturen** wie dieser **Labyrinthkegel oder Gasführungsteile** sind in Triebwerken gewöhnlich einer merklichen hochfrequenten

Schwinganregung ausgesetzt. Örtliche Abweichungen der Wandstärke treten bei Umformgängen wie Drücken und Tiefziehen auf. Sie können die Eigenfrequenz zu einer Resonanz hin verschieben und/oder den Spannungsausschlag bei einer geringeren Steifigkeit gefährlich erhöhen (Bild 18.9-2).

Steigende Gastemperaturen bei möglichst geringem Kühlluftverbrauch erfordern immer ausgeklügeltere Kühlkonfigurationen der Heißteile. So bekommt z.B. die Form der Kühlluftbohrungen für den Kühlluftschleier einen neuen Stellenwert. Rauigkeiten, Geometrieabweichungen und Grate bzw. Kantenrundungen sind für ein reproduzierbares Ergebnis genauestens zu beachten. Diese Forderungen gelten auch für die Luftzufuhr in Brennkammern deren niedrige Schadstoffemission an Bedeutung gewinnt. Auf Grund der hohen Festigkeitsauslastung der Bauteile (Spannungsniveau, Lebensdauer) ist ein allgemein im Maschinenbau gültiges Problem in der Triebwerkstechnik von besonderer Bedeutung. Die Betriebssicherheit vieler hochbelasteter Teile beruht auf Erfahrung bzw. Nachweisen in Entwicklung und Serie. Dies ist unvermeidlich und üblich, wenn die Belastung von einer Vielzahl zusammenwirkender Einflüsse abhängt. In einem solchen Fall lässt sich die Sicherheit einer Auslegung allein mit einer theoretischen Behandlung nicht befriedigen. Es ist auch nicht zulässig auf ähnliche Bauteile zu schließen. So können geometrisch ähnliche Schaufeln verschiedener Stufen im Betrieb sehr unterschiedlichen Schwingbelastungen unterliegen. Ein Beispiel ist die dynamische Beanspruchung von Verdichter- und Turbinenschaufeln für die nicht alle Resonanzen im Zusammenhang mit Anregungen durch Strömungsstörungen vermieden werden können. Hier bleibt das Prinzip „**the engine will tell us**“. Eine solche Vorgehensweise schließt natürlich nicht aus, dass manche Bauteile sicher aber unerkannt sehr dicht an ihrer Belastungsgrenze betrieben werden. **Kleine Maßänderungen können aber dann zu einem instabilen Zustand führen**, z.B. indem eine gefährliche Resonanz auftritt (Bild 18.9-1). Werden nach ausreichend langen Zeiträumen, etwa in der Größenordnung einer „Mitarbeitergeneration“, **Ersatzteile nachgefertigt,** können Fertigungsfeinheiten oder zumindest die Gründe dafür nicht mehr die genügende Aufmerksamkeit erfahren. Dies gilt gerade auch für eine **Lizenzfertigung**. Gewöhnlich kennt der Lizenznehmer die Hintergründe bestimmter Fertigungsbesonderheiten nicht. Diese Situation begünstigt unter **Kosten- und Termindruck** scheinbar nebensächliche „**Optimierungen**“ **des Fertigungsprozesses** die Maße und Toleranzen einschließen. Das kann im Betrieb Schäden wie Schwingermüdung begünstigen. Dieses Kapitel soll anhand typischer Beispiele die Sensibilität der Verantwortlichen gegenüber scheinbar sicher zu gewährleistender maßlicher Qualität erhöhen. **Voraussetzung für ein sicheres Betriebsverhalten ist, dass dafür wichtige Details und deren Auswirkungen bekannt und bewusst sind**. Eine weitere Problematik ist der **Verzug** von Bauteilen während oder nach dem Fertigungsprozess. Hier spielen **Eigenspannungen,** die vor (Schmieden Gießen) oder während des Fertigungsprozesses (z.B. Zerspanung) in das Bauteil eingebracht wurden eine dominierende Rolle. Es ist verständlich, dass Verformungen als Folge eines Spannungsabbaus im Betrieb (z.B. **Kriechen** bei erhöhter Temperatur) auch ein absolut maßhaltiges Bauteil unzulässig verändern können.

Bild 18.9-1 *(Beispiel 18.9-1): Nicht immer ist bekannt, wie nah ein Bauteil an seiner Festigkeitsgrenze betrieben wird.* ***Je höher die Auslastung der Festigkeit, umso gravierender können sich scheinbar kleine Maßabweichungen auswirken****. Im beschriebenen Fall kam es zu einer Häufung von Schwingbrüchen an Turbinenschaufeln, nachdem das Profil scheinbar unproblematisch* ***nachgearbeitet*** *wurde (siehe hierzu Bild 17.5-1).*

© Axel Possmann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Maße und Bauteilgeometrie

Eine scheinbar unerhebliche Maßabweichung kann die Wahrscheinlichkeit schwerer Schäden ansteigen lassen.

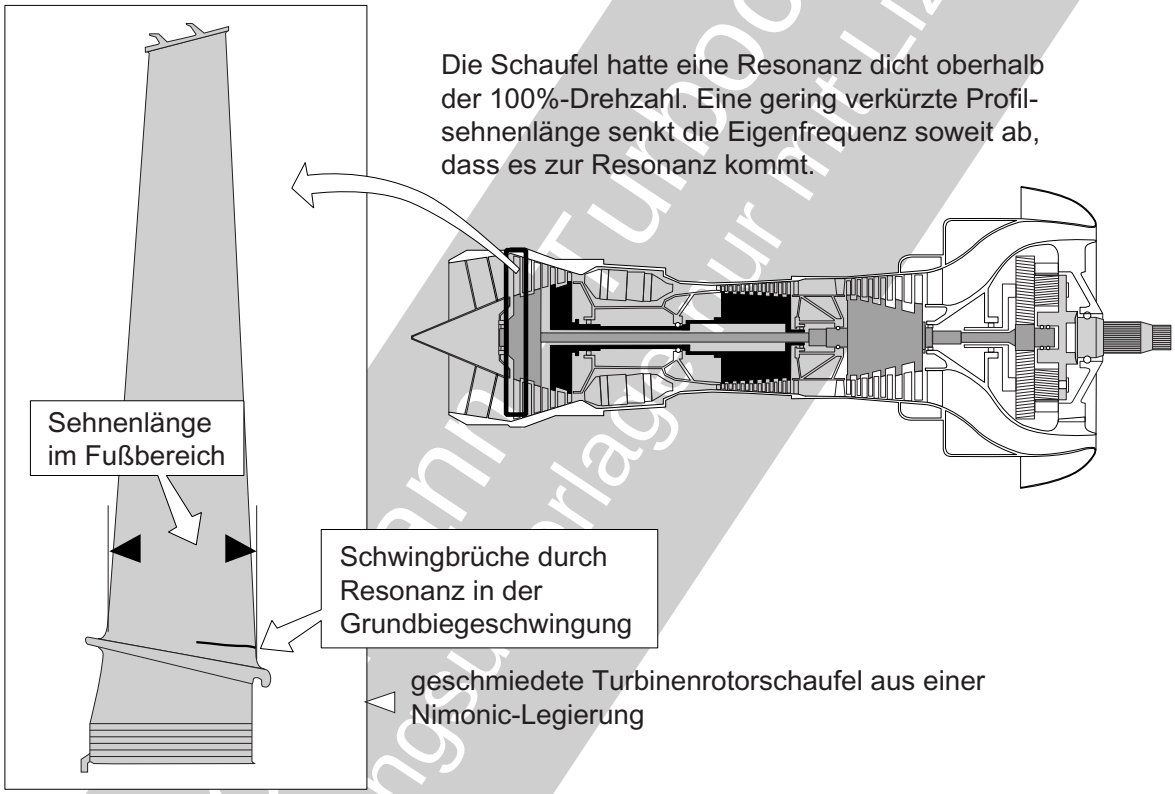


Bild 18.9-1

Beispiel 18.9-1: An den Rotorschaufeln der letzten Niederdruckturbinenstufe (Skizze links) traten **Schwingbrüche im Schaufelblatt** oberhalb der Fußplattform auf. Untersuchungen ergaben eine Resonanz der Grundbiegeschwingung zeichnungsgerechter Schaufeln dicht oberhalb der 100 % Drehzahl. Es handelte sich um einen älteren Triebwerkstyp (Skizze rechts) mit geschmiedeten Schaufeln. An einzelnen Schaufeln wich von der Rohteilherstellung **oder einer Nacharbeit das Profil im Bereich des Übergangs zur Fußplattform ab.** In diesen Fällen war die Sehnenlänge etwas verkürzt und die Austrittskante dünner. Das reichte für einen zwar geringfügigen aber gefährlichen Abfall der Eigenfrequenz aus. Es kam zu einer Häufung der Schaufelbrüche, als Schaufeln eine Generation später einer Nacharbeit unterzogen wurden, ohne dass das Risiko bewusst geblieben war. Dies erklärt, warum dem kritischen Profilmaß nicht die notwendige Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

© Axel Rothanne Turbocontrolt
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Merksatz: *Bei dünnwandigen, potenziell schwingbeanspruchten Bauteilen wie Gasführungen, Gehäuse und Dichtungsträger ist die auslegungsgemäße,* ***in der Zeichnung geforderte Wanddicke unbedingt einzuhalten****. Abweichungen erfordern die Konsultation der Fachabteilungen und gegebenenfalls eine Triebwerkserprobung.*

Bild 18.9-2: *Dünnwandige flächige Bauteile, wie sie insbesondere in älteren Triebwerkstypen zu finden sind, reagieren erfahrungsgemäß in ihrem* ***Schwingverhalten äußerst sensibel auf Wandstärkenabweichungen****. Dies hat mehrere Gründe, die in erster Linie mit der Veränderung der Wandsteifigkeit zusammenhängen.*
Eine dünnere Wand kann sich in doppelter Weise ungünstig auswirken (Rahmen unten):

- ***Abfall der Eigenfrequenz*** *und damit die Gefahr einer* ***Resonanz,*** *vor der Bauteile mit der Auslegungswandstärke sicher sind. Dieser Effekt wird von der gleichzeitigen Abnahme der schwingenden Masse, die einen Frequenzanstieg zur Folge hat, gewöhnlich nicht ausgeglichen.*

- ***Erhöhte Schwingbelastung*** *des schwächeren Querschnitts bei gleicher Anregungsintensität.*

Das Bild zeigt zwei typische Schadensfälle. Die Schadensuntersuchung ergab in beiden Fällen, dass die ***Wandstärke zumindest örtlich unterhalb der Zeichnungsforderung*** *lag.*

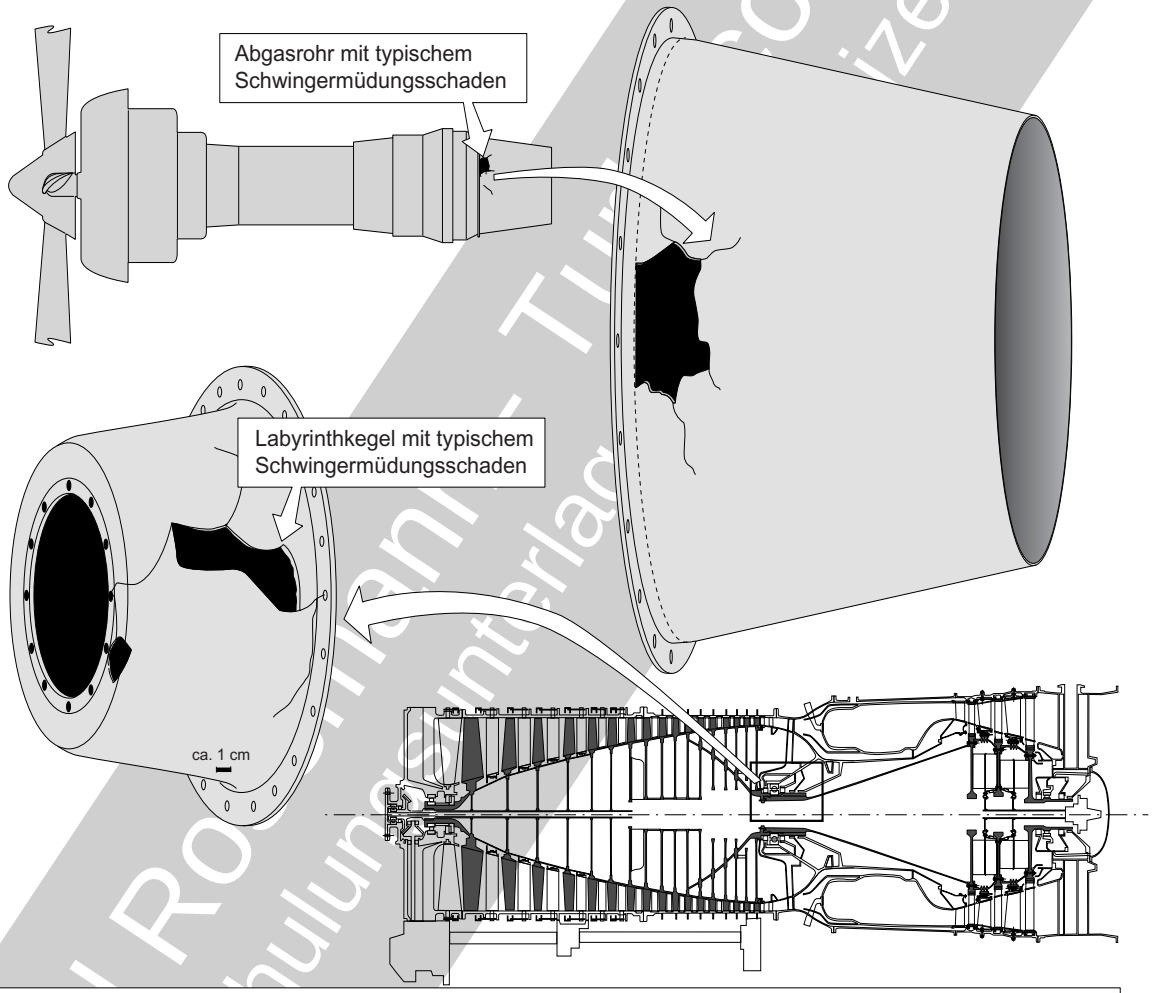
Fall 1: An einem Propellertriebwerk (Skizze oben) traten an einem dünnwandigen ***Blechkonus zur Abgasführung*** *flächige Ausbrüche auf. Es handelte sich um HCF-Schwingbrüche wie sie für für hochfrequente* ***Plattenschwingungen*** *typisch sind. Die Ursache dürfte eine* ***Blechdicke an der unteren Toleranzgrenze*** *gewesen sein, denn nur solche Teile zeigten die Schäden. Es kann also in kritischen Fällen selbst dann zu Betriebsschäden kommen wenn Zeichnungsforderungen eingehalten werden, die Grenzen aber offenbar in der Erprobung und im Serienbetrieb nie verifiziert wurden.*

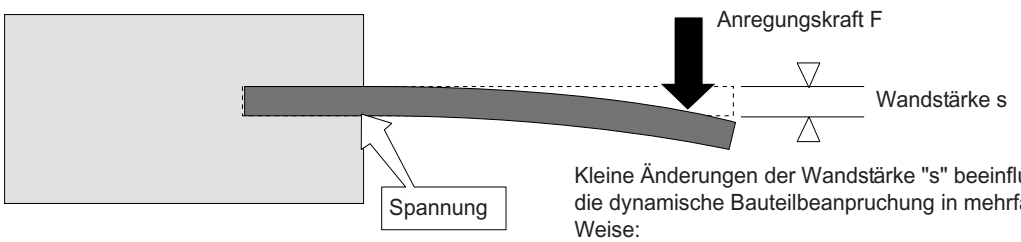
Fall 2: Statische ***Labyrinthkonen*** *der Lagerkammer eines Kampfflugzeugtriebwerks waren aus dünnwandigem Blech hergestellt. Sie zeigten in einigen Fällen im Betrieb flächige Ausbrüche (mittlere Skizze). Es handelte sich ebenfalls um HCF-Schwingbrüche mit dem für Plattenschwingungen typischen Schadensbild. Auch hier war die in der Zeichnung geforderte* ***Mindestblechdicke örtlich unterschritten*** *worden. Dies hing offensichtlich mit dem* ***Formgebungsprozess des Konus*** *zusammen.*

© Axel Rossmann - Tübingen Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Maße und Bauteilgeometrie

Wandstärkenabweichungen an Blechteilen beeinflussen das Schwingverhalten und so die Betriebssicherheit.





Einseitig eingespannter Biegeträger als Belastungsmodell für Biegeschwingungen

Kleine Änderungen der Wandstärke "s" beeinflussen die dynamische Bauteilbeanpruchung in mehrfacher Weise:

- Auslenkung bzw. Spannung im Blech bei gleicher Anregungskraft "F"
- Eigenfrequenzen und damit die Resonanzen

Bild 18.9-2

Bild 12.2.2.9-3: *Leistungskonzentration erhöhter Wirkungsgrad (Absenkung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs) und Kostenminimierung steigern die* ***Anforderungen an die Komponenten****. Typisch sind höhere mechanische Belastungen und/oder Forderungen nach optimalen Strömungseigenschaften und minimale Spaltverluste. Dies führt in den meisten Fällen tendenziell zu kleineren Maßtoleranzen. Typische Beispiele sind:*

Blisks: *Es handelt sich um integrale beschaufelte Scheiben (Skizze links). Solche Bauteile kennt man seit langem in Verdichtern und Turbinen von Triebwerken kleiner Leistung in Hubschraubern. Neuer ist die Anwendung in größeren Triebwerken bis zum Fan von Triebwerken für Kampfflugzeuge (Skizze oben rechts). Solche einstückigen Bauteile wie auch geschweißte Leitapparate (Bild 18.6-6) weisen keine Reibungsdämpfung auf, wie sie Rotoren mit eingesteckten Schaufeln haben. Damit treten hochfrequente Schwingungen noch mehr in den Vordergrund. Effekte wie das „****Mistuning****“ (Lit 12.2.2.9-4 und Lit. 12.2.2.9-5) erlangen große Bedeutung. Dieser Begriff bezeichnet die Verstimmung bzw. Veränderung der Eigenfrequenzen als Folge einer Streuung der Masse der einzelnen Schaufelblätter (Bild 12.2.2.9-12). Es können sich bereits Unterschiede innerhalb der üblichen Toleranzen bemerkbar machen. Sie führen zu Änderungen der Massenverteilung und Steifigkeit und so der davon beeinflussten Eigenfrequenzen.* ***Zufällige ungünstige Kombinationen*** *können in einzelnen benachbarten Schaufeln* ***mehrfach höhere Schwingspannungen*** *ermöglichen. Große Maßabweichungen außerhalb üblicher Toleranzen, z.B. gezielte Maßänderungen zwischen benachbarten Schaufeln, können dagegen für niedrigere Schwingbeanspruchung sorgen (Band 1, Bild 5.4.3.3-6).*

Verstellbare Verdichterleitschaufeln *(mittlere Skizze): Diese Systeme bestehen aus einer Vielzahl formschlüssig gefügter und/oder beweglicher Komponenten. Bereits Winkelungenauigkeiten der Schaufelblätter unter 1° (siehe hierzu auch Bild 18.9-5) können das Betriebsverhalten moderner Verdichter (z.B. Pumpgrenze und Wirkungsgrad) unzulässig beeinflussen. Die Lagerspiele müssen also über lange Laufzeiten äußerst genau eingehalten werden. Die Neuteilmaße sind dafür eine Voraussetzung.*

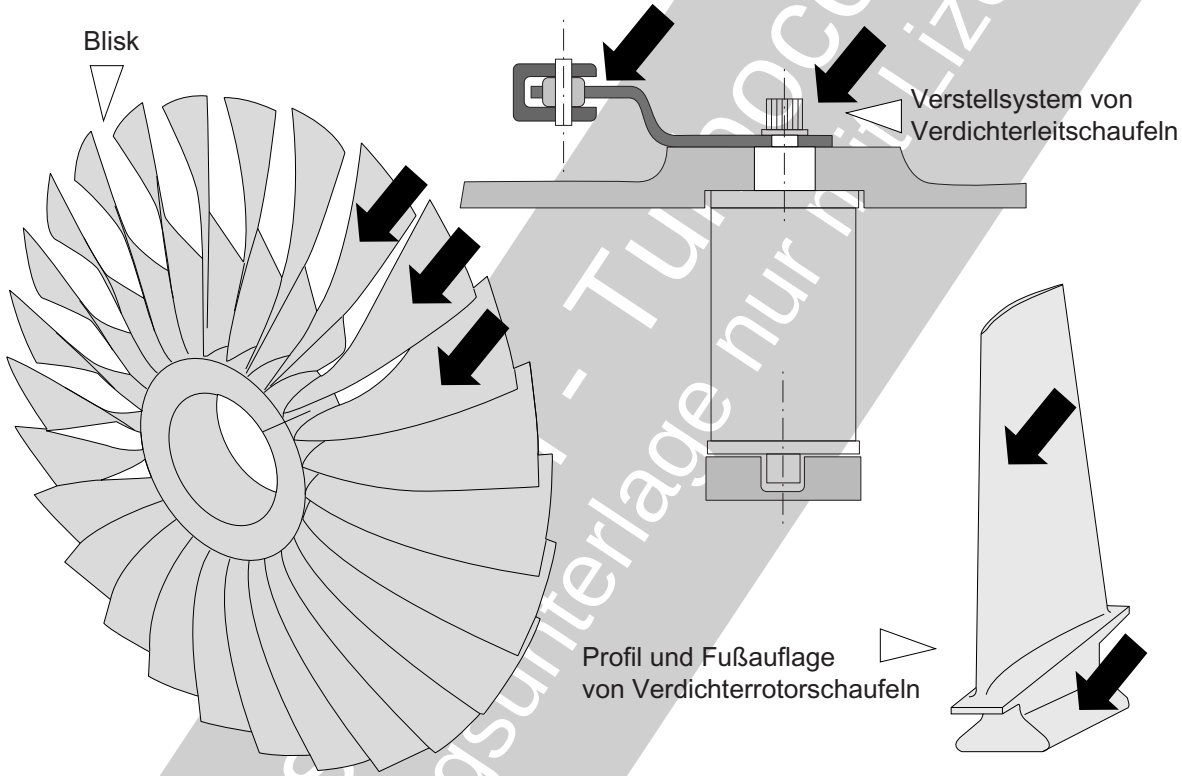
Rotorschaufel *(Skizze rechts): Profilabweichungen im Bereich der Vorderkante können Rotating Stall und damit gefährliche Schaufelschwingungen auslösen. Sind eine ausreichende Zahl Schaufeln betroffen, beeinflussen sie das Betriebsverhalten und den Wirkungsgrad des Verdichters unakzeptabel (Bild 18.9-5).*

Der ***Schaufelfuß*** *ist im Auflagebereich auf Grund der enormen Umfangsgeschwindigkeit moderner Verdichter im Grenzbereich der Schwingfestigkeit belastet. Dazu trägt die* ***Wide-Chord-Bauweise*** *(große Sehnenlänge) mit einem hohen Schaufelgewicht bei. Um örtliche Überlastungen im Kantenbereich und an den Übergängen der Auflageflächen zu vermeiden, erhalten diese eine optimale Formgebung. Diese berücksichtigt die elastischen Verformungen und sorgt so für eine günstig verteilte Flächenpressung (Bild 18.9-4). Das lässt sich nur mit sehr engen Formtoleranzen erreichen.*

© Aerospace Turbocon Consult
Alle Rechte vorbehalten - Unterlage nur mit Lizenz

Fertigung: Maße und Bauteilgeometrie

Besondere Anforderungen an die Maß- und Formgenauigkeit sind entscheidend für ein sicheres Betriebsverhalten.



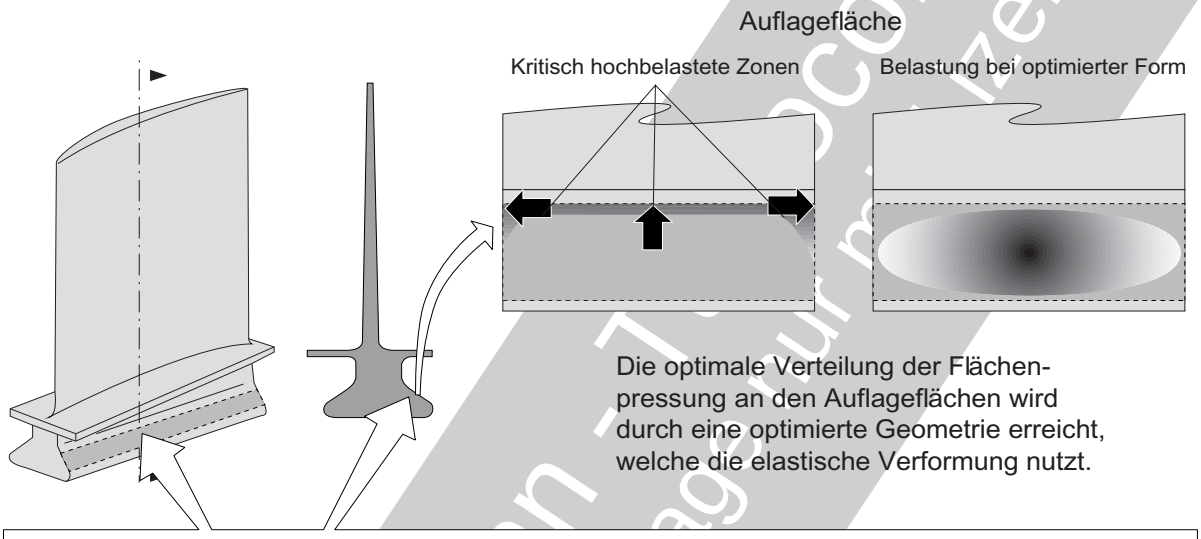
Durch maßlich ungünstige Kombinationen können sowohl die Betriebsbeanspruchungen als auch die Bauteilfunktion gefährlich beeinflusst werden.

Bauteil/Komponente	Belastungserhöhung / Funktionsbeeinflussung
Blisk	"Mistuning" mit ungünstiger Kombination von Toleranzen der Nachbarschaufeln führt zu mehrfacher Erhöhung der Schwingbelastung
Verstellsystem	Abweichungen des Anstellwinkels um Bruchteile von 1 ° führen zur Verschlechterung des Wirkungsgrads und erhöhter Schwingbeanspruchung
Verdichterrotorschaufel	Profilabweichungen begünstigen "Rotating Stall" mit Wirkungsgradeinbuße und erhöhter Schwingbeanspruchung. Kleine Form- und Maßungenauigkeiten an der Fußauflage begünstigen Spannungskonzentration und Frettingschädigung

Bild 18.9-3

© Arbeitsgemeinschaft - Turbocontrolt
Vorlesungsunterlage nur mit Lizenz

Die Forderungen an die Schaufelfüße moderner Verdichter liegen im Grenzbereich der Machbarkeit.



Bei der sehr hohen Flächenpressung und der hohen dynamischen Belastung der Schaufelauflageflächen in Verdichtern moderner Triebwerke sind engste Formtoleranzen für sphärisch gekrümmte Flächen einzuhalten. Auch Bearbeitungsverfahren wie Zerspanen und Kugelstrahlen unterliegen Forderungen im Grenzbereich der Realisierungsmöglichkeit.

Bild 18.9-4

Bild 18.9-4: *Die* ***Belastung der Schaufelfüße*** *steigt mit der Leistungskonzentration bzw. Umfangsgeschwindigkeit und schwereren Schaufeln (große Sehnenlänge, siehe auch Bild 18.9-3). Dies führt bei Verdichterrotorschaufeln aus Titanlegierungen an den Fußauflagen in Kombination mit einer „Frettingschädigung" (Reibverschleiß) zu einem erhöhten Risiko von Schwingbrüchen. Deshalb sind bei älteren Triebwerkstypen besondere Maßnahmen nicht notwendig um die Fußbelastung zu vergleichmäßigen. Wichtig ist, die Belastung an den Kanten und an den Übergängen der Kontaktflächen (mittlere Skizze) zu minimieren. Dazu erhalten die Auflageflächen der Schaufeln eine Form die elastische Verformungen bei Betriebskräften berücksichtigt. Typisch ist eine minimale Aufwölbung („****Bombierung****", Skizze rechts). Aufgabe der Fertigung ist es, diese dreidimensionale Form mit geringsten Toleranzen zu gewährleisten.*

Bild 18.9-5: *Forderungen nach Leistungssteigerung führten in den Verdichtern zu immer höheren Strömungsgeschwindigkeiten. Damit reagiert der Wirkungsgrad des Verdichters und so der Kraftstoffverbrauch des Triebwerks immer empfindlicher auf* ***Ungenauigkeiten*** *der Anströmung an der Eintrittskante (Diagramm, Lit 18.9-2). Selbst kleine Abweichungen (Detail oben Mitte und rechts) von der idealen Kantenform (Detail oben links) können sich unzulässig auswirken. Neben der Beeinflussung*

Die Beschaufelung eines Verdichters mit Überschallströmung erfordert eine weitaus höhere Form- und Maßgenauigkeit der Blattprofile als die der alten Triebwerkstypen.

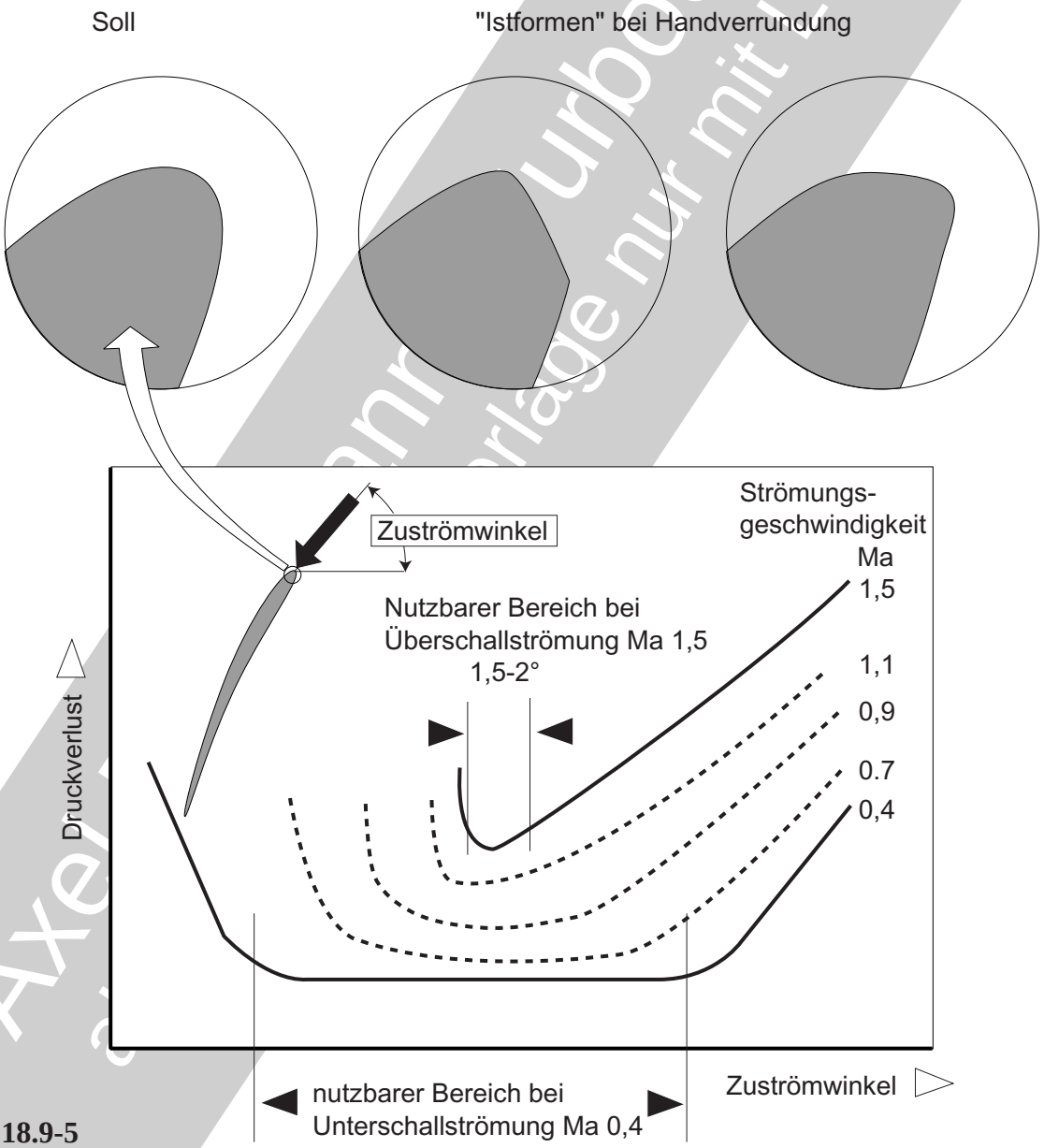


Bild 18.9-5

des Wirkungsgrades steigt mit einer ungünstigen Eintrittskantenform auch das Risiko eines „Rotating Stall" und damit einer Schwingüberlastung der Schaufel. Unter diesen Aspekten wird eine ***manuelle Kantenverrundung immer problematischer****.*

Die Geometrie einer Bohrung hat entscheidenden Einfluss auf den Strömungswiderstand.
Das beeinflusst merklich die Kühlung von Heißteilen.

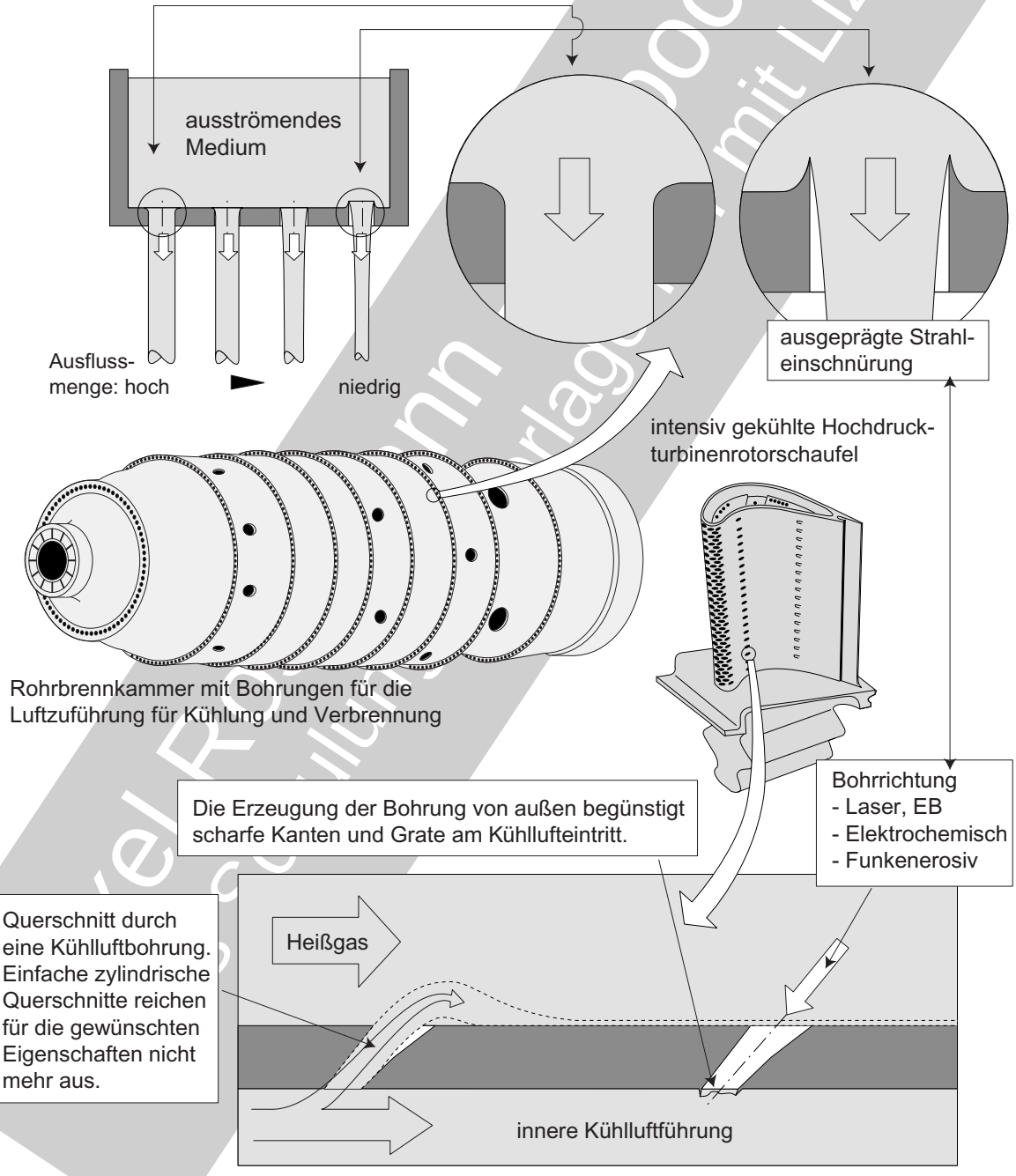


Bild 18.9-6

Bild 18.9-6: *Die Ansprüche an* ***Führung und Verteilung der Kühlluft von Heißteilen*** *wie Brennkammer und Turbinenbeschaufelung wachsen. Grund ist ein Anstieg der Gastemperatur, ein typischer Entwicklungstrend der Turbotriebwerke.*

Brennkammern *können in ihrem Betriebsverhalten äußerst sensibel auf Veränderungen der Verbrennungs- und Kühlluftzufuhr reagieren. Es darf angenommen werden, dass dies mit zunehmenden Forderungen an niedrige Schadstoffemissionen bei reduzierter Brennkammerlänge und höherem Energieumsatz weiter steigt. Die Luftzufuhr erfolgt für die verschiedenen* ***Kühlluftschleier*** *der inneren Brennkammerwand üblicherweise durch eine Vielzahl von Bohrungen (mittlere Skizze). Auch* ***scheinbar vernachlässigbare Änderungn am Bohrverfahren*** *können die Rauigkeit, Form und Kanten der Bohrungen unzulässig verändern. Erfahrungsgemäß ist dann das erforderliche Betriebsverhalten der Brennkammer nicht mehr gewährleistet.*

Neben der Kühlluftführung gewinnen Bohrungen für die ***Schleierkühlung der Blattoberfläche von Turbinenschaufeln*** *an Bedeutung. Neben einer optimalen Kühlluftzufuhr ist die Vermeidung einer* ***Verstopfung*** *von innen und/oder außen ein Kriterium. Der ursächliche Staub wird vom Heißgas und/oder der Kühlluft mitgeführt. Mit einer Optimierung der* ***Form der Kühlluftbohrung*** *lässt sich diese Gefahr reduzieren (Skizzen unten). Damit kommen weitere Forderungen an Form- und Maßtoleranzen auf die Fertigung zu.* ***Konische Bohrungen,*** *die mit Hilfe eines Lasers erzeugt werden, sind bereits Stand der Technik, wobei es offenbar noch Verbesserungspotenzial gibt.* ***Scharfe Kanten und Grate auf der Lufteintrittsseite*** *können den Durchfluss im Vergleich zu gerundeten Kanten (Skizzen oben) deutlich beeinträchtigen. Das ist der Fall, wenn die mögliche* ***Bohrungsrichtung*** *auf der* ***Lufteintrittsseite unerwünschte strömungsbehindernde scharfe Kanten und/oder Grate*** *entstehen lässt.*

©Axel Krassmann - Turboconsult
Abschlussunterlage nur mit Lizenz

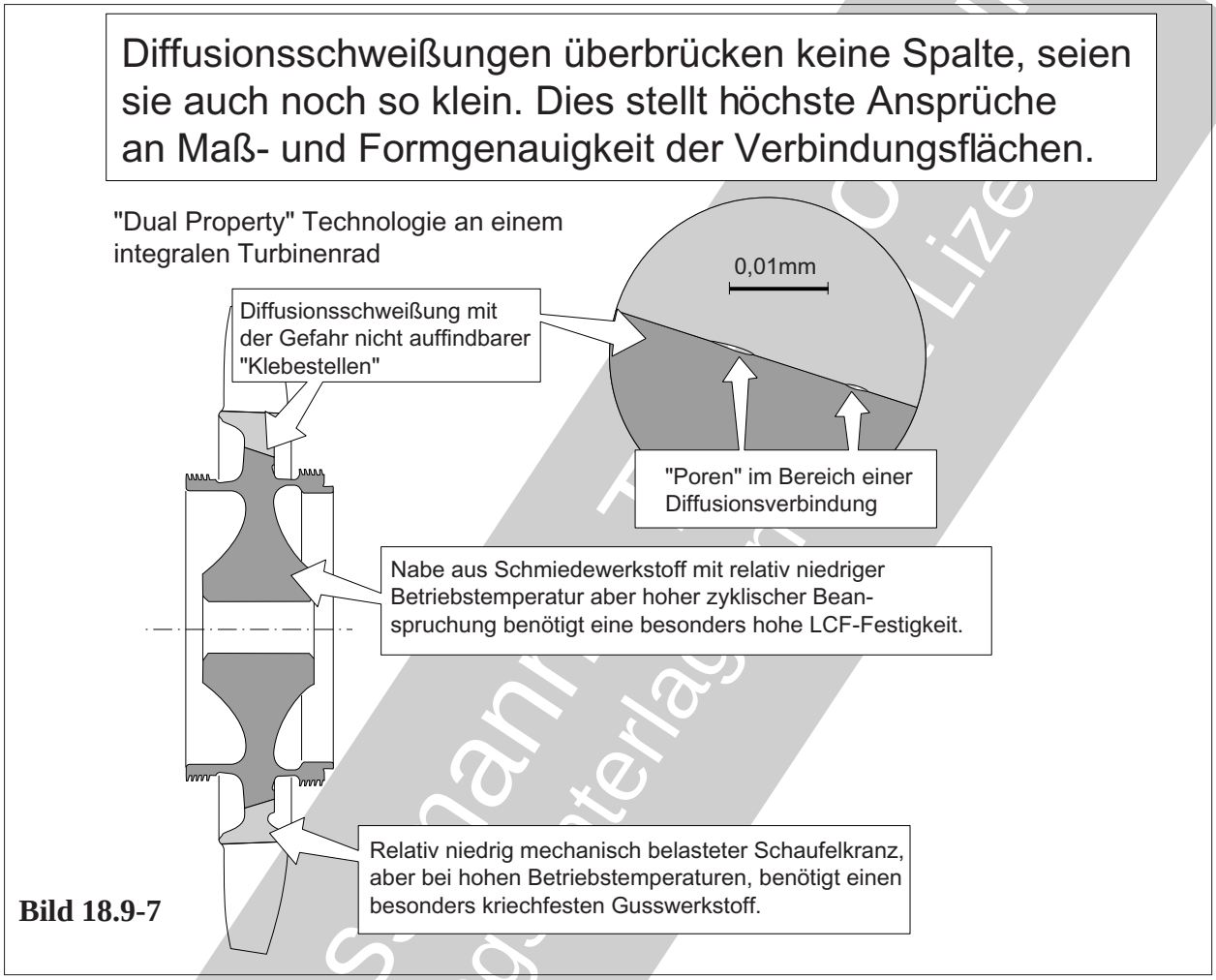


Bild 18.9-7

Bild 18.9-7: Diffusionsschweißverfahren *kommen in Sonderanwendungen wie bei hohlen Fanschaufeln aus Titan oder* ***„Dual Property"*** *- Turbinenrädern (Skizze, Lit. 18.9-1) zur Anwendung. Sie erfordern eine besonders genaue Bearbeitung der Verbindungsflächen. Insbesondere wenn die Schweißflächen nicht während des Schweißprozesses durch äußere Kräfte ausreichend zusammengepresst werden können. Das gilt besonders für warmfeste Werkstoffe wie Nickellegierungen. Diese Genauigkeit ist erforderlich, weil eine Diffusionsverbindung nur bei metallischem Kontakt stattfinden kann.* ***Selbst kleinste örtliche Spalte führen zu Bindefehlern*** *(Band 3, Bild 12.2.1.3.5-1und Bild 12.2.1.3.5-2). Dabei spielt auch die Rauigkeit der Oberflächen und ihr Einfluss auf mikroskopische Kontaktfehler eine Rolle. In diesem Zusammenhang kann vermutet werden, dass beim Fügen von Werkstoffen mit* ***unterschiedlichem Aushärtungszustand und unterschiedlichen Volumenanteilen an ausgeschiedenen Verfestigungsphasen*** *(γ')****Probleme auftreten.*** *Bereits solche kleinen Volumenänderungen bei den hohen Temperaturen einer Diffusionsschweißung dürften bedenkliche Maßänderungen entstehen lassen (Bild 18.9-9).*

Solche Fehlstellen treten als ***„Klebungen"*** *(Anhäufung mikroskopischer Fehlstellen) auf. Sie sind mit seriengeeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht ausreichend sicher zu finden. Ist die Schweißung deutlich quer belastet, muss bei Kriech- und /oder zyklischer Belastung mit einem Risswachstum von diesen Fehlstellen gerechnet werden. Die Erfahrung zeigt, dass deshalb (Lit 18.9-1) eine sichere Betriebslebensdauer in vielen Fällen nicht gewährleistet werden kann.*

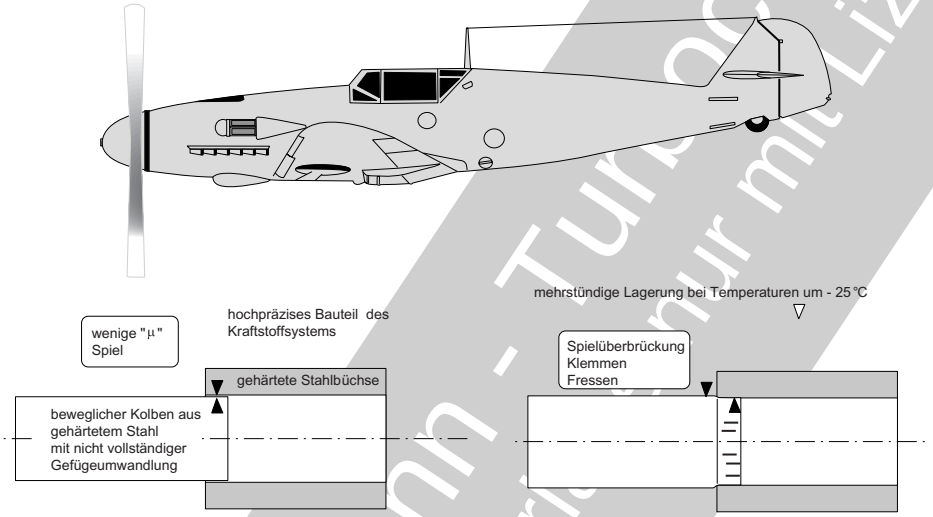
© Arbeitsunterlage

Beispiel 18.9-2: Im Rahmen der Entwicklung einer Gasturbine kleiner Leistung wurden Start- und **Betriebsversuche in einer Kältekammer** unter 20°C durchgeführt. Dabei kam es in mehreren Fällen zum **Versagen der Kraftstoffregelung** nach einem Ausfall des mechanischen Reglers.
Die Untersuchung des Reglers ergab, dass ein Steuerkolben im Kraftstoffregler festsaß. Die anfängliche Vermutung, dass es sich um ein Fressen (Kaltverschweißen) handelt, zeigte sich als unzutreffend. Der Steuerkolben läuft mit extrem geringem Spiel in Kraftstoff. Weder die Gleitfläche im aufgeschnittenen Gehäuse, noch die des Kolbens ließ Fressspuren erkennen. Eine Vermessung des Durchmessers ergab, dass der **Kolbendurchmesser offenbar gewachsen** war und das für den Gleitvorgang notwendige Spiel überbrückte.
Der Steuerkolben bestand aus einem **Vergütungsstahl** mit hoher Härte. Das Gefüge war nach dem Vergütungsvorgang nicht voll umgewandelt worden. Es verblieb ein relativ hoher Anteil an **Restaustenit**. Um diesen (Bild 18.9-8) auch in Härtegefüge umzuwandeln, ist eine Tiefkühlung erforderlich, wenn die Härteforderungen eine ausreichende Vergütungstemperatur verhindern. Diese Gefügeänderung ist mit einer, wenn auch kleinen, Volumenvergrößerung (Bild 18.9-8) und entsprechender Maßänderung (größeres Volumen des Härtegefüges als das des Restaustenits) verbunden. Das führte zum Klemmen des Kolbens und Versagen des Reglers. Dieser Befund konnte an weiteren, noch nicht verbauten Teilen verifiziert werden. Abhilfe brachte eine **Tiefkühlung der gehärteten Teile vor der Endbearbeitung**.

Bild 18.9-8: Gefügeänderungen *wie sie im Ablauf von Wärmebehandlungen oder Fertigungsprozessen (z.B. Schweißen und Diffusionsbeschichten) auftreten, können mit kleinen bleibenden* ***Volumenänderungen*** *ablaufen. Der Mechanismus ist eine Aufweitung oder eine Entspannung des Metallgitters. Dabei werden Atome an andere Gitterplätze verlagert.*
Ein typisches Beispiel ist die ***Härtung von Stählen****. Martensitisches Gefüge (Härtegefüge) weist gegenüber dem weichgeglühten Zustand eine Aufweitung des Gitters durch Kohlenstoffatome auf. Dies führt bei* ***Einsatzhärtungen*** *zu erwünschten Druckspannungen in der Oberfläche (Band 3, Bild 12.2.1.8-5). Gewöhnlich ist bei Stahlteilen das Fertigmaß betroffen.*
Auch bei aushärtbaren Leichtmetalllegierungen (Aluminium) und Nickellegierungen treten Volumenänderungen beim wechselseitigen Übergang vom ausgehärteten Zustand zum lösungsgeglühten Zustand auf (Bild 18.9-9). Bei diesen Werkstoffen ist jedoch meist das noch zu bearbeitende Halbzeug oder Rohteil betroffen. Aus diesem Grund fällt die Maßänderung im Vergleich zu gehärteten Stahlteilen nicht auf.
Erfolgt beim Härteprozess von Stählen beim Abkühlen nicht die volle Umwandlung des Austenits in Härtegefüge, liegt ein instabiler Gefügezustand vor. Dieser kann mit einer Erwärmung (unterhalb von 300 °C, Diagramm unten) oder einer Tiefkühlung (ca. -25 °C) nachträglich mit einer Volumenvergrößerung umklappen. Ist das innere Teil sehr eng tolerierter Schiebesitze betroffen, kann es klemmen. Offenbar führte ein solcher Vorgang zu Ausfällen von Kolbenmotoren von Jagdflugzeugen im 2. Weltkrieg. Komponenten des Einspritzsystems klemmten bei sehr niedrigen Umgebungstemperaturen (Skizze oben). Einen ähnlichen Vorgang beschreibt Beispiel 18.9-2. Hier blockierte ein Zumesskolben des Kraftstoffreglers eines Hubschraubertriebwerks während des Tests in einer Kältekammer. Bei diesen extrem eng tolerierten Schiebepass-

© Axel Rossmann - Turbo Consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Schon anderen Antrieben hat offenbar eine Volumenänderung durch die Wärmebehandlung der Bauteile Probleme gemacht.



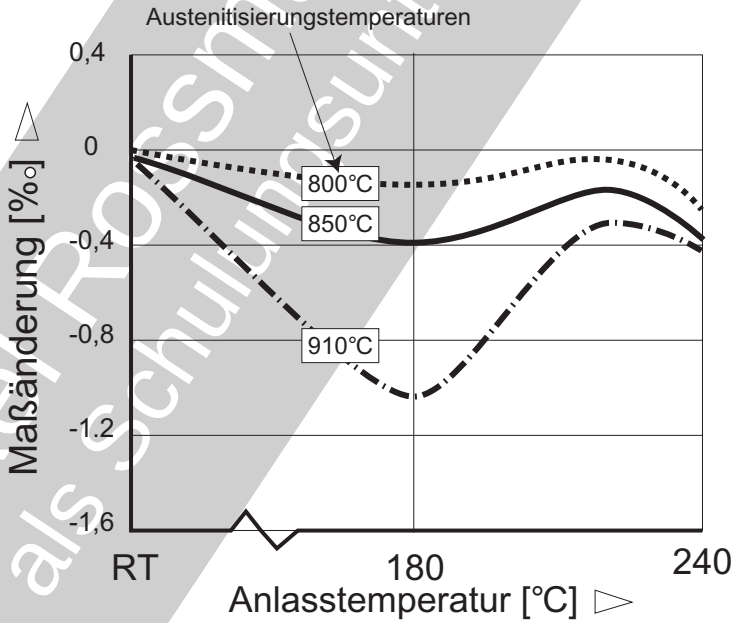
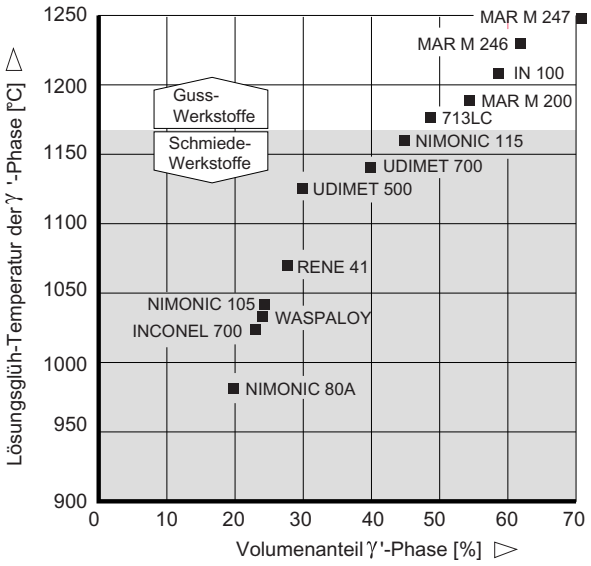


Bild 18.9-8

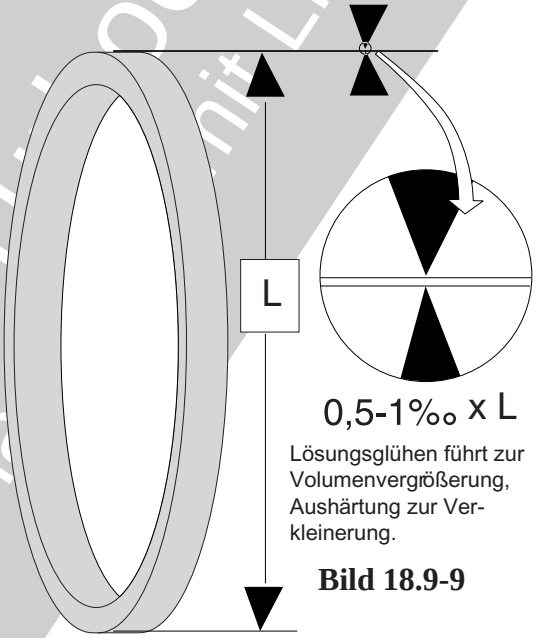
ungen genügte eine Durchmesservergrößerung von wenigen µ (mittlere Skizzen).
*An **Wälzlagern** hat man bei hohen Betriebstemperaturen das „Wachsen" eines Durchmessers von 200 mm um 0,01 mm beobachtet.*
Das Diagramm zeigt eine zu erwartende Maßänderung bis zu 1,6 Promille in Abhängigkeit von der Anlasstemperatur für den typischen Wälzlagerwerkstoff 100 Cr 6 (Lit. 18.9-6). Je niedriger die Austenitisierungstemperatur, umso geringer ist in diesem Fall die zu erwartende Massänderung.

© Axel Rossmann - Turbo consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Lösungsglühen und Aushärten von Nickellegierungen geht mit Volumenveränderungen einher und führt zu entsprechenden Massänderungen.



Die Volumenänderung steht im Zusammenhang mit dem Volumenanteil der γ' -Phase



Lösungsglühen führt zur Volumenvergrößerung, Aushärtung zur Verkleinerung.

Bild 18.9-9

Bild 18.9-9: Aushärtbare Nickellegierungen zeigen bleibende Volumenveränderungen*. Diese stehen im Zusammenhang mit der γ'* ***Aushärtungsphase****. Geht sie in* ***Lösung****, kommt es zur Aufweitung des Gitters und damit zu einer Volumen- bzw.* ***Massvergrößerung****. Umgekehrt führt die* ***Aushärtung*** *zur* ***Volumenverkleinerung****. Damit ist das Verhalten gegensätzlich zu martensitischen Stählen (Bild 18.9-8). Eine besondere Rolle dürfte der Volumenanteil der Aushärtungsphase spielen. Diese nimmt mit der Warmfestigkeit der Werkstoffe bzw. dem γ'-Anteil zu (Diagramm links).*

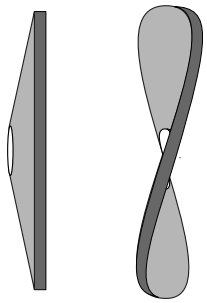
Bei vollständiger Umwandlung ist je nach Legierung mit Maßänderungen zwischen 0.5 und 1 Promille zu rechnen.

Gewöhnlich stört eine solche Veränderung den Fertigungsprozess bzw. dasVerhalten der Bauteile nicht. Das erklärt sich daraus, dass entsprechende Wärmebehandlungen an Rohteilen mit ausreichend Aufmaß durchgeführt werden. Probleme dürften sich daher auf Sonderfälle beschränken.

Denkbar sind Probleme beim ***Diffusionsschweißen*** *von Teilen eines unterschiedlichen Wärmebehandlungszustands oder aus verschiedenen Werkstoffen. Bei sehr unterschiedlichem Volumenanteil der γ'-Phase ist die notwendige hohe Maßgenauigkeit während des Schweißvorgangs gefährdet. Die typischen, sehr hohen Temperaturen dieses Schweißprozesses würden für entsprechende Gefügeveränderungen ausreichen (Bild 18.9-7).*

© Axel Poss als Sonntagsdocument mit Lizenz

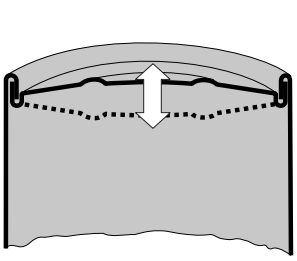
Maßveränderungen behindern den Fertigungsprozess und können sich auch im Betrieb bemerkbar machen.

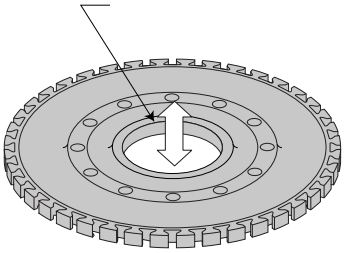


von Eigenspannungen durch die Bearbeitung verzogene Scheiben

"Büchsendeckeleffekt", eine Folge von Eigenspannungen.

Nabenbereich unter Druckspannungen





- Eigenspannungen: Aus Zerspanung, plastischen Verformungen (Richten, Verfestigen, Bearbeitungsspannungen), Beschichtungen, Schweißen, Wärmebehandlung u.s.w.
- Volumenänderung: Gefügeinstabilität / Aushärtungsvorgänge, Gaseinschlüsse (HIP)
- Elastische Unsymmetrien: Faserverstärkte Werkstoffe
- Wärmespannungen: ungünstige Werkstoffkombination
- Kriechen: ungünstige Werkstoffeigenschaften

Aus einer Titanschmiedelegierung gefrästes Verdichtergehäuse mit unzulässigen Anstreifspuren durch Verzug im Betrieb auf Grund von Bearbeitungseigenspannungen

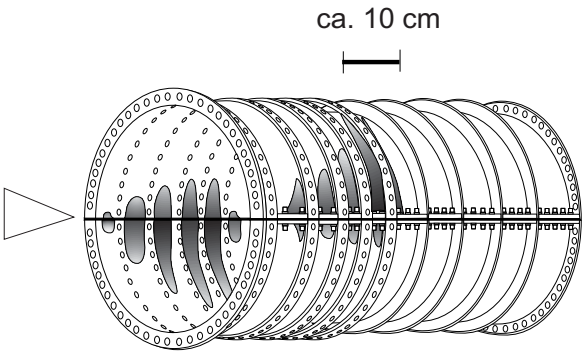


Bild 18.9-10

Bild 18.9-10: *Die häufigsten Ursachen für Maßprobleme (**Verzug**) während der Fertigung sind **Eigenspannungen** und/oder **Wärmedehnungen**. Eigenspannungen können bei der Rohteil- oder Fertigteilherstellung entstehen. In vielen Fällen sind es Wärmedehnungen, die plastische Verformungen erzeugen und so selbst unerwünschte Eigenspannungen hervorrufen. Typisches Beispiel sind Schweißungen.*

*Eigenspannungen können sich im **späteren Betrieb** verändern. Das führt zu Verzug, der sich, wie in den folgenden Beispielen, unzulässig bemerkbar machen kann.*

***Verdichtergehäuse** eines Wellenleistungstriebwerks in längsgeteilter Ausführung wurden aus Schmiedeteilen innen gedreht, die Außenkontur gefräst (Skizze unten). Nach der Montage neuer Triebwerke kam es in mehreren Fällen zu **heftigem Anstreifen des Verdichterrotors**. Dabei wurden die Gehäuse von einer Versprödung durch Sauerstoffaufnahme bei der Überhitzung irreparabel geschädigt. Eine Untersuchung ergab, dass sich die Gehäuse offenbar beim ersten Hochfahren bzw. **Erwärmen auf Betriebstemperatur bleibend ovalisierten**. Der Verzug fand in erster Linie um die Axialflansche statt. Die Verformungen ließen sich auf Eigenspannungen aus dem Fertigungsprozess zurückführen. Anscheinend entstanden sie mit einer vom **Fräsen** erzeugten plastischen Oberflächenverformung. Abhilfe brachte bei den bereits gefertigten Teilen eine **angepasste Kugelstrahlbehandlung** des verzugsgefährdeten Bereichs. Die Eigenspannungen des Kugelstrahlens überlagerten die Eigenspannungen aus dem Fertigungsprozess in günstiger Weise, sodass es zu keinem unzulässigen Verzug kam. Eine Optimierung des Zerspanungsvorgangs dürfte für die laufende Serie vorzuziehen sein.*

*Eine **plötzliche Umlagerung von Eigenspannungen** mit einem entsprechenden Verzug kann auch unter der Einwirkung kleiner äußerer Kräfte auftreten. Ein Beispiel ist der **„Büchsendeckel- oder Knackfrosch-Effekt“** (Skizze oben Mitte und rechts, Bild 18.4-1). Dabei deformiert sich plötzlich eine dünnwandige, am Umfang von einer steifen Ringzone eingespannte Membrane (Deckel, Scheibe) schirmartig.*

Scheibenförmige Gebilde ohne Ringversteifung können einen „S-Verzug“ („Achter“, Skizze oben links) annehmen.

*Diese **Vorgänge sind reversibel**. Man kann sie an **dünnwandigen Rotorscheiben** beobachten. Destabilisierende Eigenspannungen können von der Rohteilherstellung (Schmiedespannungen, Gussspannungen) oder von einer intensiven Zerspanung herrühren. Das weist auf nicht ausreichend optimierte Zerspanungsparameter und/oder Aufspannung des Bauteils hin.*

*Abhilfe ist von einem geeigneten Abbau der Eigenspannungen zu erwarten. Dies kann ein **Spannungsarmglühen** in einer stabilisierenden Vorrichtung sein. Bei Rotorscheiben besteht die Möglichkeit eines **Vorschleuderns** bis zu einer zulässigen, örtlichen Plastifizierung.*

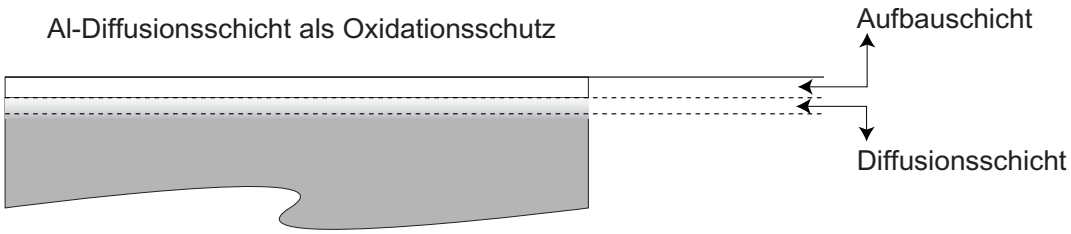
***Wärmespannungen** mit einem störenden Verzug des Bauteils können bei Fertigungsschritten mit einer Aufheizung auftreten. Typisch sind Wärmebehandlungen, Schweißen und Löten. Ursache sind Wärmedehnungsunterschiede als Folge ungleichmäßiger Temperaturverteilung oder eines unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens bei der Fügung verschiedener Werkstoffe. Solche Maßänderungen können sich bei **Lötungen oder EB-Schweißungen**, die eine exakte Einhaltung des **Fügespalts** erfordern, als sehr lästig erweisen und Bindefehler auslösen.*

*Selbst kleine gefügebedingte **Volumenänderungen** können bei sehr engen Maßtoleranzen zu Problemen führen. Sie können während der Fertigung, z.B. beim **Diffusionsschweißen** (Bild 18.9-9) oder im Betrieb, z.B. durch das Klemmen von Gleitsystemen (Bild 18.9-8) auftreten.*

© Axel Rossmann - TU Dresden
Nur zur Unterlage der Prüf-Lizenz

Aus maßlichen Gründen lassen sich Oberflächenverfahren nicht beliebig oft wiederholen.

Ätzen



Kugelstrahlen und abrasives Strahlen

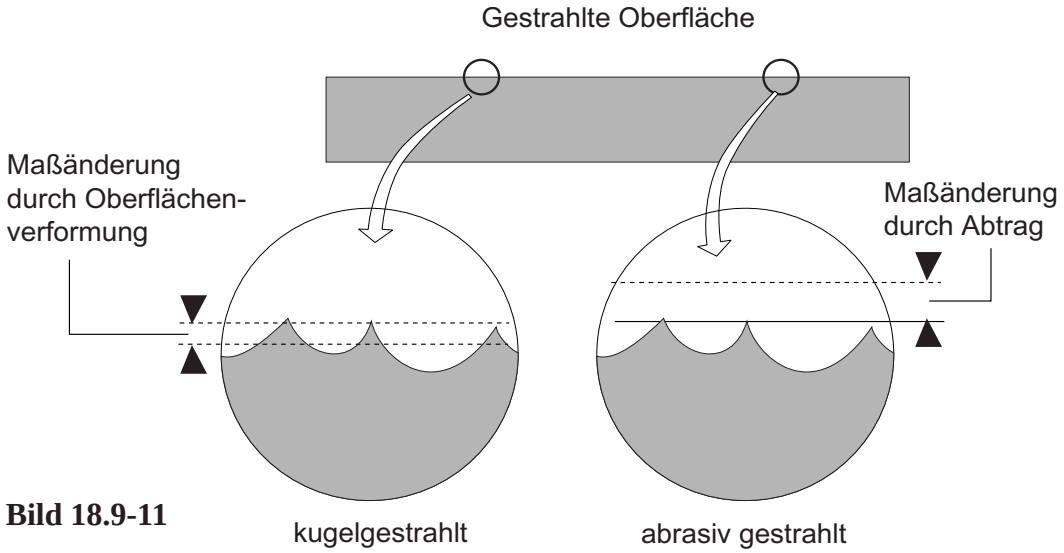


Bild 18.9-11

*Werden Bauteile wie **Guss- oder Sinterteile** mit einer merklichen **Porosität** einem **HIP-Prozess** (Band 3, Bild 11.3-8) unterworfen der die Poren zusammendrückt und ausheilt, sind Maßänderungen zu erwarten. Bei Gussteilen sind dies Zonen mit Anhäufungen von Porosität, sog. Lunkernestern. Hier **fällt die Oberfläche ein**. Dies ist zu berücksichtigen, wenn für eine optimale Funktion sehr enge Formtoleranzen einer umströmten Oberfläche erforderlich sind. Bei **Sinterteilen** ist der **Schrumpf** während des Sinterprozesses ein verfahrensspezifisches Problem. Auch hier kann örtlich konzentrierte Restporosität Ursache für Verformungen in einem HIP-Prozess sein.*

*Kriechen als **Relaxation von Eigenspannungen** (Bild 18.4-5.1) kann bei manchen Werkstoffen sogar **bei Raumtemperatur zum Verzug dünnwandiger Bauteile** führen. Ein Beispiel sind **Titanlegierungen,** die nach der Induzierung ausreichend hoher Eigenspannungen (z.B. durch Kugelstrahlen oder Zerspanung) nach Stunden oder Tagen Verzug aufweisen.*

***Inhomogene Bauteile und Werkstoffe**: Gedacht ist an Teile, die auf Grund erwünschter*

bzw. konstruktionsbedingter Inhomogenität Unterschiede in physikalischen Eigenschaften zeigen. Dazu gehören Steifigkeit (E-Modul), Festigkeit bzw. Fließgrenze und Wärmedehnung. Ein typisches Beispiel sind Bauteile mit einer ***fasertechnischen Verstärkung*** *in Form einer integrierten Faserlage bzw. Wicklung. Diese Problematik wird mit der Anwendung* ***keramikfaserverstärkter Metalle*** *wie SiC-Faser-verstärktes Titan aktuell. Bei flächigen Strukturen ist es wichtig, die* ***Faserlagen symmetrisch*** *anzuordnen, um unzulässige Verzüge zu vermeiden.*

Bild 18.9-11: *Nacharbeiten zur Rettung wertvoller und/oder terminkritischer Teile ist im Fertigungsprozess nicht ungewöhnlich. Zwar ist es trivial, wird jedoch nicht selten übersehen, dass* ***Nacharbeiten*** *nicht beliebig oft wiederholt werden können. Diese Situation tritt bevorzugt bei* ***Reparaturen mit einer Maßänderung*** *an gelaufenen Teilen ein. Meist sind diese Verfahren mit einem scheinbar unerheblich geringen Abtrag verbunden. Eine* ***mehrfache Wiederholung*** *an eng tolerierten Bauteilen lässt das aber kaum zu. Es handelt sich in erster Linie um* ***Ätzverfahren*** *und abrasives Strahlen. Sie dienen vorzugsweise zum* ***Abziehen von Beschichtungen („Strippen“****, Skizze oben).*
Beim Kugelstrahlen erfolgt kein nennenswerter abrasiver Abtrag, sondern eine deutliche ***Rauigkeitssteigerung*** *gegenüber einem glatten Ausgangszustand, welche die tragende Fläche minimal „anhebt“ (Skizze unten).*

Bild 18.9-12.1 *(Lit 18.9-7): Die Empfindlichkeit von Blisks für Schaufelschwingungen stellt erhöhte Forderungen an die Fertigung (Band 1 Bild 5.4.3.3-6). Alle dargestellten Fertigungsabweichungen können sich auf unterschiedliche Weise* ***gegenseitig beeinflussen****.*
Werkzeug, Verschleiß und Maßtoleranzen: *Durch den Verschleiß des Werkzeugs nimmt die Zerspanungsleistung ab, die Schaufeln werden etwas dicker. Entsprechend verändert sich die Eigenfrequenz benachbarter Schaufeln. Zudem kann ein stumpfes Werkzeug* ***Zugeigenspannungen*** *induzieren und damit die Schwingfestigkeit herabsetzen. Auch der umgekehrte Fall ist bei Druckeigenspannungen bei* ***Verfestigung*** *und Druckeigenspannungen denkbar. Inwieweit diese Effekte Einfluss auf die* ***Eigenfrequenzen haben*** *ist unklar****.***
Vom Maß des Werkzeugs sind alle Schaufeln betroffen und somit das Schwingverhalten des gesamten Blisks.
Beim Tausch eines verschlissenen Werkzeugs *gegen ein neues weisen* ***benachbarte Schaufeln*** *besonders ausgeprägte Unterschiede auf.*
Verformung durch den Schnittdruck*: Unterschiede im* ***Verlauf der Blattdicke*** *können die Eigenfrequenz, besonders die Grundbiegeschwingung, entscheidend beeinflussen (Bild 17.3.2-3 und Band 1 Bild 5.4.3.1-4). So ist eine* ***Eigenfrequenzverschiebung*** *zur Resonanz möglich. Gleichzeitig kann die Schwingfestigkeit (axf-Wert) niedriger als erwartet sein (Bild 17.3.2-3).*
Ausrichtfehler*: Ungenauigkeiten im Rundlauf können den Anstreifvorgang und damit den Spitzenspalt beeinflussen. Dieser wirkt sich wiederum auf* ***Wirkungsgrad*** *und* ***Pumpgrenze*** *der Stufe aus. Der erste* ***Anstreifvorgang*** *kann die Schaufel zu gefährlichen* ***Schwingungen anregen*** *und/oder die* ***Schaufelspitze schädigen****. Damit werden* ***Eckenrisse*** *begünstigt (Band 1 Bild 5.4.3.3-5 und Bild 5.4.3.3-10).*
Manuelle Nacharbeit*: Die* ***Anregungsintensität durch die Strömung*** *um das Blatt kann von individuellen, scheinbar kleinen* ***Profil-*** *und* ***Rauigkeitsunterschieden*** *beeinflusst sein. Dies gilt insbesondere bei einer* ***Strömungsablösung*** *an der Pumpgrenze.*
Die besondere Sensibilität eines Blisk auf scheinbar kleine örtliche Veränderungen der Beschaufelung ist auch zu berücksichtigen wenn im Rahmen der Fertigung ***nicht serienmäßige Nacharbeiten*** *(z.B. Richten einer verformten Schaufel) notwendig werden. Dies sollte Bestandteil einer* ***Risikobewertung*** *sein.*

© Axel Rosemann - Turboconsult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Zerspanungsbedingte Maßabweichungen von gefrästen Bliskschaufeln.

frei nach T.Klauke

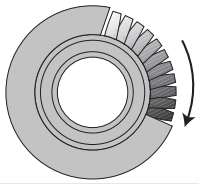
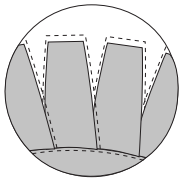
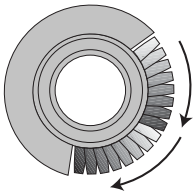
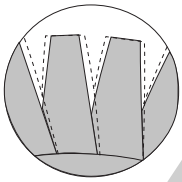
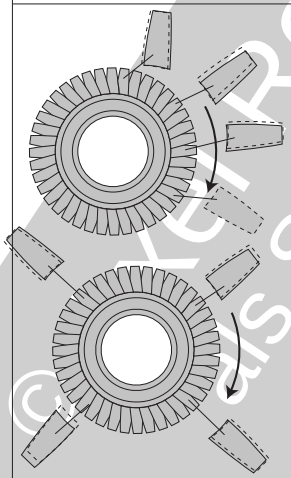
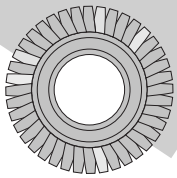
Fehlerbild	Ursachen	Beschreibung
	Werkzeugverschleiß	Entsprechend dem zunehmenden Verschleiß am Werkzeug nimmt die Zerspanungsleistung ab. Die Schaufeldicke **nimmt so während der Zerspanung zu**.
	Nicht berücksichtigte Maßtoleranzen des Werkzeugs.	Die Nutzung der Maßtoleranz des Werkzeugs beeinflusst den Materialabtrag **an allen bearbeiteten Flächen**.
	Verschleißbedingter Werkzeugwechsel	Austausch des verschlissenen Werkzeugs gegen ein neues. **Sprunghaft ansteigender Materialabtrag** der dann wieder bis zum nächsten Tausch abnimmt.
	Elastische Verformung durch den Schnittdruck	Während des Zerspanungsvorgangs sich veränderndes elastisches 'Ausweichen' der Schaufel unter den Schnittkräften kann oft vom CNC-Programm nicht verhindert werden. Materialabtrag verändert sich besonders in **Abhängigkeit von der Schaufelhöhe** während der Zerspanung. Alle Schaufeln betroffen.
	Ausrichtfehler am Werkzeug am Blisk	**Um einen Winkel versetzter** Materialabtrag. Schaufelposition am Umfang entsprechend verändert. **Zur Drehachse** (radial) **versetzter Materialabtrag**. Exzentrizität (Anstreifen, Spitzenspalt) der Beschaufelung, Unwucht.
	Manuelle Nacharbeit	Oberflächen und **Konturen/Profile der einzelnen Schaufeln unterscheiden sich**. Dies beeinflusst die Strömung am Blatt. Auswirkungen im Betrieb: Strömungsablösung, aerodynamische Schwingungsanregung und Wirkungsgrad.

Bild 18.9-12.1 *Bildbeschreibung vorhergehende Seite*

© Axel Rossmann - Zur Konsultation als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

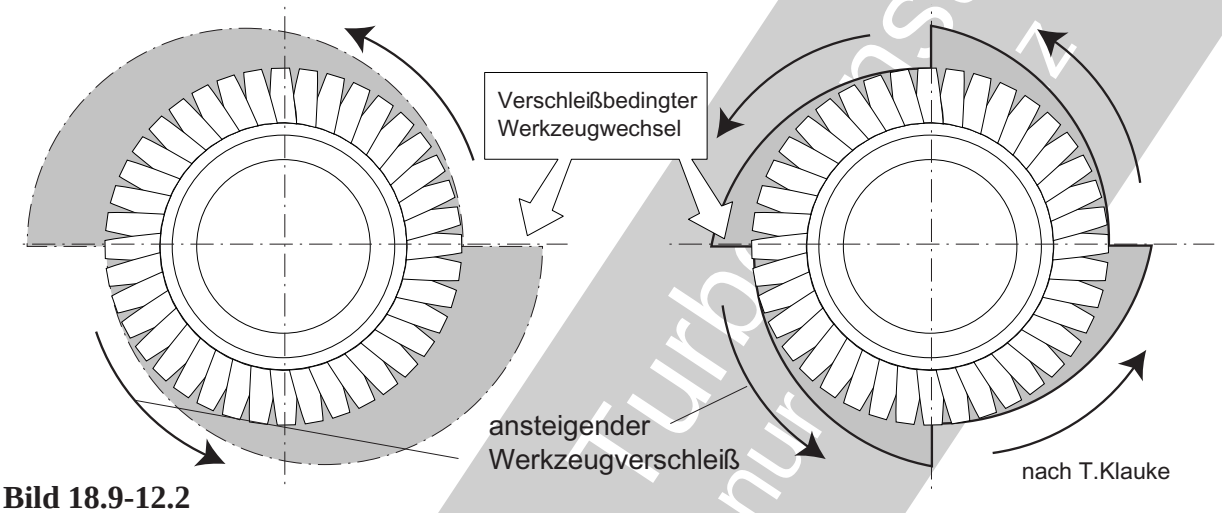


Bild 18.9-12.2

Bild 18.9-12.2 *(Lit 18.9-7): Selbst kleine* ***Unwuchten*** *eines Blisks durch die Herstellung der Beschaufelung können unzulässig sein. Nachträglich* ***zum Ausgleich bearbeitete Schaufeln*** *werden dabei merklich* ***verstimmt****. Damit besteht eine erhöhte Schwingbruchgefahr im Betrieb. Solche Unwuchten sind also nach Möglichkeit bereits bei der Herstellung des Schaufelkranzes zu vermeiden. Dafür empfiehlt sich ein umfangssymmetrischer Werkzeugwechsel.*

Bild 18.9-13 *(Lit 18.9-7 und Band 1 Bild 5.4.3.3-6): Verstimmungen, die für 'konventionelle' Rotoren mit eingesetzten Schaufeln tolerierbar sind, können für Blisks bereits gefährlich sein. Dies liegt an der Kopplung von Schaufeln und Scheibe sowie fehlender Reibungsdämpfung in den Fußauflagen.*

Erfahrungsgemäß können bereits sehr kleine Abweichungen der Eigenfrequenzen dafür sorgen, dass bei Entwicklungs- und Nachweisläufen keine bedenkliche Resonanz auftritt. So kann die Serieneinführung erfolgen, ohne dass das Risiko kleiner Fertigungsabweichungen für ein bestimmtes Bauteil bewusst wird. (Prinzip: "The engine will tell us"). Erst bei Nutzung der möglichen Streuung einer zugelassenen Fertigung kann es statistisch zum Schaden durch Resonanz und Schwingermüdung kommen. Die Gefährlichkeit selbst kleiner Abweichungen lässt das folgende Beispiel erahnen.

Bereits eine ***Politur*** *im Bereich des Übergangs von Schaufel zur Scheibe verändert die Schaufeleigenfrequenzen um bis zu 2 Hertz (ca. 0,03 %). Dies ist für eine Bliskverstimmung durchaus bemerkenswert.*

Der Schaufelkranz eines Blisks kann mit unterschiedlichen Verfahren gefertigt werden. Die Skizze ***„A"*** *zeigt die* ***Zerspanung*** *eines Schmiedeteils. Daneben das* ***Aufschweißen*** *(****„B"****) des* ***vorgefertigten Blattes*** *(Lineares*

© Axel Rossmann - Turbokonsult
als Schulungsunterlage nur zur

Reibschweißen, Band 3, Bild 12.2.1.3.4-7) und die nachträgliche, spanende Bearbeitung. Dieses Verfahren kommt besonders bei den schwer zerspanbaren Ni-Legierungen zum Einsatz.

*Bei der **elektrochemischen Bearbeitung** ECM („**C**“, Band 3, Bild 12.2.1.2-8) entstehen individuelle Geometrieunterschiede der Schaufelblätter. Die Besonderheit des Verfahrens ist der elektrolytdurchflossene **Arbeitsspalt** zwischen Werkzeug und Werkstück. Spalttoleranzen und kleine Abweichungen von Verfahrensparametern wie Elektrolytdurchfluss und elektrischer Strom beinflussen die Bearbeitung.*

*Werden die Scheiben über **Flansche** („**D**“) verschraubt, erfordert dies entsprechend enge Toleranzen der **Zentrierungen**. Abweichungen machen sich in der Unwucht bemerkbar.*

*Um die einzelnen Rotorstufen zu einer einzigen Rotortrommel zu verbinden, wendet man die folgenden **Schweißverfahren** an: „**E**“ **Elektronenstrahlschweißen** (EB-Schweißen Bild 18.6-6 und Band 3 Kapitel 12.2.1.3.3) und Reibschweißen (Bild 18.6-6 und Band 3, Kapitel 12.2.1.3.4). Beim EB-Schweißen ist ein axialer und radialer Verzug durch Wärmedehnungen beim Schweißen problematisch (Bild 12.2.1.3.3-6). So entstehende Unwuchten und Eigenspannungen können Schaufeln verformen. Abhängig von der Maßhaltigkeit der Vorrichtungen ist ein radialer Achsversatz mit entsprechenden Unwuchten möglich.*

*Ein **Überschleifen der Schaufelspitzen** des Blisk („**F**“) verkürzt die Schaufelblätter, wobei wegen Massen-und Längenabnahme (Steifigkeitszunahme) die Eigenfrequenz ansteigt. Eine ungleichmäßige Verteilung am Umfang entsteht bei exzentrischer Lagerung des Rotors oder fertigungsbedingter Exzentrizitäten.*

*Harte Anlaufschichten im Gehäuse erfordern eine **Panzerung der Schaufelspitze** („**G**“), um Überhitzung und unzulässig hohe Anstreifkräfte zu vermeiden. Dazu werden Hartpartikel auf die Spitze gelötet. Sowohl das Lot als auch die Partikel weisen eine blattindividuelle Verteilung auf. Damit wird die schwingende Masse und so die Eigenfrequenz beeinflusst.*

*Schaufeln von Triebwerken, deren Einsatz in staubbeladener Umgebung vorgesehen ist (z.B. Militär), können einen **Erosionsschutz** („**H**“) benötigen. Gewöhnlich handelt es sich um Aufdampfschichten (PVD) oder Reaktionsschichten (CVD). Dazu gehören dünne Hartschichten wie TiN. Hier ist eine geringe Beeinflussung aller Schaufeln zu erwarten. Bei besonders hoher Erosionsbeanspruchung ist sogar das partielle (Eintrittskante und Spitzenbereich) **Aufbringen einer thermischen Spritzschicht** möglich. Gewöhnlich handelt es sich um Wolframcarbid in einer Kobaltmatrix. Diese Schicht ist relativ dick und schwer. Sie dürfte die Eigenfrequenzen deutlich beeinflussen.*

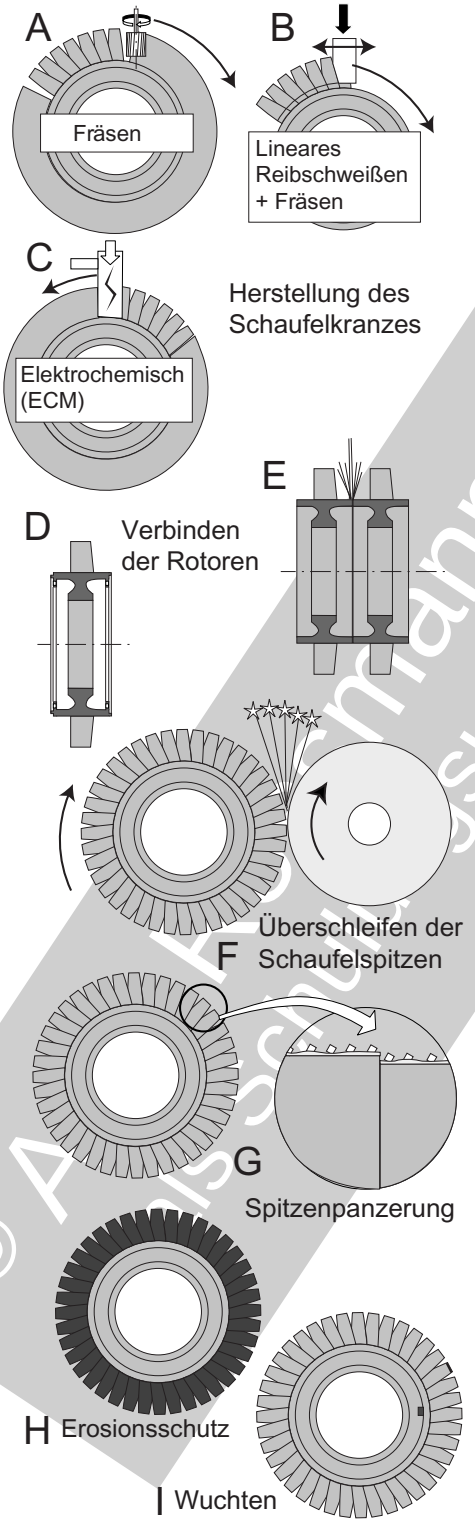
***Wuchten** („**I**“) erfordert eine geeignete **Materialentnahme**. Geschieht dies an **Schaufeln,** ist wegen der Massen- und Steifigkeitsänderung mit einem deutlichen Einfluss auf deren Schwingverhalten zu rechnen. Wird der relativ dünne **Schaufelkranz** in seiner Steifigkeit örtlich merklich beeinflusst, könnte sich seine elastische Verformung auf die Schaufeln in diesem Bereich auswirken.*

© KaRoSoft - Turbosoft
Lizenzvertrag

Fertigung: Maße und Bauteilgeometrie

Einfluss der Fertigung auf die Verstimmung und damit die Schwingbelastung einer Bliskbeschaufelung im Betrieb.

in Anlehnung an T.Klauke



Arbeitsschritt	Auswirkung auf Schaufel-Eigenfrequenzen
A Fräsen + Glätten	
B Schweißen + Fräsen + Glätten	Individuelle Geometrieunterschiede führen zur Verstimmung der Einzelschaufeln
C ECM + mechanische Nacharbeit	
D Spanende Bearbeitung (Flansche und Zentrierbunde)	Indirekt bei Wuchtentnahme
E Schweißen (Elektronenstrahl, Reibschweißen)	Geringer Anstieg bei allen Schaufeln
F Spitzen Überschleifen (Rundschleifen)	Anstieg bei allen Schaufeln wegen Kürzung
G Spitzen Panzern Löten/Schweißen Hartstoffpartikel	individuelle Verstimmung der Schaufeln
H Bedampfen (PVD) Thermisches Spritzen	individuelle Verstimmung der Schaufeln
I Fräsen, Schleifen	Verstimmung einzelner Schaufeln

Bild 18.9-13

© Arbeitsmanuskript

Literatur zu Kapitel 18.9

18.9-1 P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 188.

18.9-2 A. Schäffler, „Funktion der Fluggasturbine und ihrer Hauptkomponenten“, CD im Eigenverlag, (3.2003), Seite 3.5-55 bis 3.5-57.

18.9-3 B.Syren, H. Wohlfahrt, E.Macherauch, „Zur Entstehung von Bearbeitungseigenspannungen“, Zeitschrift „Archiv Eisenhüttenwesen“ 48 (1977), Nr. 8, August, Seite 421-426.

18.9-4 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 Assesment“, 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.

18.9-5 J.J. Marra, „Tuned-Mass Damper for Turbine Blades“, Zeitschrift „NASA Tech Briefs“, October 1993, Seite 99 und 100.

18.9-6 J. Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau“, Expert Verlag, Band 308, Kontakt&Studium, Maschinenbau, 2. Auflage, ISBN 3-8169-1202-8, 1995, Seite 37 und 38.

18.9-7 T.Klauke, „Schaufelschwingungen realer integraler Verdichterräder im Hinblick auf Verstimmung und Lokalisierung“, Dissertation, Dezember 2007, Seite 129 und 130.

© Axel Rossmann Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Sachregister

A

Abblasem mit Druckluft 18.3-5
Abblättern von Schichten 18.3-29
Abdeckungen
für Diffusionsbeschichtung 18.3-43
gegen Metallspritzer 18.6-20, 18.6-22
gegen Oberflächenverunreinigungen 18.3-16
gegen Schweißspritzer 18.3-43
Strahlen 18.3-42
Verunreinigung durch 18.3-11, 18.3-42
Abfangen eines Bruchs 15.2.3-17
Abgase, Transport von Verunreinigungen 18.3-5
Abgasführung 18.9-4
Abhilfen, Abhilfemaßnahmen 17.1-7
gegen Scheibenverzug 18.9-17
Abkühlen, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-31
Ablagerungen, ‘fouling’ 18.1-8
Ablenkung bei der Wartung 16-6
Ablösung einer Elastomerschicht 18.8-4
Abplatzen
kermaische Panzerung 18.8-4
von Wärmedämmschichten, Folgeschäden 18.8-3, 18.8-4
Spacerbelag 18.8-4
Abpraller, Thermisches Spritzen 18.3-43
Abrasives Strahlen
Druckspannungen 17.2-16
Entgraten 18.2-15
Gratbildung 18.2-7
Abrieb, Fe-haltig 18.3-6
Abschätzung, Rissfortschritt 15-18
Abweichung
Definition 17.1-11
Rückschlüsse 17.5-4
AD (Airworthiness Directive, Lufttüchtigkeitsanweisung), falsche Interpretation 16.2-12
Adhäsion, Definition 18.8-1, 18.8-4
Adiabatische Scherbänder 18.5-8
Aerodynamische
Anforderungen, Schaufelblatt 18.1-27
„Qualität“ einer Oberfläche 18.1-5
Aircraft engine mechanic. Siehe Triebwerksmechaniker: Berufsbild
Aircraft engine repairer.*Siehe* Triebwerksreparierer
Al-Diffusionsschichten, Sprödigkeit 18.7-4
Al-Legierungen 15.2.2-18
Almenintensität
Messung 17.3-34
Rückschluss auf Eigenspannungen 17.3-34, 18.4-40
Anbauelemente, Austauschbarkeit 16.3-1
Änderung von Fertigungsparametern, Auswirkung 18.4-7
Anlauffarben
auf Rissfläche 18.7-13
auf Silber 18.3-10
bei Titanlegierungen 18.6-19
Hinweis auf Übertemperatur 18.6-19
konzentrisch 18.6-20
Lage am Bauteil 18.6-20
Merkmale
Begrenzungen 18.6-20
Späne 17.1-18
Temperaturangaben 18.7-13
tiefergehende Schädigung 18.6-20
Werkstück 17.1-18
Werkzeugschneide 17.1-18
Anodisches Ätzen 18.5-8
Anriss
aus Bruchgefüge 18.7-13
Ort, Identifikation 18.7-13
Technischer 18.7-3
Ansaugen von Verunreinigungen 18.3-8
Anschlüsse, Wartbarkeit 16.3-4
Anschmelzungen
durch Bleiband 18.3-24
Fremdmetall Verunreinigungen 18.3-22
niedrig schmelzende Phasen 18.3-13
Anstreiffläche
Fertigungseonfluss 18.1-10
Nacharbeit 17.5-7
Anstreifschicht, Metallfilz 18.8-3
Anstreifverhalten
Labyrinth 18.1-10
Schaufelspitze 18.1-10
Anstrengung 18.1-18
Anweisung 16.4-3
Feedback 16-14
Folgen einer Abweichung 16-9
Verständnis 16.2-2
Anwendungsgrenzen 15-12
APP. Siehe Analyse potenzieller Probleme
Approved Maintenance Organisations 16.1-6
Arbeitsanweisungen 16.2-1
Arbeitsdokumente, ungenügende 16.2-5
Arbeitskarten 16.1.1-11, 16.2-6, 16.2-12
in Muttersprache 16.2-6
nach Handbuchangaben 16.2-6
Wartung 16.1.1-7
Arbeitsplatzgestaltung 17.1-8
Arbeitsumgebung 16-5
Mängel 16-18

©Axel Rossmann - Turbconsult
Abschulungsunterlagen mit Lizenz

Arbeitsunterlagen 16-1
zu Rückmeldung 16.2-18
As HIP 15.2-10, 15.2.2-9
ASAP. *Siehe* Assessment of Aviation Safety Programs
Asbest, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Assessment of Aviation Safety Programs 16-13
Atemfilter 16.3-19
Ätzen
als Kennzeichnung 17.4-9
anodisch 18.5-8
BEA an Titanlegierungen 18.3-30
Blue Etch Anodizing 18.5-8
Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Topografie 18.1-18
zur Rissöffnung 17.3-16
Ätzmittel
Aufstehen von Graten 17.3-16
Reste im Triebwerk 18.3-30
Rückstand, Drahtbalg 18.3-34
im Kühlluftkanal 18.3-18
Aufbringung, Beschichtung 18.8-8
Auffindwahrscheinlichkeit 17.3-4
Einfluss der Fehlerart 17.3-6
Einfluss der Fehlereigenschaften 17.3-7
Einfluss der Fehlergeometrie 17.3-7
Einfluss der Fehlerlage 17.3-7
Einfluss der Korngröße 17.3-7
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit 17.3-19
Einfluss von Frustration 17.3-19
Einfluss von Werkstoffeigenschaften 17.3-6
Risse in der Fertigung 18.7-26
Röntgenprüfung 17.3-4
Ultraschallprüfung 17.3-5
von Fehlern in Bohrungen 17.3-5
Wirbelstromprüfungen 17.3-5
ZfP 17.3-2
Aufheizen
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-31
von Kanten 18.2-1
Auflagefläche
Blechzwischenlage 18.1-25
Dichtwirkung 18.1-10
Reibbeiwert 18.1-25
Rissbildung 18.1-25
Tragverhalten 18.1-7
Wirkung von Gleitlack 18.1-25
Auflageschichten, Rissbildung 18.7-10
Aufnahme von Informationen 16-2
Aufpressen, Beschädigungsrisiko 18.5-2
Aufschieben, Zentrierflächen 18.5-2
Aufschmierungen 18.3-3
beim Schleifen 18.3-6
durch Vorrichtungen 18.3-6
Metallverunreinigung 18.3-22
Aufschrumpfen, Beschädigungsrisiko 18.5-2
Aufsicht 16-20
Aufwand für Verbesserungen 15.2-11
Ausbeulung, Gehäuse 16.1-10
Ausbildung 17.1-5
Mangel 17.3-19
Wartungspersonals 16.1-4
Ausfallmusterprüfung 15-9, 17.1-6
Ausfallsicherheit 17.1-3
Ausfallwahrscheinlichkeit eines Triebwerksbauteils 17.1-3
Aushärten, Maßänderung bei Nickellegierungen 18.9-15
Auslegung
Auswirkung auf Fertigung 17.2-4
Bauteile 15.2.2-7
eines Bauteils 15.2.2-5
geeignete Werkstoffdaten 15.2.3-19
Lebensdauer 15.2.3-10
Philosophie 15-14
Werkstoffgrenzen 17.2-4
Ausnahme (Definition) 16.4-3
Ausschussraten, hohe 15-8
Äußere Merkmale, Schaden 16.1-8
Austausch, Turbinenräder 16.1-13
Austauschbarkeit von Anbauelementen 16.3-1
Austretende Medien 16.1-10
Auswahl von Mitarbeitern 15.2.2-3
Auswertung von Prüflaufteilen 15.2.3-23
Aviation Maintenance Human Factors 16.1.1-1
axf-Prüfung, Verdichterschaufel 17.3-30

B

Bad (Prozessbad)
Gummiabdeckungen 18.3-43
Strömung, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Verunreinigung
Einfluss von Riefen 18.1-18
Hinweise 18.3-40
Bajonettverschluss, Scheibenverbindung 15-34
Base Check Manual (Prüfhandbuch) 16.1.1-14
Base Maintenance Certifying Engineer 16.1-8
Bauarbeiten, Oberflächenverunreinigungen 18.3-15
Bauteil
Auslegung 15.2.2-5, 15.2.2-7
Belastung, Einfluss auf Kennzeichnung 17.4-6
Dokumentation 16-12
Eigenschaften, Schäden 16.1-10
Lage 16.2-1
Sicherheit bei Rissbildung 18.7-2
Verhalten, Änderung durch Verbiegen 18.5-21
BEA. *Siehe* Blue Etch Anodizing
Bearbeitung, Oberflächenverunrenigung 18.3-3
Bearbeitungsfläche, Schwingermüdung 18.1-10

© Axel Rossmann - Turbo Consult
Nur als Schulungsunterlage mit Lizenz

Bearbeitungsmaschine
Auswirkung eines Wechsels 18.4-4
Steifigkeit 17.1-14
Bearbeitungsmerkmale, Rissverlauf 18.7-9
Bearbeitungsrichtung, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.1-14
Bearbeitungsriefen
an Rotorscheiben 18.1-15
in Umfangsrichtung 18.1-10
Bearbeitungsspuren,
Lage zu Orientierung von Bearbeitungsspuren 18.6-20
Orientierung zu Anlauffarben 18.6-20
Befestigungsschellen, Probleme 16.1-8
Befragung, Wartungspersonal bei Problemen 16.4-6
Befund, Optischer 16.1-13
Begriffssicherheit 16.2-9
Beherrschbare Schädigung 15-29
Beilagen, Einstellscheiben 16.3-4
Beispiele, praxisnah 16.1-4
beitragender Einfluss 16.4-4
Beladungseffekt durch Strahlpartikel 18.3-6, 18.8-11
Belastung
Dehnungsgesteuerte 15-29
Kraftgesteuert 15-28
Schaufelfuß 18.9-8
Beleuchtung, Montage 16-18
Benetzbarkeit/Benetzubg 17.3-16
Beeinflussung durch Oberflächenverunreinigung 18.3-11
ZfP 17.3-2
Berstschleuderversuch, Aussagegrenzen 15.2.3-7
Berufsbild 16.1-6
Prüfer 16.1-1
Triebwerksmechaniker 16.1-1
Berylliumlegierungen, Gesundheitsgefahr 16.3-19
Beschädigung
Bewertung 16.1-6
interpretieren 16.2-5
Oberfläche 17.2-2
Beschaffungskosten 17.2-4
Beschichtung 18.8-3
Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22
Aufbringung 18.8-8
Einfluss auf Struktur 18.3-29
Einfluss der Prozessparameter 18.8-11
Einfluss des Grundmaterials 18.8-8
Fehler, Folgeschäden 18.8-3
Haftfestigkeit 18.8-4
Kennzeichnungen 17.4-6
Messung der Haftfestigkeit 18.8-13
Primer 18.8-8
Rissbuildung 18.7-10
Risse in 18.7-6
Schälvorgang 18.8-8
Schwingfestigkeit 17.2-11
Strippen 18.9-19
Temperaturführung 18.8-8, 18.8-12
Übergänge 15-29
Vorwärmung 18.8-12
Zugspannungen 17.2-11
Beschichtungsprozess/-vorgang
Einfluss der Umgebungsbedingungen 18.8-8
Veränderungen 18.8-10
Beschichtungspulver
als Oberflächenverunreinigung 18.3-14
Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Besprechung zum Arbeitsablauf 16-6
Betreiber, Verstöße 16-9
Betrieb, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-14
Belastung, Einfluss Fehlergröße 17.3-2
Eigenschaften, Einfluss von Eigenspannungen 18.4-4, 18.4-29
Einflüsse 16-11
Verhalten
bei Rissen 18.7-26
Einfluss der Rauigkeit 18.1-7, 18.1-12
Einfluss von Graten 18.2-11
Wirkung aggessiver Rückstände 18.3-37
Beurteilung,
Heißteilschäden 16.1-15
Unterlagen 16.1-15
Bewertung von Beschädigungen 16.1-6
Bibliotheksbesuche 15-3
Bildbearbeitung, Problematik als Dokumentation 17.3-26
Bilder 16.2-1
im Überholhandbuch 16.1-13
Bildschirmarbeit, /-arbeitsplatz 15-2
Problematik 17.1-9
Bindefehler 18.7-2
Diffusionsschweißen 18.9-12
durch Verkanten 18.2-4
Binokular 16.1-13
Blasenbildung
in einem Prozessbad, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
von Schichten 18.3-29
Blech, Wandsttärkenabweichung 18.9-1
Blechkonstruktionen 15.2.2-18
Blechzwischenlage, Auflagefläche 18.1-25
Blei
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Lötrissigkeit 18.3-27
Bleiband 18.3-4
Anschmelzung durch 18.3-24
Oberflächenverunreinigung 18.3-14
Blind Spots bei Ultraschallprüfung 17.3-9
Bling-Konstruktionen 15-37
Blisk

© Axel Rossmann - Turbo-Consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Maßabweichung 18.9-1
Mistuning 18.9-6
Schwingung 18.9-6
Blue Etch Anodizing (BEA) 18.3-30, 18.5-8, 18.6-19
BMCE. Siehe Base Maintenance Certifying Engineer
Bohrlochmethode, Mesung von Eigenspannungen 18.4-40
Bohrung
Oberflächenbeschädigung 16.2-5
POD 17.3-5
Stromkontakt 18.6-3
Bohrverfahren
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-13
für Kühlluftführung 18.9-11
Bolzen von Kupplungen 16.3-8
Bombierung, Schaufelfußauflage 18.9-8
Bornitrid, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Boroskop
Inspektion, Schaufelbeschäduigung im Verdichter 16.1-18
Überprüfung, Überwachung 16.3-14
Brennende Schmelztropfen 18.6-7
Brennkammer
Einfluss von Rauigkeit 18.1-12
Gehäuse
aufreißen 16.2-10
Flansch 16.2-12
Versprödung durch Ni-Cd 18.3-24
Brinelling 18.5-9
Brinelling Pit. *Siehe* Verschleißgrübchen
Bronzen, Lötrissigkeit 18.3-27
Bruch
abfangen 15.2.3-17
einer Welle, Vermeidung durch Lageranordnung 15-42
Bruchfläche
Auswertung, aufgebrochener Risse 18.7-13
Mikroskopische Untersuchung 18.7-13
Bruchgefüge, Anriss 18.7-13
Bruchmechanik 15-17
Bruchstückgröße, Eingfluss von Clappern 15-26
Brünieren 18.1-18
von Getriebezahnrädern 18.1-20
Büchsendeckeleffekt 18.9-17
Burr. *Siehe* Grat

C

C-Faser verstärkte Keramiken 15.2.2-3
CAD. *Siehe* Computerbasiertes Konstruieren
Ccarbon impact 15.2.2-19
Certifying Staff 16.1-6. *Siehe auch* Prüfer: Berufsbild
Chargen-Nr 17.4-1
Chargiergestelle, Wärmespannungen 18.4-37
Chatter marks. *Siehe* Rattermarken
Chemische Abtrag, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Chemische Auflösung, Rissbildung 18.7-2
Chemische Beschichtungen
Eigenspannungen 18.4-11
Messung 18.4-40
Wirkung von Druckeigenspannungen 18.4-25
Chemische Verfahren, Topografie 18.1-18
Chemische Bindung 18.8-4
Chlorhaltige Lösungsmittel, Bruch einer Stahlwelle 18.7-21
Chlorverunreinigung, Drahtbalg 18.3-34
Clapper, Einfluss auf Bruchstückgröße 15-26
CMB. *Siehe* Comuterbasiertes Konstruieren,
Commission. *Siehe* Anweisung
Complacency. *Siehe* Selbstüberschätzung
Computationally based design. *Siehe* Comuterbasiertes Konstruieren,
Computer Aided Design/Comuterbasiertes Konstruieren 15-2, 15-4
Constant Speed Drive 16.1.1-15
Containment, fasertechnisches 15-13, 15.2.3-12
Contributing Factor. *Siehe* beitragender Einfluss
Cr-Basis-Legierungen 15.2.2-3
Cr-Schicht
Eigenspannungen 18.4-11
Eigenspannungsmessung 18.4-42
Risse 18.7-6
Crack initiation life. *Siehe* Inkubationszeit: Rissbildung
CSD. *Siehe* Constant Speed Drive

D

Damage Tolerant Design 15-7, 15-16, 15-18, 15-22, 15-35, 17.2-1
Konzept 15.2.2-10
von Rotorscheiben 15-37
Dämpfung integraler Bauteile 15-25
Data-Matrix Kennzeichnung (2D-) 17.4-12
Datenbanken 15-3
Dauerfestigkeit, Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Definition
Abweichung 17.1-11
Adhäsion 18.8-1, 18.8-4
Eigenspannungen 18.4-2
Fähigkeitskennwert 17.1-11
Haftfähigkeit 18.8-1
Haftfestigkeit 18.8-1
Kohäsion 18.8-1, 18.8-4
Nacharbeit 17.5-1
Prozessbreite 17.1-11
Qualität 17.1-1
Riss 18.7-2
Rissanzeige 18.7-1

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

von Fachbegriffen 16.4-1
Dehnungsbehinderung 15-29
Eigenspannungen 18.4-34
Dehnungsgesteuerte Belastung 15-29
Delayed cracking. *Siehe* Verzögerte Rissbildung
Demonstrationsversuch 15.2.3-7
Zyklische Lebensdauer 15.2.3-7
Diagnose, Probleme 16.1-6
Dichtwirkung einer Auflagefläche 18.1-10
Diffusion
Versprödung durch Kadmium 18.3-24
von Oberflächenverunreinigunen 18.3-13
Diffusionsschicht/-beschichtung
Abdeckungen 18.3-43
Einfluss der Schichtdicke 18.7-4
Empfindlichkeit 18.7-4
Rissbildung 18.7-11
Schädigung durch Verschmutzung 18.3-20
Sprödigkeit 18.7-4
Diffusionsschweißen
Bindefehler 18.9-12
Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss von Maßänderungen 18.9-15
Verfahren 18.9-12
Diffusionsverbindung, Fehler 15-40
Diffusionsvorgänge, Fremdmetall Verunreinigungen 18.3-22
Direct Part Marking Identification 17.4-1, 17.4-12
Dirty Dozen 16.4-3
Dokumentation 16.2-7
in der Wartung 16-6
Problematik der Bildbearbeitung 17.3-26
visueller Befunde 17.3-26
von Schäden 15-4
ZfP-Befund 17.3-2
Dokumente 17.1-5
Eigenschaften 17.1-5
Interpretieren 16.1-6
Dokumentieren einer Wartung 16.1.1-15
DPM, DPMI. *Siehe* Direct Part Mark; Direct Part Mark Identification
Drehbearbeitung, Riefen 18.1-15
Drehmomentschlüssel, Zugänglichkeit 15-40
Drehriefen, Schwingbruch eines Spannbolzens 18.1-22
Druckeigenspannungen 17.2-9, 18.4-1
an der Oberfläche 18.4-19
Auswirkung bei dünnen Querschnitten 18.4-20
Bauteilverhalten sicherer 18.4-25
Einfluss des Abbaus auf Überholintervalle 18.4-33
Entschärfen einer Oberflächenbeschädigung 18.4-25
in konvexen Flächen 18.4-27
Schutz gegen Spannungsrisskorrosion 18.4-25
Schutz gegenüber Oberflächenschädigungen 18.4-19
Wirkung bei chemischer Beschichtungen 18.4-25
Wirkung bei galvanischer Beschichtung 18.4-25
Drücken (Blechverformung) 18.1-18
Druckluft, Abblasem mit 18.3-5
Druckrost. *Siehe* Fretting
Dual Property, Turbinenräder 18.9-12
Durchflussmessung 18.3-40
Durchschlupf, ZfP 17.3-2
Durchströmte Querschnitte, Verschmutzung 18.3-17

E

E-Modul, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-16
ε-Schicht, Nacharbeit 17.5-10
EA. *Siehe* Entscheidungsanalyse
EB-Schweißen, Fügespalt 18.9-17
ECM. *Siehe* Elektrochemische Bearbeitung
Nacharbeit, Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-13
Eddy Current Inspection. Siehe Wirbelstromprüfung
Edelrost. *Siehe* Fretting
EDM. *Siehe* Funkenerosion
EDV-Einsatz. 16-12
Effusionskühlung 15.2.2-19
Turbinenschaufeln 15.2.2-3
Eiffelturmeffekt 17.3-30
Eigenspannung/-en 18.4-1
Abbau durch Glühen 18.4-32
als Wärmespannungen 18.4-37
Arten. Mikro-, Makro- 17.3-34
aus den Schmiedeprozess 15.2.2-8
Auslösen von Maßänderungen 18.4-1
Auswirkung auf Turbinenrad 18.4-29
Auswirkung auf Zahnräder 18.4-29
Auswirkung in Gehäusen 18.4-29
Begrenzung beim Fertigungsprozes 18.4-35
bei Rückfederung 18.4-35
Chemische Schicht 18.4-11
Cr-Schicht 18.4-11
Definition 18.4-2
Dehnungsbehindertes System 18.4-34
durch Richten 18.5-22
durch Thermisches Spritzen 18.4-10
durch Verformungsverfahren 18.4-13
durch Verspannung 18.4-38
Einfluss auf Betriebseigenschaften 18.4-4, 18.4-29
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.4-7
Einfluss auf die Haftfestigkeit 18.4-26
Einfluss auf Passungen 18.4-2
Einfluss auf Spannungsrisskorrosion 18.4-26
Einfluss auf Wasserstoffversprödung 18.4-26
Einfluss der Festigkeit 18.4-16
Einfluss der Montage 18.4-14

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Einfluss der Steifigkeit 18.4-9
Einfluss der Temperaturverteilung 18.4-31
einfluss der Verfestigung 18.4-16
Einfluss der Wärmedehnung 18.4-16
Eifluss der Wärmeleitfähigkeit 18.4-17
Einfluss der Werkstoffeigenschaften 18.4-16
Einfluss des Abkühlens 18.4-31
Einfluss des Aufheizens 18.4-31
Einfluss des Betriebs 18.4-14
Einfluss des E-Modul 18.4-16
Einfluss des Querschnitts 15.2.2-8
Einfluss von Gefügeveränderungen 18.4-17
Einfluss von Inhomogenitäten 18.4-17
Einfluss von Nachgiebigkeit 18.4-9
Entstehung bei Wärmebehandlung 18.4-12
Entstehungn durch Richtvorgänge 18.4-38
Funkenerosion 18.4-11
galvanische Schicht 18.4-11
galvanischer Beschichtung 17.3-34
Härteschicht 18.4-10
I.-, II.-, III.-Art 18.4-2
in faserverstärktem Titanl 18.4-14
in FVK 18.4-14
in Kanten 18.4-21
in Rohrleitungen 18.4-38
in Rotorscheiben 18.4-14
in Turbinenschaufel 18.4-14
in Umfangsrichtung 17.2-16
in Wärmedämmschicht 18.4-14
Keramische Schichten 18.4-10
Messung 17.3-27, 17.3-34, 18.4-1, 18.4-40
in chemischen Schichten 18.4-40
in Cr-Schicht 18.4-42
in Galvanischen Schichten 18.4-40
in Ni-Schicht 18.4-42
mit Bohrlochmethode 18.4-40
mit Neutronenbeugung 17.3-34
mit röntgenografischer Methode 17.3-34, 18.4-40
Modell 18.4-4
Ni-Schicht 18.4-11
Rückschluss aus Almenintensität 17.3-34
schädigende Wirkung 18.4-25
Segmentierungsrisse 18.4-10
sichereres Bauteilverhalten 18.4-25
Umlagerung 18.9-17
Umlagerung bei Abtrag 18.4-13
Verzug 18.4-2
vom Gießen 18.4-13
vom Kugelstrahlen 18.4-9
vom Strahlen 18.4-9
von Fertigungsverfahren 18.4-7
Wärmebehandlung 18.4-29
Warmfestigkeit 15.2.2-8
Wirkung
äußerer Kräfte 18.4-2
von Wärmespannungen 18.4-9
Zerspanen 18.4-7
Zusammenhang mit Almenintensität 18.4-40
Zustand 15-29
Eigenspannungsabbau
durch Relaxation 18.4-2
durch Rissbildung 18.4-2
Spannungsarmglühen 18.4-34
Einatmen giftiger Medien 16.3-18
Einbetten, Oberflächenverunreinigung 18.3-3
Eindringprüfung 17.3-8
Benetzbarkeit 17.3-2
Einfluss der Fehlstelle 17.3-14
Einfluss von Handcreme 17.3-17
Einfluss von Silikonöl 17.3-17
Einfluss von Silkon 18.3-10
Einfluss von Sprays 17.3-17
Hintergrundfluoreszenz 17.3-19
Hintergrundfluoreszenz durch Riefen 18.1-18
Nachweis eines übersehen Risses 18.7-13
Remover 17.3-20
Rissöffnung durch Temperaturzyklus 17.3-16
Eindrücke
Späne 18.5-1
Ursachen 18.5-19
Einfluss
auf Spannungsrisskorrosion 18.7-17
beitragender (Definition) 16.4-4
Eingießen 18.5-2
Eingussmasse, Rissbildugnin Turbinenschaufel 18.3-32
Einkristallwerkstoff, Schlagzähigkeit 15.2.2-14
Einlaufbelag/-schicht 18.8-3
Beschädigung bei Montage 16.3-13
Elastomere 18.8-3
Lot 18.8-3
Metallfilze 18.8-3
Silikongummi 18.8-3
Thermische Spritzschichten 18.8-3
Einsatzhärtung/-schicht 18.9-13
Schwingriss 18.7-6
Einsparungen, Wartungspersonal 16.1.1-1
Einzelfall 15.2.2-10
Eisen. *Siehe* Fe-haltiger Abrieb
Elastische Bälge, Probleme 16.1-8
Elastizitätsmodul. *Siehe* E-Modul, Einfluss auf Rissbildung 18.7-6
Elastomere
Einlaufschichten 18.8-3
Schichtablösung 18.8-4
Electrical arc-out. *Siehe* Lichtbogen
Electrical Pitting. *Siehe* Schmelzkrater
Electro Chemical Milling (ECM) 18.5-13
Elefant Tail (Gratbildung) 18.4-22

© Axel Rossmann - Tube consult
als Schulungsunterlagen mit Lizenz

Elektrische Funken 18.6-13
schädigende Wirkung 18.6-13
Überhitzung 18.6-3
Elektrische Verfahren, Überhitzung 18.6-3
Elektrochemische Bearbeitung/Verfahren
Entgraten 18.2-15
Kurzschluss 18.6-14
Funkenbildung 18.6-17
Schwingermüdung 18.5-13
Elektrodenbefestigung, Überhitzung 18.6-3
Elektronenmikroskopische Untersuchung. *Siehe* REM
Elektronenstrahl, Schädigung durch Schmelzperlen 18.6-13
Elephant Tail (Grattyp) 18.2-7
Engineering orders. *Siehe* Arbeitskarten
Englische Sprach, Kenntnisse 16.1.1-9
Enschäumungsmittel 17.3-17
Entfettungsbad
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Rissbildung 18.7-17
Spannungsrisskorrosion an Titanlegierungen 18.3-35
Verschleppung 18.3-5
Entgraten 18.2-2, 18.2-15
Abrasives Strahlen 18.2-15
Elektrochemische Verfahren 18.2-15
Kosten 18.2-8
ungünstig 18.2-9
Verfahren 18.2-15
Entlackungsbad, Rissbildung 18.7-19
Entlastungsbohrungen 15-29
Entlüftungen, Verunreinigungsquelle 18.3-5
Entschäumungsmittel, Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Entscheidungsfindung, Technologieentwicklung 15.2.3-2
Entscheidungsträger 15.2-10
Entstaubungsbohrung, Verschmutzung 18.3-18
Entwicklung
Aufgaben des Anwenders 15.2.3-4
der Tiebwerkstechnik 15.2-6
Militärische 15.2-1
Risiken 15.2-4
Risiko 15.2.2-1
Sicherung durch Revisionen 15.2.3-22
Technologische 15.2-1
Übertragung in die Serie 18.7-25
von Grundlagen 15.2.3-4
von Halbzeug 15.2.2-2, 15.2.3-4
zeitlicher Verlauf 15.2-9
Entwicklungspartner 15.2.3-4
Entwicklungsprozess 15.2-5
Entwicklungsrichtung 15.2-3
Entwicklungsrisiko 15.2.3-1
Erfahrungshorizont 15.2.3-9
FVK-Bauteile 15.2.3-11
minimieren 15.2.3-4
Entwicklungsschritte, revolutionäre 15.2-1
Entwicklungsstrategie 15-15
Entwicklungszyklus, Aufwandsverlauf 15.2.3-3
EO. *Siehe* Arbeitskarten
Erfahrung 16-5, 16.1.1-1
als Voraussetzung 16.1-6
bei ZfP 17.3-20
Lebensdauerabschätzung 15-19
Übertragung von 15-2
Wartungspersonal 16.1-15
Erfahrungshorizont, Entwicklungsrisiko 15.2.3-9
Erfahrungsmangel 17.3-19
Erfahrungsträger 15-6
Ausscheiden 15-6
Bestimmung des Nachfolgers 15-6
ErgoNomic Audit Programme (ERNAP) 16-13
Formblätter 16-13
Erkennbarkeit
Kennzeichnungen 16.3-4
Nabenriss 15-37
Ermächtigung von Personal 16.1-6
Ermüdung
Auswirkung auf Wartung 16-6
Personal 16-10
ERNAP. *Siehe* ERgoNomic Audit Programme
Erosion
Einfluss der Rauigkeit 18.1-11
T-Schaufel 16.1-13
Erprobung
Fertigung 17.1-10
von Verfahren 18.7-25
Zerspanungsvorgänge 17.1-14
Errors. *Siehe* Irrtümer
Erwartungshorizont, Einfluss auf ZfP 17.3-19
ES. *Siehe* Expertensytem
Evolution einer Technologie 15.2-11
Evolutionäre Verbesserungen 15.2.2-1
Exception. *Siehe* Ausnahme
Expert systems. *Siehe* Expertensytem 15-5

F

Facharbeiter
Beitrag zur Qualität 17.1-8
Motivation 17.1-8
Prozessüberwachung 17.1-8
Fachbegriffe
Begriffssicherheit 16.1-2
Fehler, Probleme 16.4-3
Fachbibliothek 15-3
Fachkenntnis/Fachkunde 16.1.1-1, 16.2-9
Fachliche Anforderungen 16-4
Fachliteratur für freigabeberechtigtes Personal 16.1-8

© Axel Rossmann - Turbo consult als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fachpersonal 15.2.2-18
FADEC. *Siehe* Full Authority Digital Engine Control
Fähigkeiten
des Personals 16-1
Kennwert 17.1-11
Definition 17.1-11
Fail Safe Verhalten 15.2.3-15, 16-19, 16.3-1
durch aufteilen von Funktionen 15-42
Fail-Safe-Design 15-16
Failure Mode and Effects Analysis 15.2.3-2. *Siehe* Schwachstellenanalysen
Falsches Brinelling (False Brinelling) 18.5-9, 18.5-15, Siehe auch Fretting
Falte (Fehlstelle) 18.7-2
Fan-Modul, Problem beim Anbauen 16.3-12
Fanrotor
fixieren 16.1-2
Schaufeln aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) 15.2-10, 15.2.2-15
Farben
Kennzeichnung mit 17.4-9
Oberflächenverunreinigung 18.3-13
Fasen von Kanten 18.2-3
Faserrichtung in metallischem Werkstoff 18.1-8
Fasertechnische/faserverstärkte Werkstoffe 15.2-7
Kunststoff 15.2.2-3
Metalle 18.9-19
Schadenstoleranz 15-26
Verzug 18.9-19
Fault Isolation Handbook 16.1.1-15
Fe-haltiger Abrieb, Schädigung durch 18.3-6
Fehler
Eigenschaften**,** POD 17.3-7
Geometrie, POD 17.3-7
Größe
Einfluss der Betriebsbelastung 17.3-2
Wachstumsfähige 15-22
in Diffusionsverbindung 15-40
Lage, POD 17.3-7
nicht gefundene 17.3-19
rechtzeitig finden 17.1-7
Risiko minimieren 17.1-6
wachstumsfähig 15.2.2-4
werkstofftypische 15-25
Fehler melden 17.5-6
Fehleranalysen 16.4-3
Wartung 16.4-3
Fehlerart, Einfluss auf POD 17.3-6
Fehlerbeseitigung, wissensbasierter Ansatz 15.2.3-2
Fehlerhafte Montage 16-16
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. *Siehe* FMEA
Fehlertolerante Konstruktion 15-18
Fehlstelle
Einfluss auf die Eindringprüfung 17.3-14
an Kanten 18.2-3
Rissfortschrittsfähige 15.2.2-8
ZfP 17.3-1
zulässige 15-21
Fertigung
auf eine Anstreiffläche 18.1-10
Auswirkung der Auslegung 17.2-4
beeinflusste Rissbildung 18.7-1
Einflüsse, schadensrelevante 18.1-3
Einfluss auf eine Gleitfläche 18.1-10
Einfluss auf Festigkeit 18.7-4
Planung 17.1-20
Risiko bei Optimierung 18.9-2
Schäden
Klärung 18.1-4
Reproduktion 18.7-26
Schwingberlastung 18.5-1
Schwingermüdung 18.5-10
Verbiegen 18.5-1
Verfahren, Eigenspannungen 18.4-7
vorhergehende visuelle Kontrolle 18.3-40
Fertigungsgerechte Konstruktion 17.1-20
Fertigungsparameter, Auswirkung von Änderungen 18.4-7
Fertigungsprozess
Auswahl mit Schwingversuchen 17.2-14
Einfluss auf die Oberfläche 17.2-9
Risiko der Umstellung 18.2-12
Stabiler 17.1-7
Überhitzungen 18.6-2
Überwachung 17.1-16
Werkstückeigenschaften 17.2-7
Festigkeit
belastetes Volumen und Oberfläche 15.2.3-20
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-16
Einfluss der Fertigung 18.7-4
Einfluss der Probengröße 15-21
Einfluss der Ultraschallprüfung 15.2.2-7
Einfluss von Maßabweichungen 18.9-2
Oberflächenabhängigkeit 15.2-7
Volumenabhängigkeit 15.2-7
Festigkeitsabfall, Überhitzung von Kanten 18.2-2
Festigkeitsausnutzung 15-21, 15.2.2-7
Fett, Oberflächenverunreinigung 18.3-4, 18.3-9
Fingernagel als Prüfwerkzeug 18.6-25
Fingerringe, Lötrissigkeit durch Gold 18.3-27
Fingerspitzen ala Prüfwerkzeug 18.6-25
Firmenklima 16-3
Firmenkultur 15-2, 15-3, 15.2.3-2, 16.1-2, 16.2-23
Flansch
Brennkammergehäuse 16.2-12
18.3-4
Verschraubung
Überlastung 16.3-6
Überwindung des Montagewiderstands 16.3-10

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Flanschbohrungen, Versprödung durch Ni-Cd 18.3-25
Fließspuren von Flüssigkeit 18.6-20
Flugsicherheitsbehörden, Homepage 15-3
Flugunfall, Wahrscheinlichkeit 17.1-1
Flüssigkeiten, Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Flussmittelreste
im Triebwerk 18.3-31
Korrosion 18.3-37
FMEA 15.2.3-2. *Siehe auch* Schwachstellenanalysen
Folgeschäden
Abplatzen von Wärmedämmschichten 18.8-4
Beschichtungsfehler 18.8-3
Formblätter
ERgoNomic Audit Programme 16-13
MEDA 16.4-4, 16.4-6
Formschale entfernen (Guss) Schwingermüdung 18.5-14
Fouling 18.1-8
Freigabe
berechtigtes Personal 16.1-6
des Flugzeugs 16.1.1-14
einer Nacharbeit 18.6-27
Fremde Technologien, Problematik 15-9
Fremdkörpereindruck 16.2-9
Fremdmetalle
Oberflächenverunreinigung 18.3-13
Reaktionen mit Grundwerkstoff 18.3-18
Fremdpartikel, Untersuchung 18.7-13
Fressen. *Siehe* Kaltverschweißen
durch Silbersulfid 18.3-10
Ursachen 18.5-19
Fretting 18.1-10, 18.4-25
an Steckverbindungen 18.1-12
Schaufelfuß 18.9-8
Steckverbindung 18.1-13
Frettingmarken beim Gleitschleifen 18.5-9
Frustration bei Prüfpersonal 16.2-7
Fügebewegungen, Gratbildung 18.2-7
Fügekraft beim Verkanten 18.5-2
Fügespalt, Löten und EB-Schweißen 18.9-17
Führungspositionen, unbesetzt e 16.1.1-1
Führungsverhalten 16-14
Full Authority Digital Engine Control 16.3-4
Funken
Bildung
an Kontaktierung 18.6-14
bei magnetischer Rissprüfung 18.6-14
beim Verchromen 18.6-16
durch Elektrochemische Sonde 18.6-17
Galvanischen Prozesse 18.6-14
Scheibenbruch
nach Verchromung 18.6-16
von Kontaktierung 18.6-19
schlechter Kontakt 18.6-17
Stromdurchgang 18.6-13
von Titanlegierungen 18.6-7
Bildung
an Kontaktierung 18.6-14
bei magnetischer Rissprüfung 18.6-14
beim Verchromen 18.6-16
durch Elektrochemische Sonde 18.6-17
Funkeneinwirkung, Nacharbeit 17.5-3
Funkenerosion
Eigenspannungen 18.4-11
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-13
Funkenschreiber
Kennzeichnung 17.4-9
Schädigung durch 18.6-14
Funktion verstehen bei Entwicklung 15.2-2
FVK. *Siehe* Faserverstärkter Kunststoff
Bauteile, Entwicklungsrisiko 15.2.3-11
Eigenspannungen 18.4-14
Fanschaufeln 15.2.2-15
Verdichterschaufeln, Vorteile 15.2.3-15
Versagensmechanismus 15.2.3-16Verdichterschaufeln, Vorteile 15.2.3-15

G

Galling. *Siehe* Kaltverschweißung/Fressen
Galvanik, Luftverunreinigungen aus 18.3-8
Galvanische Beschichtung
Eigenspannungen 17.3-34
Wirkung von Druckeigenspannungen 18.4-25
Galvanische Prozesse
Einfluss der Rauigkeit 18.1-18
Funken an Kontaktierung 18.6-14
galvanische Schicht
Eigenspannungen 18.4-11
Messung 18.4-40
Haftung 18.8-6
Gate (im Entscheidungsprozess) 15.2-1
Gefüge
Änderung
Massänderung 18.9-13
Volumenänderungen 18.9-13
Besonderheiten im Oberflächenbereich 17.2-2
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-17
Gefügekerbe 15-31
Gehäuse
Ausbeulung 16.1-10
Auswirkung von Eigenspannungen 18.4-29
Probleme 16.1-10
Geräusche am Arbeitsplatz
bei Bearbeitungsvorgang 17.1-19
Kommunikation 16.1.1-9
Gerichtet erstarrte Werkstoffe 15.2.2-12
eutektische 15.2.2-3
Gerichtete Gefüge, Einfluss auf Rauigkeit 18.1-8
Geruch, ungewöhnlicher bei Zerspanung 17.1-19

© Axel Rossmann - Turboconsult
Schulungsunterlagen mit Lizenz

Geschlossenes System 18.4-34
Geschweißte Rotoren 15-25
Nachteile 15-37
Gesichtsmaske in der Fertigung 16.3-19
Gestaltung
Verschlüsse 16.3-4
Verschraubungen 16.3-4
Gesundheitsgefahr/-bedenklich
Asbest 16.3-15
beim Löten 16.3-19
beim Schweißen 16.3-19
Berylliumlegierungen 16.3-19
Blei 16.3-19
Entfettungsbäder 16.3-20
Hilfsstoffe 16-11
Kadmieren 16.3-20
Kadmium 16.3-15
Kupfer-Beryllium-Legierungen 16.3-16
Magnesiumgusslegierungen 16.3-15
Materialien 16.3-1
Nickeloxide 16.3-19
Niedrig schmelzende Legierung 16.3-19
Radioaktive Werkstoffe 16.3-15
Sprayprozesse 16.3-20
Thoriumoxid 16.3-15
Trennmittel 16.3-20
Verfahrensmedien 16-11
Verchromen 16.3-20
Werkstoffe 16-11, 16.3-15, 16.3-17
Wig-Schweißen 16.3-19
Wismut 16.3-19
Wolframelektroden 16.3-19
Getriebezahnräder, Gefahr durch Brünieren 18.1-20
Gewaltbruch 18.4-22
Gewalteinwirkung 18.7-9
Gewaltriss, Arten 18.7-2
Gewohnheiten 16-7
Gießen, Eigenspannungen 18.4-13
Giftige Metalle 16.3-19
Gitterschnitt, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Glanz, Veränderung als Warnzeichen 17.1-19
Gläser 15.2.2-13
Spannungsrisskorrosion 15.2.2-13
Glasperlenstrahlen 16.1-15
als Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Gleitfläche
einer Leitschaufelverstellung 18.1-11
Fertigungseinfluss 18.1-10
Gleitlack an Auflageflächen 18.1-25
Gleitringdichtung
Schädigung durch Grate 18.2-12
Verschmutzung 18.3-17
Gleitschleifen 18.5-9
Gleitvorgänge, im Oberflächenbereich 17.2-2
Glühbehandlung/Glühen. *Siehe* Wärmebehandlung
Abbau von Eigenspannungen
Spannungsarm 18.4-1
Eigenspannungen 18.4-29
Gold, Lötrissigkeit durch Fingerringe 18.3-27
Grafiken in Handbüchern 16-18
Grafit, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Gras (Ultraschallanzeige) 15.2.2-7
Grat 18.2-1, 18.2-7
Aufnahme von Wasserstoff 18.2-4
Aufstehen bei Ätzung 17.3-16
bei galvanischer Beschichtung 18.2-7
beim abrasiven Strahlen 18.2-7
beim Fügen 18.2-7
beim Kugelstrahlen 18.2-7
beim Punktschweißen 18.2-7
beim Reibschweißen 18.2-7
beim Stanzen 18.2-7
beim thermischen Schneiden 18.2-7
durch spanende Bearbeitung 18.2-7
Einfluss auf das Betriebsverhalten 18.2-11
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.2-2, 18.2-11
Einfluss des Kühlschmierstoffs 18.2-8
Entstehung von Unwuchten 18.2-11
Entstehungsarten 18.2-7
in Strömungen 18.2-12
Kerbwirkung 18.2-4
Kühlluftführung 18.9-11
Montageprobleme 18.2-11
Rissbildung 18.2-4
Rückschlüsse vom Aussehen 18.2-1
Schäden an Labyrinthen 18.2-11
Schädigung von Gleitringdichtungen 18.2-12
Strömungsstörung 18.2-11
verlegen von Kraftstoffdüsen 18.2-11
Verletzungsrisiko 18.2-1
Versprödung 18.2-4
Zugeigenspannungen 18.2-4
Grenzrautiefe, Abfall der Schwingfestigkeit 18.1-20
Grenzschnitttiefe 18.5-5
Ground Use Only (GUO) 17.4-2
Grundlagenentwicklung 15.2.3-4
Grundmaterial
Einfluss auf Beschichtung 18.8-8
Einfluss auf die Haftfestigkeit 18.8-11
Gummiabdeckungen in Bädern 18.3-43
Gusseigenspannungen 18.4-13
Gussteilherstellung, Schwingermüdung bei, 18.5-13

H

Haftfähigkeit 18.8-1, 18.8-4
Haftfestigkeit
Auswirkung von Verunreinigungen 18.3-29
Beschichtung 18.8-4
Definition 18.8-1
Einfluss der Bauteilkontur 18.8-9
Einfluss der Rauigkeit 18.1-11

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss der Schichteigenschaften 18.8-8
Einfluss des Grundmaterials 18.8-11
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-26
Galvanische Schichten 18.8-6
Klebeverbindungen 18.8-6
Kügelcheneffekt 18.8-11
Lötung 18.8-7
Messung 18.8-13
Prüfung durch Schälung 18.8-15
Prüfung 17.3-27, 17.3-34
Gitterschnitt 18.8-15
Glasperlenstrahlen 18.8-15
Ritzverfahren 18.8-15
Schlagbiegeversuche 18.8-15
Thermografie 17.3-36, 18.8-15
Thermozyklen 18.8-15
Ultraschallverfahren 18.8-15
Prüfung mit Thermografie
Prüfung mit Ultraschall 17.3-35
qualitative Prüfung einer Schicht 18.8-15
quantitative Messung 17.3-34
Schicht 18.7-6
Thermische Spritzschichten 18.1-17, 18.8-6
Haftfläche, gekrümmte 18.8-8
Halbzeug, Entwicklung 15.2.2-2, 15.2.3-4
Halogene, Wirkung auf Titanlegierungen 18.7-9
Handbuch 16.1-2
Auswirkung von Problemen 16.2-18
Autoren 16.2-15
Bewährung 16.2-17
Entstehungsprozess 16.2-15
Erstellen 16.2-15
iterative Verbesserung 16.2-17
Konstruktion 15-3
Mängel 16.2-20
Rückmeldungen zur Tauglichkeit 16.2-17
Schulung zur Nutzung 16.2-18
Schwächen im Gebrauch 16.2-23
Überholung 15-3
Wartung 15-3
Handcreme, Einfluss auf Eindringprüfung 17.3-17
Handling
Beschädigung von Kanten 18.2-3
Rissbidlung 18.7-22
Handover Book 16.1.1-11
Handschuhe 16.3-19
Handschweiß 18.7-17
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Spannungsrisskorrosion an Ti 18.3-35
Handwaschpasten, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Hardfacts 16-5
Härteanstieg durch Verfestigung 18.4-44
Härteschicht, Eigenspannungen 18.4-10
Härtung
der Oberfläche 17.2-11
von Stählen, Maßänderung 18.9-13
Häufigkeitskurven 17.1-12
Hautcreme, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Hautkontakt, giftige Medien 16.3-18, 16.3-19
Hazardous materials (gefährliche Materialien) 16-11
HCF. *Siehe* Schwingfestigkeit 7.3-27
Verdichterschaufeln 17.3-30
HCOF 16.3-20
Heat Code/Suffix-Nr. *Siehe* Chargen-Nr
Heiße Partikel, Schädigung durch 18.6-7
Heißteil
Kühlwirkung 18.1-13
Schäden 16.1-10
Beurteilung 16.1-15
Verstopfung 18.3-30
Herausreißen aus Spannvorrichtung 18.5-2
Herstelleridentifikation 17.4-1
HFACS. *Siehe* Human Factors Analysis and Classification System
Hilfsstoffe
als Oberflächenverunreinigung 18.3-9
Gesundheitsschädlich 16-11
vertauschen 17.1-13
Hintergrundfluoreszenz 17.3-16, 17.3-19
Eindringprüfung 18.1-18
Hintergrundinformationen 17.1-6
HIP and forge 15.2-10
Hochdruckdrehzahl (Triebwerk) , Veränderung 16.1-18
Hochfahren des Triebwerks 16.1-18
Hochfrequente Felder, Überhitzung 18.6-5
Hochtemperaturschmiermittel, Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Hohlräume, Auffinden von Verunreinigungen 18.3-40
Homepage von Flugsicherheitsbehörden 15-3
Housekeeping 18.3-2, 18.3-14
Hubschrauber, Wartung 16.3-8
Human Factors 16-1, 16-4, 16-5, 16-20, 16.1.1-1, 16.1.1-11, 16.4-1, 17.1-2, 17.1-5, 17.3-19
nich ausreichend berücksichtigt 16.3-6
Schulungen 16-13
Wahrnehmung der Einflussfaktoren 16-13
Human Factors Analysis and Classification System 16.4-3
Human Factors Design Guide 16-11
Hybridbauweisen 15.2-7

I

Ideen, Realisierungsrisiko 15.2.3-6
Information im Rahmen einer Wartung 16.1.1-4
Informationen
Aufnahme 16-2
verlorene 16-5

© Uwe Rossmann - Tutorsoft
Nur als Schulungsunterlage mit Lizenz

Infraction. *Siehe* Übertretung
Inhomogene Bauteile und Werkstoffe
Verzug 18.9-18
Inhomogenitäten, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-17
Inkubationszeit
Rissbildung 15-22, 15-32
Rissfortschritt 17.2-14
Innere Kerben 15-31
Innere Spannungen. *Siehe* Eigenspannungen
Inspector 16.4-4
Inspektion 15-18
gegen Metallspritzer 18.6-25
Intervalle 15-22
Zyklen 16.1.1-16
Instabiler Rissfortschritt. *Siehe* Gewaltbruch
Integrale Bauteile, Dämpfung 15-25
Integrale Proben 17.3-27
Interkristalline Risse 18.7-8
Internal stresses. *Siehe* Eigenspannungen
Internet 15-3
Interpretieren technischer Dokumente 16.1-6
Irrtümer 16.4-3
Irrtumssichere Montage 15-41

J

JAR 66 16.1-8
JAR 145 16.1-6
JAR 147 (Approved Maintenance Training) 16.1-8
Jobrotation 15-7
Journey Logbook 16.1.1-12

K

K, alte Bezeichnung für Rautiefe 18.1-7
Kabel, schadhafte Isolation, Kurzschluss mit Werkstück 18.6-14
Kabelverbindungen 16.3-5
Kadmium /Kadmieren
Diffusion 18.3-24
Gesundheitsgefahr 16.3-15, 16.3-20
LME an Verschraubung 18.3-24
Lötrissigkeit 18.3-27
Versprödung von Titan 18.3-14
Kaltrollen 17.2-17
Einfluss bei Kratzern 17.2-15
Kaltverfestigung 18.4-42
Einfluss auf Schwingfestigkeit 17.2-15
Nachweis 18.4-43
Kaltverschweißen (Fressen) 18.1-10, 18.2-11, 18.5-2, 18.3-3
Kaminaufstieg (Karriere) 15-7
Kanten 18.2-1
Aufheizung bei Bearbeitung 18.2-1
Beeinflussung durch Bearbeitung 18.2-2
Beschädigung beim Handling 18.2-3
Eigenspannugnen 18.4-21
Fehlstellen 18.2-3
Festigkeitsabfall durch Überhitzung 18.2-2
Montageprobleme 18.2-4
Kanten runden 18.2-11
handgeführt 18.2-2
Verdichterschaufel 18.2-15, 18.9-9
KbD. *Siehe* wissensbasiertes Konstruieren
Kenntnisse
der Systeme 16.1-6
von Schadensabläufen 16.1-8
Kennzeichnung
durch Ätzen 17.4-9
Einfluss der Bauteilbelastung 17.4-6
Erkennbarkeit 16.3-4
für die Wartung 16.3-8
Halbzeug 17.1-14
im Bereich von Beschichtungen 17.4-6
Leitungen 16.3-5
Lesbarkeit 17.4-6
mit 2D-Data-Matrix 17.4-12
mit Farben 17.4-9
mit Funkenschreiber 17.4-9
mit Laserverfahren 17.4-9
mit Stiften 17.4-9
Probleme 17.4-5
Rissbildung 17.4-6
Schlagzahlen 17.4-8
Sicherheitsklassen 17.4-2
Verfahren 17.4-8
Vor- und Nachteile 17.4-11
Vibrograf 17.4-9
Vorgaben 17.4-5
Kennzeichnungsfeld 17.4-6
Keramik 15.2-7, 15.2.2-13
C-Faser verstärkte 15.2.2-3
Turbinenschaufeln 15.2-10
Keramische Schichten, Eigenspannungen 18.4-10
Kerbe 17.2-2
Auswirkungen 15-29
im Gefüge 15-31
Innere 15-31
konstruktionsbedingt 15-38
Wirkung 18.7-4
von Graten 18.2-4
Kerbempfindlichkeit 15.2.3-16
Kerbradius 15-29
Kernprodukte 15-15
Klappenverschlüsse 16.1.1-11
Klebebänder/-folie**n** , Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22
Klebeverbindungen, Haftfestigkeit 18.8-6
Klebungen 15-40. *Siehe auch* Bindefehler (Kissing bonds) .
ZfP 15-40

© Axel Rossmann - TU München
Als Schulungsunterlage mit Lizenz

Knackfrosch-Effekt durch Verzug 18.9-17
Knallgeräusch, Verdichterpumpen 16.1-18
Knowledge-based Design. *Siehe* wissensbasiertes Konstruieren
Kohäsion, Definition 18.8-1, 18.8-4
Koks. *Siehe* Ölkoks
Bildung, Überprüfung 16.2-12
Kommarisse 18.7-9
Kommunikation 16-1, 16-14, 16.1.1-2, 16.1.1-11, 17.1-9
Geräusche am Arbeitsplatz 16.1.1-9
in der Konstruktion 17.1-9
Kulturkreise 16.1.1-5
Mangel 16-5
Missverständnisse 16-5
Probleme 16.1.1-5, 16-7
Schichtwechsel 16.1.1-3
Sprachen 16.1.1-5
Kondensation von Metalldampf 18.3-6
Konfliktverhalten 16-15
Konische Bohrungen, Kühlluft 18.9-11
Konstrukteur
Arbeitsumfeld 15-1
Selbstverständnis 15-1, 15-7
Konstruktion 17.1-20
Berücksichtigung der ZfP 17.3-14
Computerbasiert 15-2
fertigungsgerecht 17.1-20
Gestaltung, Ölzufuhr 16.2-12
Mangel, Warnsignale 15-8
notwendige Kommunikation 17.1-9
Schadensminimierende 15-1, 15-2
Wartungsfreundliche 16-1
Wissensbasiert 15-2
Konstruktionshandbuch 15-3, 15.2.3-9
Konstruktionskerben 15-38
Konstruktionsmerkmale, charakteristische 15-14
Konstruktionsphase 16.3-1
Konstruktionsphilosophie, Rissverhalten 15-26
Konstruktionsprinzip
ungewohnte 15-8
verstandene 15-11, 15-12
Kontakt, Kontaktierung
Funken bei Schweißverfahren 18.6-14
Funkenbildung 18.6-14, 18.6-17
Scheibenbruch durch Funken 18.6-19
Kontaktflächen
Einfluss auf Tragfähigkeit 18.1-5
Kugelstrahlen 18.1-10
Reibbeiwert 18.1-10
Schaufelfuß 18.1-9
Kontrolle, vorhergehende visuelle 18.3-40
Kontrolltätigkeit 16-12
Korngröße
Einfluss auf die Ultraschallprüfung 15.2.2-7
Einfluss auf POD 17.3-7
Rissfortschrittsgeschwindigkeit 15-25
Körperliche Vorgaben 16-2
Korrosion
bei Lagerung 17.3-24
durch Flussmittelreste 18.3-37
Kosten, Entgraten 18.2-8
anwendungsbezogen 17.2-4
Minimierung 16.3-1
Krafteinleitung 15.2-7
Kraftgesteuerte Belastung 15-28
Kraftstoffdüse, Verlegen von Graten 18.2-11
Kraftstoffreste, Schädigungsgefahr 16.3-4
Kraftstoffverbrauch 17.2-4
Kranzbereich (Rotorscheibe), Schwachstellen 15-34
Kratzer 17.2-2
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-15
Einfluss auf Titanlegierung 17.2-15
Einfluss des Kaltrollens 17.2-15
Einfluss des Kugelgestrahlens 17.2-15
Kreide, als Oberflächenverunreinigung 18.3-13
Kriechbeschichtung 18.7-10
Kristallgitter, Gleitvorgänge 17.2-2
Kritische Risszähigkeit 15.2.2-7
KSS. *Siehe* Kühlschmierstoff
Kügelcheneffekt /-problem (Metallspritzen) 18.3-4, 18.3-43, 18.8-11
Kugelstrahlen
Druckspannungen 17.2-16
Eigenspannungen 18.4-9
Einfluss bei Kratzern 17.2-15
Gratbildung 18.2-7
Kontaktflächen 18.1-10
Korrektur von Verzug 18.9-17
Rauigkeit 18.1-8
Regeneration 18.4-25
Kühlluftbohrungen
Konische Bohrungen 18.9-11
Versrtopfen durch Grate 18.2-11
Kühlluftführung 18.9-11
Einfluss von Bohrverfahren 18.9-11
Grate 18.9-11
Kühlluftkanal
Verschmutzung 18.3-18
Ätzmittelrückstände 18.3-18
Kühlluftschleier 18.9-11
Kühlschmiermittel /Kühlschmierstoff (KSS)
Haftung 18.1-20
Einfluss auf die Gratbildung 18.2-8
Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Rissbildung 18.7-17
Kühlung
Effusion 15.2.2-19
von Turbinenschaufeln 15.2.2-19

© Axel Grossmann - Turbosconsult
Nur Schulungsunterlagen mit Lizenz

Wirkung, Heißteil 18.1-13
Kulturkreise, Kommunikation 16.1.1-5
Kupfer, Lötrissigkeit 18.3-27
Kupfer-Beryllium-Legierungen, Gesundheitsgefahr 16.3-16
Kupplungen, Verbindungsbolzen 16.3-8
Kurzschluss
Elektrochemische Abtragungsverfahren 18.6-14
Kabel mit Werkstück 18.6-14

L

Labyrinth
Anstreifverhalten 18.1-10
Beschädigung bei Montage 16.3-13
Schaden durch Grate 18.2-11
Labyrinthkegel/-konus 18.9-4
Maßabweichung 18.9-1
Labyrinthspitzen
Abplatzen der Panzerung 18.8-4
Nacharbeit 17.5-7
Lacknebel als Verunreinigung 18.3-8
Lager
Anordnung, Vermeidung des Bruchs einer Welle 15-42
Schaden, montagebedingt 16.3-14
Trockenlauf 16.2-12
Lagerkammer, Modulmontage 16.3-13
Lagerung (Aufbewahrung)
Ablösung von Schichten 17.3-24
ausgebaute Teile 16-18
Korrosion 17.3-24
Rissbildung durch Wasserstoffversprödung 17.3-23
Stress Relief Cracking 17.3-23
Verzug durch Relaxation 17.3-23
Verzug und Rissbildung 17.3-23
Lap. *Siehe* Versäumnis
Laserverfahren für Kennzeichnung 17.4-9
LCC. *Siehe* Life cycle costs
LCF- Beanspruchung, Einfluss der Scheibenverschraubung 15-33
LCF-Festigkeit 17.3-27
Learning by Doing 16.1-2
Lebensdauer
Abschätzung, Einfluss von Erfahrung 15-19
Auslegung 15.2.3-10
Sichere 15-1
bestimmender Schadensmechanismus 15.2.3-7
Nachweise 17.3-27
Lebenszykluskosten 15.2.3-3
Leerlauf 16.1-18
Legierungen
Cr-Basis- 15.2.2-3
Niob-Basis- 15.2.2-3
Lehranstalten, zugelassene 16.1-8
Lehre (Messgerät) 16.3-8
Lehrunterlagen 16.1-4
Leistungsturbine, Überhitzung 16.1-15
Leitschaufelverstellung, Gleitfläche 18.1-11
Leitung
Befestigung mit Klemme 16.3-6
Kennzeichnen 16.3-5
Lesbarkeit einer Kennzeichnung 17.4-6
Lessons learned bei Nacharbeit 17.5-4
Lichtbogen 18.6-17
Überhitzung durch 18.6-3, 18.6-4
Lieferanten, nicht zugelassene 17.1-14
Life cycle costs 15.2.3-2
Line Maintenance Certifying Mechanic 16.1-6
Line Maintenance Certyfying Technician 16.1-8
Liveware 16-2
LMCM. *Siehe* Approved Maintenance Organisations
LMCT. Siehe Line Maintenance Certyfying Technician
LME 18.3-21
LMIE 18.3-21. *Siehe auch* LME
Lochfraß an Turbindnscheiben 18.3-8
Logistikproblem 16-6
Lot als Einlaufschicht 18.8-3
Löten
Einfluss der Topografie 18.1-17
Fügespalt 18.9-17
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Lotpulver /Lötpulver, als Oberflächenverunreinigung 18.3-4, 18.3-14
Lötrissigkeit 18.3-13, 18.3-21, 18.7-9
durch Blei 18.3-27
durch Bronzen 18.3-27
durch Gold 18.3-27
durch Kadmium 18.3-27
durch Kupfer 18.3-27
durch Messing 18.3-27
durch Silber 18.3-27
durch Silberlot 18.3-14
durch Wismut 18.3-27
Metallkombinationen 18.3-27
Lötung 15-31
Auslösen von Lötrissigkeit 18.3-14
Haftung 18.8-7
Low aspect ratio. *Siehe* Wide chord-Schaufeln
Luftfeuchtigkeit, SpRK an Gläsern 15.2.2-13
Luftverunreinigungen aus der Galvanik 18.3-8

M

Magnesiumgusslegierungen, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Magnetische Rissprüfung (Magnetpulver Prüfung, Magnetic Particle Inspection.) 17.3-9
Funkenbildung 18.6-14
Maintenance Administration Manual 16.1.1-14
Maintenance Error Decision Guide 16-13

© MTU Friedrichshafen GmbH
Autor: Pressmann - Tulke/Consult
Stand: 03.2006
Nur für Schulungsunterlagen mit Lizenz

Maintenance Error/Event Decision Aid 16.4-1
Maintenance mishaps. Siehe Wartungsunglücke
Maintenance Resource Management 16-13, 16-4, 16-14
Maintenance Supplement 16.1.1-14
Makroätzung 18.1-20
Makroeigenspannungen 17.3-34
Management
Einfluss auf Wartungsfehler 16.4-1
"strafend" 16.2-23
Mandatory Occurrence Report 16.4-3
Manuelle Prüfung auf Metallspritzer 18.6-25
Markierung. *Siehe* Kennzeichnung:
Forderungen an 17.4-4
Vorgaben 17.4-4
Verfahren, Vor- und Nachteile 17.4-11
Maschinentyp, Wechsel 18.7-25
Massabweichung
an einem Schaufelprofil 18.9-3
Labyrinthkegel 18.9-1
Massabweichungen 18.9-1
an Blisks 18.9-1
Einfluss auf die Bauteilfestigkeit 18.9-2
Verdichterschaufeln 18.9-8
Massänderung
durch Gefügeänderung 18.9-13
Auswirkung bei Reparatur 18.9-19
durch Eigenspannungen 18.4-1
durch Härtung von Stählen 18.9-13
durch Restaustenit 18.9-13
durch Wachsen bei Wälzlagern 18.9-14
Einfluss auf das Diffusionsschweißen 18.9-15
Gefügeänderung bei Ni-Legierung 18.9-13
Maßnahmen
gegen Oberflächenverunreinigungen 18.3-37
gegen Rissbildung 18.7-8
Materialumstellung, Risiken 17.3-9
MEDA 16.1-2, 16.4-3, 16.4-4, 16.4-9. *Siehe auch* Maintenance Error Decision Guide; Maintenance Error/Event Decision Aid
Analyse, Einzelschritte 16.4-6
Formblätter 16.4-4, 16.4-6
Grundmodelle 16.4-9
Users Guide 16.4-4
Merkmale
Anlauffarben 18.6-20
Fließspuren 18.6-20
von Spritzern 18.6-20
Messgeräte 16.3-8
Messing
Lötrissigkeit 18.3-27
Messung
Eigenspannungen 17.3-27, 17.3-34
quantitativ der Haftfestigkeit 17.3-34
Rauigkeits 18.1-6
von Eigenspannungen 18.4-1, 18.4-40
Metalldampf, Kondensation bildet Verunreinigung 18.3-6
Metalle
giftige 16.3-19
Kombinationen, Lötrissigkeit 18.3-27
Metallfilz
Anstreifschicht 18.8-3
Einlaufschicht 18.8-3
Enfluss von Verunreinigungen 18.3-13
Metallografie
Schliff 17.3-28
Untersuchungen 17.3-28
Metallschmelzen 18.7-9
Metallspritzer
Abdeckung gegen 18.6-20
Inspektion gegen 18.6-25
Metalltropfen
Aufschlag 18.3-22
Oberflächenverunreinigungen 18.3-16
Schädigung durch 18.6-9
Mikroeigenspannungen 17.3-34
Mikrofokus Röntgen 17.3-9
Mikrorissbildung, Nacharbeit 17.5-3
Mikroskopische Untersuchung, Bruchfläche 18.7-13
Militärische Triebwerke, Wartbarkeit 16.3-2
Militärischer Entwicklung 15.2-1
Mishaps 16.4-3
Missdeutung von Rissanzeigen 17.3-20
Missverständnisse
bei Kommunikation 16-5
Vermeidung 16.2-2
Mistake. *Siehe* Verwechslung
Mistuning, Blisk 18.9-6
Mitarbeiter, Auswahl 15.2.2-3
Mittelspannungeinfluss 18.1-22
Mittenrauwert Ra 18.1-7
Modellvorstellung einer Schädigung durch Schmelztropfen 18.6-9
Modul
Bauweise 15-8
Montageprobleme 16.3-12
Beschädigung der Niederdruckturbine 16.3-15
Beschädigung im Lagerkammerbereich 16.3-13
Gefahr beim Zusammenschieben 16.3-12
Tausch, Probleme 16.3-4
Trennebene 16.3-13
Montage 15-40
Beleuchtung 16-18
Beschädigung der Niederdruckturbine 16.3-15
Beschädigung eines Turbinenleitapparats 16.3-14
Beschädigung von Einlaufbelägen 16.3-13
Beschädigung von Labyrinthen 16.3-13
Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-14

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

fehlerhaft 16-16
Information 15.2.3-21
Irrtumssicher 15-41
Modul, Lagerschaden 16.3-14
Positionskennzeichnung 17.4-2
Probleme
durch Grate 18.2-11
durch scharfe Kanten 18.2-4
Modulbauweise 16.3-12
Rückölpumpe 16.3-10
Rohrschellen 16.3-4
Wälzlager, Beschädigung 16.3-12
Montagebühne 16-18
Motivation 16-5
der Wartungsmannschaft 16.4-6
Facharbeiter 17.1-8
negativ 16.2-23
Positive 17.5-5
MRM. *Siehe* Maintenance Resource Management
Murphy Prinzip 16-3
Mutter, (Schraube) Sicherung 16.1.1-14
Muttersprache in Arbeitskarten 16.2-6

N

Nabe
Riss, Erkennbarkeit 15-37
Spannungsabsenkung 15-34
Nacharbeit 16.2-5, 18.5-1, 18.9-19
Anstreifflächen 17.5-7
Bedingungen bei Schweißen und Löten 15-40
bei Funkeneinwirkung 17.5-3
bei Mikrorissbildung 17.5-3
bei Rissen 18.7-27
bei Überhitzung 18.6-27
bei Verunreinigungen 17.5-3
Definition 17.5-1
Durchführung 18.6-27
einer e-Schicht 17.5-10
Erfolgsnachweis 18.6-27
Erstellung eines Konzepts 17.5-4
Festlegung 18.6-27
Freigabe 18.6-27
Grenzen 16.2-1
Lessons learned 17.5-4
Probleme 17.5-7
Risiken 17.5-4
Schaden an Turbinenschaufel 18.9-3
Schritte beim Vorgehen 17.5-3
von Labyrinthspitzen 17.5-7
von Oberflächen 17.5-7
von Schaufelspitzen 17.5-7
Voraussetzungen 17.5-3
Zulassung 17.5-4
Nachgiebigkeit, Wirkung auf Eigenspannungen 18.4-9
Nachhaltige Weiterbildung 15-3
Nachweis
einer Überhitzung 18.6-27
Kaltverfestigung 18.4-43
Nahtüberhöhung (Schweißung) 15-30
NDT. (Non Destructive Testing) *Siehe* ZfP
Nebensächlichkeiten, scheinbare 17.1-6
Negative Motivation 17.5-5
Nennmaß 17.1-11
Neutronenbeugung, Messung von Eigenspannungen 17.3-34
Ni-Cd
Versprödung eines Brennkammergehäuses 18.3-24
Versprödung in Flanschbohrungen 18.3-25
Ni-Legierung /Nickellegierung
Einfluss der Zerspanung auf die Schwingfestigkeit 17.2-16
Maßänderung beim Aushärten 18.9-15
Seigerungsätzungen 18.3-30
Volumenänderung 18.9-13
Ni-Schicht
Eigenspannungen 18.4-11
Eigenspannungsmessung 18.4-42
Nichtmetallische Bindung 18.8-4
Nickeloxide, Gesundheitsgefahr 16.3-19
Niederdruckturbine, Problem bei Modulmontage 16.3-15
Niedrig schmelzende Phasen, Anschmelzungen 18.3-13
Nietverbindung 16-19
Niob-Basis-Legierungen 15.2.2-3
Nitrierschicht
Rauigkeitseinfluss 18.1-22
Schwingriss 18.7-6
Non Destructive Testing. *Siehe* ZfP
Null Toleranz Prinzip 18.3-37

O

Oberfläche 18.1-7
Aerodynamische „Qualität“ 18.1-5
als Schwachstelle 17.2-2
belastete 15.2.3-20
Beschädigung 17.2-2
Bohrung 16.2-5
Entschärfen durch Druckeigenspannungen 18.4-25
Beschaffenheit, Auffindwahrscheinlichkeit von Fehlern 17.3-19
chemische Beeinflussung 17.2-9
Einfluss auf Schwingfestigkeit 18.1-5
Einfluss der Bearbeitung auf die Schwingfestigkeit 17.2-11
Einfluss der Rauigkeit auf die Reaktivität 18.1-11
Einfluss des Fertigungsprozesses 17.2-9

© Axel Rossmann - Turbo Consult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Einfluss spanender Verfahren 17.2-9
Gefügebesonderheiten 17.2-2
Härtung 17.2-11
Kerben 15-31
Mechanische Beeinflussung 17.2-9
Nacharbeit 17.5-7
Schädigungen, Schutz durch Druck-
eigenspannungen 18.4-19
Spannungen 17.2-2
Verunreinigungen 18.3-1
Maßnahmen 18.3-37
Oxidation durch Stift 18.3-13
Wirkung von Druckeigenspannungen 18.4-19
Oberflächenabhängigkeit der Festigkeit 15.2-7
Oberflächenverunreinigung
Arten 18.3-3
Ätzmitteln 18.3-4
Aufschmierungen 18.3-3
durch Bauarbeiten 18.3-15
durch Hilfsstoffe 18.3-9
durch Schmierstoffe 18.3-9
durch Verschleppung von Medien 18.3-5
Beschichtungspulver 18.3-4, 18.3-14
Bleiband 18.3-14
Bornitrid 18.3-11
Diffusion 18.3-13
durch Abdeckmittel 18.3-11
durch Reinigungsmittel 18.3-11
Einfluss auf die Benetzbarkeit 18.3-11
Entschäumungsmittel 18.3-10
Farben 18.3-13
Fett 18.3-4, 18.3-9
Flüssigkeiten 18.3-4
Fremdmetall 18.3-13
Grafit 18.3-11
Handschweiß 18.3-11
Handwaschpasten 18.3-11
Hautcreme 18.3-11
Hochtemperaturschmiermittel 18.3-11
im Vakuum 18.3-14
in er Umformtechnik 18.3-10
Kadmium auf Titan 18.3-14
Kreiden 18.3-13
Kühlschmierstoffe 18.3-10
Lotpulver 18.3-14
Lötpulver 18.3-4
Metalltropfen 18.3-16
Öl 18.3-9
Pasten 18.3-4
schützende Abdeckungen 18.3-16
schützende Transportbehälter 18.3-16
Silikonöle 18.3-10
Spritzpulver 18.3-4
Staub 18.3-4
Schleifstaub 18.3-16
Stifte 18.3-13
Trennmittel 18.3-11
vom Einbetten 18.3-3
vom Spannen 18.3-3
vom Strahlen 18.3-3
von Bearbeitung 18.3-3
Waschmittels 18.3-11
Oberflächenzustand. *Siehe* Surface Integrity
Ökonomische Überlegungen, Priorisierung 16.1-2
Öl, Oberflächenverunreinigung 18.3-9
Öldüsen, verstopft durch Ölkoks 16.2-12
Ölfilter, Zugänglichkeit 16.3-6
Ölkoks, verstopft Öldüsen 16.2-12
Ölleitung, Korrosion durch Rückstände 18.3-37
Ölmangel 16.2-12
Ölreste, Schädigungsgefahr 16.3-4
Ölverlust, öffenen der Schubdüse 16.3-10
Omission. *Siehe* Unterlassung
Optimierung, Risiko im Fertigungsprozess 18.9-2
Optischen Befund 16.1-13
Organisationsebenen der Wartung 16.4-4
Orientierung, einer Rauigkeit 18.1-5, 18.1-8
Örtliche Aufheizung, Mechanismus der Rissbildung
18.7-14
Outsourcing 15-7
Überwachungsaufwand 16-8
von Wartungsarbeiten 16-8
Warnzeichen und Symptome 16-8
Wartung 16.1.1-9
Oxidation durch Oberflächenverunreinigung mit
einem Stift 18.3-13

P

P-Klemme 16.3-6
PA. *Siehe* Problemanalyse
Panzerung
kermaisch
Abplatzen 18.8-4
Labyrinthspitzen 18.8-4
Paris-Diagramm 18.1-16
Partikel
Schädigung durch heiße 18.6-7
Ursache für Überhitzung 18.6-4
Passdurchmesser, Verkanten 18.2-4
Passflächenkorrosion/Passungsrost *Siehe* Fretting
Passungen
Veränderung durch Eigenspannugnen 18.4-2
Pasten, Oberflächenverunreinigungen 18.3-4
Patentrecherchen 15-3
Pensacolaunfall 18.5-6
Per. ***Siehe*** **Entfettungsbäder: Gesundheitsgefahr**
Spannungsrisskorrosion an Ti 18.3-35
Perchloräthan 18.7-17
Personal

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Ermächtigung 16.1-6
Ermüdung 16-10
Wechsel 16.1.1-1
Personalpolitik 16-4
Pfeifen der Maschine beim Zerspanen 18.5-13
Phasen der Rissbildung 18.4-22
Planung einer Technologieentwicklung 15.2.3-22
Plastische Verformungen
Einfluss auf Schwingfestigkeit 18.5-19
Verbiegen, Auswirkungen 18.5-20
Plattenschwingungen 18.9-4
PN. *Siehe* Teilenummer
POD. *(*Probability of Detection**)** *Siehe* Auffindwahrscheinlichkeit: ZfP
Positionskennzeichnung für Montage 17.4-2
Positive Motivation 17.5-5
Potenzial einer Technologie 15.2.3-6
ppm 17.1-3
Primer, Beschichtung 18.8-8
Proben
Größe, Einfluss auf die Festigkeit 15-21
Integrale 17.3-27
Lage im Werkstück 17.3-28
repräsentative 17.3-30
separat hergestellt 15.2.3-19
Probenorientierung 17.3-28
Problemanalyse 16.4-1, 16.4-3, 16.4-6
Probleme
Befestigungsschellen 16.1-8
bei Kennzeichnung 17.4-5
Diagnose 16.1-6
einer Nacharbeit 17.5-7
elastische Bälge 16.1-8
Flanschverbindungen 16.1-8
Gehäuse 16.1-10
Kommunizieren 16-7
Modultausch 16.3-4
Rohrleitungen 16.1-8
Rückmelden für Handbücher 16.2-15
Spannschlösser 16.1-10
unlösbares 15.2.3-6
Verschraubungen 16.1-10
Zonen, potentielle 15.2.3-22
Process sheet. *Siehe* Arbeitskarte
Produkt, Reife 15.2.3-2
Proof of concept 15.2.3-7
Tests 15.2.2-10
Prooftest 17.3-27
Prospektangaben, Aussage 15.2.3-20
Prozessbäder, Veränderung 17.1-19
Prozessbreite, Definition 17.1-11
Prozessparameter
Risiko bei Änderung 17.3-32
Schwingermüdung durch falsche 18.5-16
Verfolgung 17.1-12
Prozessüberwachung durch Facharbeiter 17.1-8
Prüfbefunde 16.2-1
Prüfbereiche 16.2-1
Prüfen /Prüfung
axf an Verdichterschaufel 17.3-30
Haftfestigkeit qualitativ 18.8-15
Manuelle auf Metallspritzer 18.6-25
mit Fingernagel 18.6-25
als Prüfwerkzeug 18.6-25
mit Fingerspitzen 18.6-25
Technologischen 17.3-29
Thermoermüdung 17.3-29
Visuell auf Metallspritzer 18.6-25
von Ausfallmustern 15-9
Prüfer
Berufsbild 16.1-1
von Luftfahrtgerät 16.1-6
Prüfläufe
Aussage 15.2.3-22
Bewertung 15.2.3-22
Prüflaufteile, Auswertung 15.2.3-23
Prüfpersonal
Frustration 16.2-7
Training 16.2-7
Prüftätigkeit 16-12
PSEF. *Siehe* Strahlüberlappungen
PTFE. *Siehe* Trennmittel: Gesundheitsgefahr
als Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Pulvermetallurgische Scheiben 15.2-10
Pumpgrenze
Abstand, Wide-chord-Schaufeln 15-35
Rauigkeitseinfluss 18.1-8
Pumpstoß 16.1-17
Punktschweißen, Gratbildung 18.2-7
Pyrometer, Schaden durch SpRK 15.2.2-13

Q

Qualität
Beitrag des Facharbeiters 17.1-8
Definition 17.1-1
Mängel, chronische 15-8
Qualitätssicherung 15.2.3-8
Querschnitt
Auswirkung von Druckeingenspannungen 18.4-20
Einfluss auf Eigenspannungen 15.2.2-8

R

Ra. *Siehe* Mittenrauwert
Radioaktive Werkstoffe, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Rapid Protoyping 15-40
Rattermarken 18.5-5, 18.7-9
in Räumnuten 18.5-5
Rattern 18.5-1
Regeneratives 18.5-5
Rupfen 18.5-5

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Rauigkeit 18.1-5, 18.1-6
bei Spannungsgefälle 18.1-20
einer Kugelgestrahlten Oberfläche 18.1-8
Einfluss auf Betriebsverhalten 18.1-12
Einfluss auf das Betriebsverhalten 18.1-7
Einfluss auf das Diffusionsschweißen 18.1-20
Einfluss auf den Wärmeübergang 18.1-12
Einfluss auf die Dauerfestigkeit 18.1-20
Einfluss auf die Haftung von Kühlschmiermittel 18.1-20
Einfluss auf die Pumpgrenze 18.1-8
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.1-20
Einfluss auf die Wärmestrahlung 18.1-12
Einfluss auf die Zerspanung 18.1-20
Einfluss auf eine Brennkammer 18.1-12
Einfluss auf Erosion 18.1-11
Einfluss auf galvanische Prozesse 18.1-18
Einfluss auf Strahlung 18.1-11
Einfluss auf Verdichterschaufeln 18.1-12
Einfluss auf Verformungsverfahren 18.1-18
Einfluss auf Wärmeübergang 18.1-8
Einfluss auf Wirkung einer Nitrierschicht 18.1-22
Einfluss der Haftfestigkeit 18.1-11
Einfluss einer Badströmung 18.1-8
Einfluss von Ätzen 18.1-8
Einfluss von Blasen in einem Prozessbad 18.1-8
Forderungen an ein Schaufelblatt 18.1-7
Grenzen der Messung 18.1-8
Kühlwirkung im Heißteil 18.1-13
Messung 18.1-6
Messrichtung 18.1-7
Mittelspannungeinfluss 18.1-22
Orientierung 18.1-5, 18.1-8
von gerichtetem Gefüge 18.1-8
Wälzlagerlaufbahn 18.1-12
Zeichnungsangaben 18.1-7
zulässig am Schaufelblatt 18.1-27
Rauigkeitsprofil 18.1-6, 18.1-7
Rauigkeitsspitzen
Traglänge 18.1-5
Verklammerung 18.8-6
Räumnuten, Rattermarken 18.5-5
Rautiefe R (früher K)
Reaktionen
mit Fremdmetallen 18.3-18
Verunreinigungen mit Grundmaterial 18.3-4
Reaktivität einer Oberfläche 18.1-11
Reason-Modell 16-1
Recast Layer 17.2-13. *Siehe auch* Wiedererstarrte Zone
Regeneration durch Kugelstrahlen 18.4-25
Reibbeiwert
Auflagefläche 18.1-25
Silbersulfid 18.3-10
von Kontaktflächen 18.1-10
Reibkorrosion, Reibrost.. *Siehe* Fretting
Reibschweißen
Fehler durch Verunreinigung 18.3-30
Gratbildung 18.2-7
Reibverschleiß. *Siehe* Fretting
Reife
einer Technologie 15.2-10
eines Produkts 15.2.3-2
Reinigen, Einfluss von Riefen auf die Badverunreinigung 18.1-18
Reinigungsbäder
Rissbildung 18.7-19
Verschleppung 18.3-5
Reinigungsmittel
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Rissbildung 18.7-17
Reißlackähnliche Rissbildung 18.5-20
Reißlänge. *Siehe* Spezifische Festigkeit
Rekristallisation 15.2.2-12
Relaxation 15-29, 18.4-1, 18.4-2, 18.4-26, 18.4-31, 18.9-18
bei Raumtemperatur 18.9-18
Druckeigenspannungsabbau in Titanlegierung 18.4-33
in dehnungsbehindertem System 18.4-35
REM 17.3-28, 18.7-13. *Siehe auch* Rasterelektronenmikroskop
Repairer 16.1-1
Reparatur, Auswirkung einer Maßänderung 18.9-19
Reparierbarkeit 15-12
Einschätzung 16.1-6
Reproduktion von Fertigungsschäden 18.7-26
Residual stresses. *Siehe* Eigenspannungen
Resonanz
Einfluss der Wandstärke 18.9-4
Frequenz, Verdichterschaufeln 17.3-30
Restaustenit, Maßänderung durch 18.9-13
Restspannungen. *Siehe* Eigenspannungen
Retirement for Cause-Konzept 15-33
Revision in einer Entwicklung 15.2.3-22
Revolutionäre
Entwicklungsschritte 15.2-1
Technologie 15.2-5
Einführung 15-11
Risiken 15.2.3-10
Verbesserungen 15.2.2-1
Richten /-vorgang 18.5-1, 18.7-4
bei Verbiegung 18.5-22
Eigenspannungen 18.4-38, 18.5-22
Rückfedern 18.5-24
von Titanlegierungen 18.5-22
Riefe
aerodynamische Wirksamkeit 18.1-27
an Schaufelkanten 18.1-15
an Wuchtentnahme 18.1-15
an Zuganker 18.1-15

© Axel Bossmann - Turbosconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.1-17
Einfluss auf die Ultraschallprüfung 18.1-18
Einfluss auf ein Vakuum 18.1-17
Einfluss auf Lötung 18.1-17
Einfluss auf ZfP 18.1-18
geschliffene Schaufelfuße 18.1-15
von Drehbearbeitung 18.1-15
Risiko / Risiken
bei Änderung von Prozessparametern 17.3-32
bei "einleuchtenden" Ideen 15.2.3-6
bei Umstellung der Rohteilherstellung 17.3-32
beim Wechsel des Rohteillieferanten 17.3-32
der Unterlassung 15.2.2-1
des Versagens 15.2.2-4
einer Entwicklung 15.2-4, 15.2.2-1
minimieren 15.2.3-4
einer Materialumstellung 17.3-9
einer Nacharbeit 17.5-4
einer Verfahrensumstellung 18.1-9
einer Werkstoff-/Materialumstellung 15.2-4, 17.3-1
steigender Werkstofffestigkeit 15.2.2-6
Umstellung eines Fertigungsprozesses 18.2-12
Riss
Anrissort 18.7-13
Auffindwahrscheinlichkeit in der Fertigung 18.7-26
Betriebsverhalten des Bauteils 18.7-26
Bruchflächenauswertung 18.7-13
Cr-Schicht 18.7-6
Definition 18.7-2
durch Kennzeichnung 17.4-6
Eigenschaften 15-18
Entstehung
unter der Oberfläche 18.4-19
Verständnis des Mechanismus 18.7-26
Entstehungsphasen 18.4-22
Feld 18.7-9
Fortschritt 18.1-16
Abschätzung 15-18
fortschrittsfähiger Fehlstellen 15.2.2-8
Geschwindigkeit
B elastungseinfluss 17.3-2
Korngrößenbahängigkeit 15-25
Inkubationszeit 17.2-14
Spannungsgradient 15-29
stabil 18.4-22
Größe, ZfP-Grenze 18.7-2
in Auflagefläche 18.1-25
in Auflageschichten 18.7-10
in Bereich von Rauigkeitsänderungen 18.7-10
in Beschichtung 18.7-6, 18.7-10
in Diffusionsschicht 18.7-11
Interkristallin 18.7-8
Klaffend 18.7-9
Lage in Verfärbungen 18.7-10
Nacharbeit 18.7-27
Nachweis einer Eindringprüfung 18.7-13
Netzwerk 18.7-9
Prüfung, unterlassene 16.2-5
Schweißnaht 18.7-9
Segmentierungsriss 18.7-6
Transkristallin 18.7-8
Unter einer Spritzschicht 18.4-10
unter Schichten 18.4-26
Verfärbungen 18.7-13
Verhalten, Konstruktionsphilosophie 15-26
Verlauf 18.7-8
Bearbeitungsmerkmale 18.7-9
Wachstum 16.1-10
Einfluss des Umgebungsmediums 15-20
Modus 15-18
Schwellenwert 17.3-2
Threshold 18.1-17
zusammengepresst 18.5-20
zuzwicken 18.7-9
Rissanzeige,
Bewertung 17.3-20
Definition 18.7-1
Missdeutung 17.3-20
Netzwerk 18.7-9
Rissbildung
an Graten 18.2-4
beim Handling 18.7-22
bei Lagerung 17.3-23
bei örtlicher Aufheizung 18.7-14
durch chemische Auflösung 18.7-2
durch den Fertigungsprozess 18.7-1
durch Entfettungsbäder 18.7-17
durch Kühlschmierstoffe 18.7-17
durch Reinigungsmittel 18.7-17
Eigenspannungsabbau 18.4-2
Einfluss auf Bauteilsicherheit 18.7-2
Einfluss des Elastizitätsmoduls 18.7-6
Häufigkeit, Einflüsse auf 15-20
Inkubationszeit 15-22, 15-32
Kennzeichnung 16.1-10
Maßnahmen 18.7-8
Reißlackähnlich 18.5-20
Rückschlüsse 18.7-1
Schadensmechanismus 18.7-1
Spannungsrisskorrrosion in Stahl 18.7-20
Vermeidung 18.7-25
verzögert bei Wasserstoffversprödung 18.7-22
Verzögerte 18.7-22
Rissfeld 18.7-9
beim Verformen 18.1-18
Rissöffnung 18.7-9
durch Ätzen 17.3-16
durch Temperaturzyklus 17.3-16

Riss

© Axel Rossmann - Tutorconsult
Als Schulungsunterlage mit Lizenz

Prüfbarkeit mit Eindringstoff 18.3-10
Rissstopper 15-18
Risszähigkeit 18.1-16
Scheibenwerkstoff 15-37
Ritzverfahren, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Rohrleitung
Eigenspannungen 18.4-38
Probleme 16.1-8
Verbindungen, Anordnung 16.3-4
Rohrschellen 16.3-6
Montage 16.3-4
Rohteil
Herstellung, Risiko bei Umstellung 17.3-32
Lieferanten, Risiko beim Wechsel 17.3-32
Rollnahtschweißen, Gratbildung 18.2-7
Röntgen
Auffinden von Verunreinigungen in Hohlräumen 18.3-40
Mikrofokus Verfahren 17.3-9
Röntgenografische Messung von Eigenspannungen 17.3-34, 18.4-40
Röntgenprüfung 17.3-9
POD 17.3-4
Rotating Stall (Rotierende Strömungsablösung) 16.1-17
Rotoren (Turbomaschine) , geschweißt 15-25
Rotorschaufel, Schwingung 18.9-6
Rotorscheiben
Bearbeitungsriefen 18.1-15
Büchsendeckeleffekt 18.9-17
Damage-Toleranz 15-37
Eigenspannugen durch Betieb 18.4-14
RPZ. *Siehe* Risikoprioritätszahl
Rückfedern 18.5-20
beim Richten 18.5-24
Entstehung von Eigenspannungen 18.4-35
von Titanlegierungen 18.5-24
Rückmeldung 16.4-6
Rückölpumpe
Montageproblem 16.3-10
Zugänglichkeit 16.3-10
Rückschlüsse
aus Abweichungen 17.5-4
aus einem Schadensbild 18.1-3
Rückstände
Korrosion an Ölleitung 18.3-37
Wirkung im Betreib 18.3-37
Rundgang bei Schichtübergabe 16.1.1-2
Rupfen 18.5-5
RZ. *Siehe* Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers; Risikozahlen, ***Siehe*** **Mittenrauwert**

S

SA. *Siehe* Situationsanalyse
/ Konzept 17.2-1
Safe Life 15-16
Design 15-17, 15-22
Konzept 15.2.2-10
Sauerstoffaufnahme, Titanlegierungen 18.7-10
Säuredämpfe 18.3-5
Scanning Electron Microscope (SEM) . *Siehe* Rasterelektronenmikroskop (REM)
Schaden
Abläufe, Kenntnisse 16.1-8
äußere Merkmale 16.1-8
Ausmaß, Kennzeichnung, Beschreibung 16.1-10
Ausgelöst im Triebwerk 18.3-30
Bauteileigenschaften 16.1-10
Dokumentation 15-4
Eigenspannungen 18.4-25
Fertigungseinflüsse 18.1-3
Heißteile 16.1-10
Ursachen, Identifikation 16.1-10
Verhütung, Teamgedanke 18.1-4
Schadensbild, Rückschlüsse 18.1-3
Mechanismus 16-11, 18.7-25
bei rissbildung 18.7-1
bei Überhitzung 18.6-7
lebensdauerbestimmender 15.2.3-7
neuer Technologien 15.2.2-2
Voraussetung für Schadensminimierung 18.1-3
Schadensminimierung 15.2.3-10
Konstruktion 15-1, 15-2
Voraussetzung 18.1-3
Schadenspotential 17.1-6
Schadensrisiko minimieren 15-25
Schadenstolerantes
Schadenstoleranz 15.2.2-10
Fasertechnischer Werkstoffe 15-26
Vorgehen 15-16, 15-18
Schädigung
Ausmass einer Überhitzung 18.6-27
beherrschbare 15-29
durch Funkenschreiber 18.6-14
durch heiße Partikel 18.6-7
durch Metalltropfen 18.6-9
durch Schmelzperlen von Schweißverfahren 18.6-13
durch Tropfen vom Trennen 18.6-9
durch Überhitzung 18.6-1, 18.6-7
elektrischer Funken 18.6-13
fertigungsbedingt im Triebwerk 18.3-30
Frühzeitig erkennen 15.2.3-23
Grate, Schäden an Wälzlagern 18.2-11
Identifikation, Bewertung 16.2-9
Im Bereich von Anlauffarben 18.6-20
Mechanismus idntifizieren 16.1-6

© AeroStrmann - Turbinenconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Schälung
organische Beschichtung 18.8-8
Schichtprüfung 18.8-15
Scharniere lösen 16.3-8
Schaufel
Blatt
Aerodynamische Anforderungen 18.1-27
Rauigkeitsforderungen 18.1-7
zulässige Rauigkeit 18.1-27
Bruch, Änderung von Fertigungsparametern 18.4-7
Fuß
Auflageanforderungen 18.9-6
Belastung 18.9-8
Bombierung der Auflage 18.9-8
Fretting 18.9-8
Kontaktflächen 18.1-9
Kanten, Riefen 18.1-15
Profil, Einfluss einer Maßabweichung 18.9-3
Schleifriefen 18.1-15
Spitze,
Anstreifverhalten 18.1-10
Nacharbeit 17.5-7
Scheibe (Rotor)
Bruch
durch Kontaktierungsfunken 18.6-19
Funke bei Verchromung 18.6-16
pulvermetallurgische 15.2-10
Verbindung, Bajonettverschluss 15-34
Verschraubung, Einfluss auf die LCF- Beanspruchung 15-33
Verzug, Abhilfen 18.9-17
Werkstoff, Risszähigkeit 15-37
Scherbänder, adiabatische 18.5-8
Schicht
Abblättern 18.3-29
Ablösung
bei Lagerung 17.3-24
Schwingermüdung 18.5-14
Auswirkungen 18.5-20
Blasenbildung 18.3-29
Dicke
Schwingfestigkeit 18.7-7
Verhalten einer diffusionsschicht 18.7-4
Eigenschaften, Einfluss auf die Haftfestigkeit 18.8-8
Haftfestigkeit 18.7-6
organischer 18.8-7
Messung der Haftfestigkeit 18.8-13
Prüfung auf Schälung 18.8-15
qualitative Prüfung der Haftfestigkeit 18.8-15
Riss unterhalb 18.4-26
Übergabebesprechung 16.1.1-6
Schichtübergabe 16.1.1-2 /-wechsel 16-1, 16.1.1-1, 16.1.1-2
Kommunikation 16-14, 16.1.1-3
Rundgang 16.1.1-2
Wartungsöffnungen 16.1.1-13
Wiederaufnahme 16.1.1-3
Zeitmangel 16.1.1-3
Schlagbeanspruchung 15.2.2-14
Schlagbiegeversuche, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Schlagzähigkeit von EK-Werkstoffen 15.2.2-14
Schlagzahlen 17.4-8
Schleierkühlung 18.9-11
Schleifen
Schwingermüdung 18.5-13
Titanlegierung 17.2-12
Schleifrisse 18.7-9
Schleifstaub, Oberflächenverunreinigungen 18.3-16
Schleuderversuche, zyklische 17.3-29
Schliff, metallografisch 17.3-28
Schmelzkrater 16.2-9
Schmelzperlen
auslösen von Schwingrissen 18.6-13
bei Schweißverfahren 18.6-13
Maßnahmen gegen 18.6-20
Schmelzschweißen, Schädigung durch Tropfen 18.6-9
Schmelztropfen
brennende 18.6-7
Überhitzung 18.6-5
Schmiedeprozess, Eigenspannungen 15.2.2-8
Schmierstoffe, Oberflächenverunreinigung 18.3-9
Schöpfendes Verhalten in Prozessbädern 18.6-20
Schrumpf, Sinterteile 18.9-18
Schubdüse, öffenen wegen Ölverlust 16.3-10
Schubverlust, öffnen der Schubdüse 16.3-10
Schulung
Human Factors 16-13
Programme, Wartung 16-8
Unterlagen 16-20
Wartungspersonal 16-17
Schwachstelle
Analyse 16.4-1
im Kranzbereich 15-34
Oberfläche 17.2-2
Schweißung 15-38
Vermeiden 15-10
ZfP 17.3-1
Schwarzfärbung, Silber 18.3-10
Schweißen /Schweißung
Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22
Eigenspannungen, Verzug 18.4-9
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Schwachstellen 15-38
Überhitzung 18.6-2
Zündstellen 18.6-14
Verfahren
Funken an Kontaktierung 18.6-14

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

schädigende Schmelzperlen 18.6-13
Schweißnaht, Rissbildung 18.7-9
Schweißspritzer, Abdeckungen 18.3-43
Schwellenwert für Risswachstum 17.3-2
Schwingberlastung in der Fertigung 18.5-1
Schwingbruch
durch T-Leitschaufelschaden 16.1.1-16
eines Spannbolzens 18.1-22
Ölpumpenwelle 16.3-10
Verdichterrotorschaufeln 16.1-18
Schwingermüdung
Bearbeitungsfläche 18.1-10
bei elektrochemischer Bearbeitung 18.5-13
bei Gussteilherstellung 18.5-13
bei Ultraschallbearbeitung 18.5-14
bei Ultraschallreinigung 18.5-10, 18.5-15
bei Zerspanung 18.5-13
beim Schleifen 18.5-13
beim Überschleifen von Schaufelspitzen 18.5-13
beim Ultraschallreinigen 18.5-16
beim Vibrationshämmern 18.5-14
beim Wasserstrahlschneiden 18.5-14
beim Zerspanen 18.5-13
in der Fertigung 18.5-10
Riss 18.7-2
durch Schmelzperlen 18.6-13
durch schmelzperlen 18.6-13
Einsatzschichten 18.7-6
Nitrierschicht 18.7-6
Schichtablösung 18.5-14
Ultraschallreinigen von Turbinenschaufeln 18.5-17
Schwingfestigkeit
bearbeiteter Oberflächen 17.2-11
Beschichtung 17.2-11
ECM-Nacharbeit 17.2-13
Eiffelturmeffekt 17.3-30
einer Oberfläche 18.1-5
Einfluss der Bearbeitungsrichtung 18.1-14
Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss der Tiefe einer Riefe 18.1-17
Einfluss des Zerspanungsprozesses 17.2-15
Einfluss einer Kaltverfestigung 17.2-15
Einfluss einer Verfahrensänderung 17.2-12
Einfluss einerVerfestigung 18.4-19
Einfluss eines Grats 18.2-2
Einfluss plastischer Verformungen 18.5-19
Einfluss von Bohrverfahren 17.2-13
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-7
Einfluss von Funkenerosion 17.2-13
Einfluss von Graten 18.2-11
Einfluss von Kratzern 17.2-15
Grenzrautiefe 18.1-20
im Bereich von Überhitzungen 18.6-1
Schichtdicke 18.7-7
Verdichterschaufeln 17.3-30
Zerspanung Ni-Legierung 17.2-16
Schwingung
Blisk 18.9-6
Mistuning 18.9-6
Verdichterrotorschaufel 18.9-6
Verhalten, Widechord-Schaufeln 15-26
Schwingverschleiß. Siehe Fretting
Schwingversuche, Auswahl von Fertigungsprozessen 17.2-14
Schwitzwasserbildung bei Stillstand 18.7-20
Seam weld. Siehe Rollnahtschweißen
Segmentierung
Risse 18.4-10, 18.7-6
Wärmedämmschicht 18.8-12
Seigerungsätzen 18.1-20
Ni-Legierungen 18.3-30
Selbstbewusstsein 16-7
Selbstmotivation 16-6
Selbstsichernde Elemente, Wiederverwendbarkeit 16.3-4
Selbstüberschätzung, Auswirkung 16-6
SEM. Siehe Rasterelektronenmikroskop (REM)
Sensibilisierung eines Werkstoffs 17.2-9
Serial Number. *Siehe* Stück-Nummer
Serientechnologie, Evolution 15.2-11
Service Bulletin 16-9
Service Letter 16-9
SHEL-Modell 16-1, 16-2
Shot Peening. *Siehe* Kugelstrahlen
Show Stopper 15.2.2-1, 15.2.2-3, 15.2.3-6
Show-Versuche 15.2.2-2
Sichere Lebensdauer 15-1, 15-17
Sicherheitsaspekt, Technologieeinsatz 15.2.3-13
Sicherheitsklasse, Kennzeichnung 17.4-2
Sicherheitskonzept 15-14
Sicherung, Mutter/Schraube 16.1.1-14
Sicherungsdraht, Verbot 16.3-4
Silber 18.3-4
Anlauffarben 18.3-10
Lötrissigkeit 18.3-27
Schwarzfärbung 18.3-10
Sulfidation 18.3-8
Silberlot, Auslösen von Lötrissigkeit 18.3-14
Silbersulfid
auslösen von Fressen 18.3-10
Reibbeiwert 18.3-10
Silikongummi, Einlaufschicht 18.8-3
Silikonöl
Einfluss auf Eindringprüfung 17.3-17
Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Siliziumkarbid in Turbinenschaufel 18.3-18
Silkon, Einfluss auf die Rissprüfung 17.3-16
Sinterteile, Schrumpf 18.9-18
Situation
einschätzen 16.1-8, 16-14
erkennen 16-15
nicht bewusst 16.1.1-4

© Axel Bossmann - Turboconsult
Schulungsunterlagen mit Lizenz

Skizzen 16.2-1
in Handbüchern 16.2-16
Slip. *Siehe* Versehen
SN. Siehe Stück-Nummer
Softfacts 16-5
Spacer (Zwischenring) , Belagabplatzung 18.8-4
Späne
Abfuhr, unzureichend 18.5-6
Anlauffarben 17.1-18
Aussehen 17.1-17
Brechen 17.1-17
Eindrücken 18.5-1
verschweißen 18.5-1
Spanende Bearbeitungn /Verfahren
Einfluss auf die Oberfläche 17.2-9
Grate 18.2-7
Überhitzung 18.6-2
Spänestau 18.5-6
Spannbolzen *(*Zuganker), Schwingbruch 18.1-22
Spannen 18.5-2
Oberflächenverunreinigung 18.3-3
Überlastung 18.5-1
Vorrichtung 18.5-2
Spannkräfte 18.7-4
Spannschlösser, Probleme 16.1-10
Spannungen in der Oberfläche 17.2-2
Spannungsabsenkung in Nabe 15-34
Spannungsarm Glühen 18.4-1
Spannungsarmglühen 15-29, 18.4-34
Vorgänge beim 18.4-38
Spannungsgefälle/ -gradient 15-28
Auswirkung der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss auf Rissfortschritt 15-29
Spannungskonzentration 15-29, 18.1-16
Spannungsniveau, Auswirkung 17.2-4
Spannungsrisskorrosion 18.7-4
an Gläsern 15.2.2-13
an Titanlegierungen durch Entfettungsbad 18.3-35
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-26
Einflüsse auf 18.7-17
Schutz durch Druckeigenspannungen 18.4-25
Stahlwelle 18.7-19
Titanlegierung 18.3-29
Wasserstoffinduziert 18.7-20
Spannvorrichtung, Herausreißen des Werkstücks 18.5-2
Spezifikationsangaben, Einfluss auf ZfP 17.3-22
Spezifische Festigkeit (Reißlänge) 15.2-7
Sprachen, Kommunikation 16.1.1-5
Sprayprozesse /Sprays
Einfluss auf Eindringprüfung 17.3-17
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Spritzbedingungen, Geometrieeinflusss 18.8-3
Spritzer 18.6-20
Abdeckung gegen 18.6-20
Maßnahmen gegen 18.6-20
Merkmale 18.6-20
Spritzpulver, Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Spritzschicht
darunter liegender Riss 18.4-10
Einfluss der Topografie auf die Haftfestigkeit 18.1-17
SpRK (Spannungsrisskorrosion) 18.1-20
Sprödbruch 15.2.2-7
Spröde Schicht
Auswirkung 18.5-20
Entstehung bei Titanlegierungen 18.5-25
Spröde Werkstoffe 15.2.3-20
Festigkeit 15.2.3-20
Sprödigkeit, Al-Diffusionsschichten 18.7-4
Spülen (Prozessbad), Einfluss von Riefen auf die Badverunreinigung 18.1-18
Stabiler Fertigungsprozess 17.1-7, 17.1-11
Stabiler Rissfortschritt 18.4-22
Stahl, Rissbildung durch Cl 18.7-19
Standardisierung, Verbindungselemente 16.3-4
Stanzen, Gratbildung 18.2-7
Statisch unbestimmte Bauweisen 15-26
Statistik, Ursachen von Wartungsfehlern 16.4-1
Staub
Ablagerungen durch Unachtsamkeit 18.3-6
als Oberflächenverunreinigung 18.3-4
Staubsauger, ausblasen von Staub 18.3-6
Steckverbindung
Fretting 18.1-12, 18.1-13
Kabel 16.3-5
Steifigkeit
einer Bearbeitungsmaschine 17.1-14
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-9
Steifigkeitssprung 15-29
Stick-Slip-Effekt 18.5-5
Stifte
Kennzeichnung 17.4-9
Oberflächenverunreinigung durch 18.3-13
Strahlen
Abdeckungen 18.3-42
Beladung 18.8-11
Druckspannungen bei abrasivem 17.2-16
Eigenspannungen 18.4-9
mit Glasperlen 16.1-15
Oberflächenverunreinigung 18.3-3
Strahlenergie, Überhitzung 18.6-4
Strahlgut / -partikel
Beladungseffekt 18.3-6
Verunreinigung 18.3-6
Strahlüberlappungen 18.4-22
Strahlung (Wärme, Licht) , Einfluss der Rauigkeit 18.1-11
Strategisches Denken, Technologieentwicklung 15.2.3-22

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Streckgrenzenverhältnis 15.2.2-7
Stress (Personal) 16-7
Stress Relief Cracking 18.4-26
bei Lagerung/Aufbewahrung 17.3-23
Stress relief heat treatment. *Siehe* Spannungsarm Glühen
Strippen, Ablösen einer Beschichtung 18.9-19
Stromdurchgang, Funken 18.6-13
Stromführung, Kontaktierung 18.6-19
Stromkontakt, Überhitzung 18.6-3
Strömungsstörung
Ausbruch T-Leitschaufel 16.1.1-16
durch Grate 18.2-11
im Verdichter 16.1-17
Structural Integrity 15-7, 15-17
Stück-Nummer 17.4-1
Sulfidation 18.3-10
durch Silber 18.3-8
Surface Integrity 17.2-1
Surge. Siehe Verdichterpumpen
Symptome ungünstiger Wartungseinflüsse 16-6
Synergie, Chance für Verbesserungen 18.1-4
Systeme, Kenntnisse der 16.1-6

T

Tagesrhythmus 16-6
Teamarbeit 16-3, 16-14
Mängel 16-6
Teamgedanke, Schadensverhütung 18.1-4
Technischer Anriss 18.7-3
Technologie
abhängig von Verfahrenskontrolle 15.2.3-8
Aufwand 15.2-9
charakteristische Schwächen 15.2.3-13
Einführung revolutionärer 15-11
Entwicklung
Entscheidungsfindung 15.2.3-2
Planung 15.2.3-22
Strategisches Denken 15.2.3-22
Zulassungsbehörden 15.2.3-14
Evolution 15.2-11
fehlender Zwischenschritt 15.2.3-7
fehlendes Verfahren 15.2.3-7
Fremde 15-9
mit wachstumsfähigen Fehlstellen 15.2.3-8
Reife 15.2-10
revolutionäre 15.2-5
Risiken revolutionärer 15.2.3-10
Risiken v 15.2.3-10
Schadensmechanismen 15.2.2-2
verstandene 15.2.3-18
Warnzeichen bei der Einführung 15-13
Technologieeinsatz, Sicherheitsaspekt 15.2.3-13
Technologischen Prüfung 17.3-29
Technologischer Entwicklung 15.2-1
Teilemangel 16-6
Teilenummer 17.4-1
Temperatur
Anlauffarben 18.7-13, 18.6-19
Auslösen von Schäden im Triebwerk 18.3-30
Temperaturführung
bei Beschichtung 18.8-12
organische Beschichtung 18.8-8
Verteilung bei Wärmebehandlung 18.4-31
Temperaturzyklus vor Eindringprüfung 17.3-16
Textur (Werkstoffgefüge) 18.1-5
Thermische Spritzschichten
Einlaufschichten 18.8-3
Haftung 18.8-6
Thermisches Schneiden, Gratbildung 18.2-7
Thermisches Spritzen
Abpraller 18.3-43
Eigenspannungen 18.4-10
Haftfestigkeit 18.1-17
Thermoermüdung 18.7-9
Prüfung 17.3-29
Thermoermüdungsschäden 16.1.1-16
Thermografie 18.3-40
Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Prüfung der Haftfestigkeit 17.3-36
Thermozyklen, Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Thoriumoxid, Gesundheitsgefahr 16.3-15
Threshold. *Siehe* Schwellenwert
Risswachstum 18.1-17
Tiefkühlung (bei Wärmebehandlung) 18.9-13
Tiefziehen 18.1-18
TIG. (Tungsten Inert Gas), *Siehe* Wig-Schweißen
Titanhydride 18.7-19
Titanlegierung
Anlauffarben 18.6-19
BEA-Ätzen 18.3-30
Druckeigenspannungsabbau durch Relaxation 18.4-33
Druckspannungen beim Zerspanen 17.2-16
Einfluss von Kratzern 17.2-15
Entstehung spröder Schichten 18.5-25
faserverstärkt, Eigenspannungen 18.4-14
Funken 18.6-7
heißeTropfen 18.6-5
LME durch Kadmium an Verschraubung 18.3-24
Richten 18.5-22
Rissbildung 18.7-17
durch Entlackungsbad 18.7-19
Sauerstoffaufnahme 18.7-10
Schleifen 17.2-12
Spannungsrisskorrosion 18.3-29
Spannungsrisskorrosion durch Handschweiß 18.3-35
Versprödung 18.7-19
durch Kadmium 18.3-14
Schweißnaht, durch Fe 18.3-6

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Rückfedern 18.5-24
Warmfestigkeit 15-22
Wirkung von Halogenen 18.7-9
Titanrohre, Nachteile 15-31
Topografie 18.1-5, 18.1-7, 18.1-8, 18.1-17
durch Ätzen 18.1-18
durch Chemische Verfahren 18.1-18
einer Kugelgestrahlten Oberfläche 18.1-8
Einfluss auf das Löten 18.1-17
Einfluss auf die Belastbarkeit 18.1-25
Haftfestigkeit einer Spritzschicht 18.1-17
Zerspanung 18.1-14
Tragfähigkeit, Einfluss der Kontaktfläche 18.1-5
Traglänge von Rauigkeitsspitzen 18.1-5
Tragverhalten einer Auflagefläche 18.1-7
Training von Prüfpersonal 16.2-7
Transkristalliner Riss 18.7-8
Transportbehälter gegen Oberflächen-verunreinigungen 18.3-16
Transportvorrichtungen, Verschleppung von Verunreinigungen 18.3-5
Trennen, Entstehung von Tropfen 18.6-9
Trennmittel 17.3-17
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Trennschleifen, Überhitzung 18.6-2
Trennung
Bindefehler 18.7-2
Falten 18.7-2
Überlappung 18.7-2
Tribokorrosion. Siehe Fretting
Trichloräthan / Tri 18.7-17. *Siehe* Entfettungsbäder
Spannungsrisskorrosion an Titanleg. 18.3-35
Triebwerk
fertigungsbedingte Schädigungen 18.3-30
Technik, Entwicklungen 15.2-6
Mechaniker, Berufsbild 16.1-1
Reparierer, Berufsbild 16.1-1
Triebwerkstyp, Wartbarkeitskontrolle 16.3-2
Trockenlauf, Lager 16.2-12
Tropfen
vom Schmelzschweißen 18.6-9
von Titanlegierungen 18.6-5
Tropfenschlag 18.3-22
Turbineneintrittstemperatur 16.1-18
Turbinenleitapparat, Beschädigung bei der Montage 16.3-14
Turbinenleitschaufel 16.1.1-16
Ausbruch 16.1.1-16
Turbinenrad
Austausch beiÜberhitzungsverdacht 16.1-13
Auswirkung von Eigenspannungen 18.4-29
Dual Property 18.9-12
Turbinenschaufel
Bruch durch Eingussmasse 18.3-32
Bruch durch Wismut 18.3-32
Effusionsgekühlte 15.2.2-3
Eigenspannungen durch Betreib 18.4-14
Einfluss der Rauigkeit 18.1-12
Erosion 16.1-13
Kühlung 15.2.2-19
Rauigkeitseinfluss 18.1-12
Schaden durch Nacharbeit 18.9-3
Schwingermüdung beim Ultraschallreinigen 18.5-17
Verschmutzung 18.3-18
Zinn-Wismut-Verunreinigung 18.3-21
Turbinenscheibe
Bruch an Zündstelle 18.6-17
Lochfraß 18.3-8
Ultraschallprüfung 17.3-13

U

Übergabebesprechung bei Schichtwechsel 16.1.1-6
Überhitzung
Ausmass einer Schädigung 18.6-27
Auswirkungen 18.6-1
bei elektrischen Verfahren 18.6-3
bei Schweißung 18.6-2
durch heiße Partikel 18.6-4
durch hochfrequente Felder 18.6-5
durch Lichtbogen 18.6-4
durch Schmelztropfen 18.6-5
durch Strahlenergie 18.6-4
Einfluss auf Schwingfestigkeit 18.6-1
Elektrodenbefestigung 18.6-3
Entstehung von Zugeigenspannungen 18.6-7
Fertigungsprozesse 18.6-2
Leistungsturbine 16.1-15
Nacharbeit 18.6-27
Nachweis 18.6-27
örtlich 18.6-1
Schadensmechanismus 18.6-7
Schädigende Wirkungen 18.6-1
Schädigung 18.6-7
Spanende Bearbeitung 18.6-2
Trennschleifen 18.6-2
Ursachen 18.6-1, 18.6-4
Werkstoffschädigung 16.1-13
ZfP-Nachweis 18.6-27
Überholbarkeit, Maßnahmen 16.3-4
Überholhandbuch 15-3, 15-8, 16.1-13, 16.2-5, 16.2-12
Bildmaterial 16.1-13
Mängel 16.1-15
Überholintervalle, Druckeigenspannungsabbau 18.4-33
Überlappung
durch spanende Bearbeitung 18.2-15,
Risswirkung 18.7-2

© Axel Possmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Überlastung
duch Spannen 18.5-1
durch Werkzeugbruch 18.5-1
Rattern 18.5-1
Überlastunge
in der Fertigung 18.5-1
Überprüfung
auf Koksbildung 16.2-12
Überprüfung,
mit Boroskop 16.3-14
Überschleifen von Schaufelspitzen
Schwingermüdung 18.5-13
Übertemperatur
Verdacht auf 16.1-13
Übertretung 16.4-3
Überwachung
eines Fertigungsprozesses 17.1-16
ultra-high tensile strength 15.2.2-9
Ultraschall 17.3-8
Prüfung der Haftfestigkeit 17.3-35
Ultraschallbearbeitung
Schwingermüdung 18.5-14
Ultraschallkontur 17.3-13
Ultraschallprüfung 17.3-8
Blind Spots 17.3-9
Einfluss auf die Festigkeitsnutzung 15.2.2-7
Einfluss der Korngröße 15.2.2-7
Einfluss von Riefen 18.1-18
geeignete Kontur 17.3-13
Gras 17.3-9
POD 17.3-5
Turbinenscheibe 17.3-13
Ultraschallreinigen
Schwingermüdung 18.5-16
Ultraschallreinigung
Schwingermüdung 18.5-10, 18.5-15
Ultraschallverfahren
Haftfestigkeitsprüfung 18.8-15
Ultrasonic Inspection. ***Siehe*** **Ultraschallprüfung**
Umetikettieren 17.1-13
Umformtechnik
Oberflächenverunreinigung 18.3-10
Umfüllen
Medien 17.1-13
Umgebungsbedingungen
Einfluss auf Beschichtungsvorgang 18.8-8
Umgebungseinflüsse 15.2.2-7
Umgebungsmediums
Einfluss auf das Risswachstum 15-20
Unachtsamkeit
Staubablagerungen 18.3-6
Ungenauigkeiten
an Verdichterschaufeln 18.9-8
United Kingdom Flight Safety Committee 16.4-3
Unterlassung 16.4-3
Unterlassungsrisiko 15.2.2-1
Unterschriften 16.2-7
Untersuchung
von Fremdpartikeln 18.7-13
Untersuchung von Wartungsfehlern, formblattgestützt 16.4-4
Unwuchten
Verkanten 18.2-4
Zusammenhang mit Graten 18.2-11
Ursachen
für Überhitzung 18.6-4
für Überhitzungen 18.6-1
Ursachen für Wartungsprobleme, Wahrscheinlichkeit 16.4-3
Ursachenermittlung
Aussage von Häufigkeitskurven 17.1-12
Ursachenmodell 16-2, 16-3
Users Guide 16.4-1
MEDA 16.4-4

V

Vakuum
Einfluss von Riefen 18.1-17
Oberflächenverunreinigung 18.3-14
Verfahren im 18.1-17
Veränderung als Warnzeichen
Glanz 17.1-19
Prozessbäder 17.1-19
Verbesserungen
Aufwand 15.2-11
aus Synergie 18.1-4
bei Wartungsproblemen 16.4-6
Evolutionäre 15.2.2-1
Revolutionäre 15.2.2-1
Verbiegen 18.5-20
in der Fertigung 18.5-1
Richten 18.5-1, 18.5-22
Verbindungen zur Flugzeugzelle 16.3-1
Verbindungselemente
Standard 16.3-4
Standardisierung 16.3-4
Verchromen
Funkenbildung 18.6-16
Gesundheitsgefahr 16.3-20
Verdichter
Gehäuse, Verzug 18.9-17
Leitapparat, Schädigung durch Schmelzperlen 18.6-13
Leitschaufeln, verstellbare 18.9-6
Rotor, Abdeckung gegen Spritzer 18.6-22Rotorschaufeln, Schwingbruch durch Pumpen 16.1-18Strömungsstörungen 16.1-17
Schaufel
axf-Prüfung 17.3-30
Auswirkung von Ungenauigkeiten 18.9-8
Eiffelturmeffekt 17.3-30

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Einfluss der Rauigkeit 18.1-12
Einflüsse auf die Resonanzfrequenz 17.3-30
Einfluss der Zerspanungsrichtung 18.1-14
Kanten
Entgraten 18.2-15
V errundung 18.9-9
Kanten runden 18.2-15
Vorteile von FVK 15.2.3-15
Wareneingangsprüfung 17.3-30
Scheibe, Bruch an Kontaktierung 18.6-19
Verdichterpumpen (Strömungsabriss) 16.1-17
Bauteilüberlastung 16.1-17
Identifizieren 16.1-15
Knallgeräusch 16.1-18
Verfahren
Änderung, Einfluss auf Schwingfestigkeit 17.2-12
Entwicklung 17.1-10
Erprobung 18.7-25
bauteilspezifisch 17.1-14
fehlendes für eine Technologie 15.2.3-7
Kontrolle 15.2.3-8
Medien, gesundheitsschädlich 16-11
Umstellung, Risiken 18.1-9
zum Entgraten 18.2-15
Verfärbung
Risslage 18.7-10
Rissfläche 18.7-13
ungewöhnliche 16.1-8
Verfestigung 17.2-9
Einfluss auf
die Schwingfestigkeit 18.4-19
Eigenspannungen 18.4-16
entfernen 17.2-9
Härteanstieg 18.4-44
Mechanismus 18.4-42
Schwingfestigkeit 17.2-11
Zonen 15-29
Verformungen
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 18.5-19
Verformungsverfahren
Eigenspannungen 18.4-13
Einfluss der Rauigkeit 18.1-18
Verhalten von Vorgesetzten 17.5-5
Verhaltensnormen 16-7
Verkanten 18.5-2
entstehung von Bindefehlern 18.2-4
Entstehung von Unwuchten 18.2-4
Fügekraft 18.5-2
Passdurchmesser 18.2-4
Verlauf
Riss 18.7-8
Verletzungsrisiko
Grat 18.2-1
Vermeidung
von Rissbildung 18.7-25
Verrunden
Kontur 18.2-15
von Kanten 18.2-3
Versagen
Kriterium 15-18
Mechanismus
gutmütiger 15.2.3-16
von FVK 15.2.3-16
Risiko 15.2.2-4
in der Auslegung 15.2.3-10
Risiko 15.2.2-4
in der Auslegung 15.2.3-10
werkstoffspezifisches 15.2.3-16
Versäumnis (engl. lap) und - Verwechslung 16.4-3
Verschleißgrübchen 16.2-9
Verschleppung (von Medien)
durch Reinigungsbäder 18.3-5
Entfettungsbäder 18.3-5
mit Transportvorrichtungen 18.3-5
Oberflächenverunreinigungen 18.3-5
Verschlüsse
Gestaltung 16.3-4
Sicherung 16.1.1-11
Verschmutzung / Verunreinigung
Aufschmieren von Fremdmetall 18.3-22
Ansaugen vom Triebwerk 18.3-8
Anschmelzungen durch Fremdmetall 18.3-22
angesaugter Lacknebel 18.3-8
Ätzmittelrückstand 18.3-34
auffinden in Hohlräumen 18.3-40
Auswirkung
auf die Haftfestigkeit 18.3-29
auf Diffusionsschutzschicht 18.3-20
Diffusionsvorgänge durch Fremdmetall 18.3-22
durch Abdeckungen 18.3-42
durch Handschweiß 18.3-35
durch Kondensation von Metalldampf 18.3-6
durch Wismut 18.3-21
durch Zinn 18.3-21
Durchströmter Querschnitte 18.3-17
einer Entstaubungsbohrung 18.3-18
Enfluss auf Metallfilz 18.3-13
Entstehungsursachen 18.3-2
Fehler auslösen an Reibschweißung 18.3-30
Herkunft 18.3-1
identifizieren 18.3-39
Nacharbeit 17.5-3
Kühlluftkanäle 18.3-18
Transport durch Abgase 18.3-5
Turbinenschaufel 18.3-18
Siliziumkarbid in 18.3-18
von Gleitringdichtungen 18.3-17
von Oberflächen 18.3-1
von Strahlgut 18.3-6
von Wälzlagern 18.3-17

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage mit Lizenz

Verschraubungen
Gestaltung 16.3-4
Probleme 16.1-10
Verschweißen (Kaltverschweißen, Fressen)**,** Späne 18.5-1
Versehen (Begriff) 16.4-3
Verspannung, Entstehung von Eigenspannungen 18.4-38
Versprödung
an Graten 18.2-4
Brennkammergehäuse durch Ni-Cd 18.3-24
Diffusion von Kadmium 18.3-24
Ti- Schweißnaht durch Fe 18.3-6
Titanlegierung 18.7-19
Titanlegierung durch Sauerstoffaufnahme 18.7-10
Verständnis von Anweisungen 16.2-2
Verstärkungen, Faserorientierung 3-D 15.2.2-4
Verstopfung von Heißteilen 18.3-30
Verstöße (Begriff) 16.4-3
Arten: Routine, Übertretung *Siehe* Wartungs-unglücke
Hauptarten 16.4-3
Versuch, ausreichend betriebsnah 15.2.3-18
Vertauschen
Medien, Bauteile, vorrichtungen. Werkstoffe 17.1-13
von Vorrichtungen 17.1-13
Verursacher bei Wartungsproblemen 16.4-4
Verwechslung 16.4-3
unsichere Identifikation 17.4-2
Verwendbarkeit, Entscheidung über 18.6-27
Verzögerte Rissbildung 18.7-22
Verzug 18.9-17
bei Lagerung 17.3-23
durch Schweißeigenspannungen 18.4-9
Eigenspannungen 18.4-2
Faservertärkter Metalle 18.9-19
Faserwerkstoffe 18.9-19
im Betrieb 18.4-38
Inhomogene Bauteile und Werkstoffe 18.9-18
Korrektur durch Kugelstrahlen 18.9-17
Relaxation bei Lagerung 17.3-23
Verdichtergehäuse 18.9-17
Vibrationshämmern, Schwingermüdung 18.5-14
Vibrografkennzeichnung 17.4-9
Violations. *Siehe* Verstöße
Visuelle Kontrolle/ Prüfung 17.3-8 /Befund
auf Metallspritzer 18.6-25
Dokumentation 17.3-26
vor Fertigungsschritt 18.3-40
Volumen
Ahängigkeit der Festigkeit 15.2-7
Änderung
durch Gefügeänderung 18.9-13
Nickellegierung 18.9-13
belastetes 15.2.3-20
Vorbereitung für ZfP 17.3-2
Vorgesetzte, Verhalten 17.5-5
Vorrichtung 16.3-8
Aufschmierungen 18.3-6
Spannen 18.5-2
vertauschen 17.1-13
Vorschriften 17.1-5
Angaben 17.3-22
Eigenschaften 17.1-5
Vorwärmung, Beschichtung 18.8-12

W

Wachstumsfähige Fehlstellen,/Fehlergröße 15-22
Technologie mit 15.2.3-8
Wahrscheinlichkeit
eines Flugunfalls 17.1-1
eines Werkstofffehlers 15-24
von Kausalitäten 16.4-9
von Ursacehn für Wartungsprobleme 16.4-3
Wälzlager
Beschädigung bei Montage 16.3-12
Laufbahnrauigkeit 18.1-12
Maßänderung durch Wachsen 18.9-14
Schäden durch Grate 18.2-11
Verschmutzung 18.3-17
Wandstärke
Einfluss auf Resonanz 18.9-4
Einfluss von Abweichungen 18.9-4
Wandsttärke
Abweichung bei Blechen 18.9-1
Wareneingangsprüfung 17.1-6, 17.3-27, 17.3-28
Verdichterschaufeln 17.3-30
Wärmebehandlung
Abbau von Eigenspannungen 18.4-32
Eigenspannungen 18.4-29
Entstehung von Eigenspannungen 18.4-12
Temperaturverteilung 18.4-31
Vorgänge beim Spannungsarmglühen 18.4-38
Wärmedämmschicht
Abplatzungen
Folgeschäden 18.8-3, 18.8-4
Eigenspannungen 18.4-14
Segmentierung 18.8-12
Segmentierungsriss 18.7-6
Wärmedehnung, Einfluss auf Eigenspannungen 18.4-16
Wärmekapazität, Einfluss auf Zerspanung 17.1-15
Wärmeleitfähigkeit, Eifluss auf Eigenspannungen 18.4-17
Wärmespannungen 18.4-37, 18.7-4
Eigenspannungen 18.4-9
in Chargiergestellen 18.4-37
Wärmestrahlung, Einfluss der Rauigkeit 18.1-12
Wärmeübergang, Einfluss der Rauigkeit 18.1-8,

© Axel Rossmann - Turbo consult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

18.1-12
Warmfestigkeit
Titanlegierungen 15-22
Warmfestigkeiten
Eigenspannungen 15.2.2-8
Warnaufkleber 16.1.1-11
Warnsignale
Konstriktionsmangel 15-8
Warnzeichen
Bei der Einführung einer Technologie 15-13
Wartbarkeit
Anschlüsse 16.3-4
Gesichtspunkte 16.3-2
Maßnahmen 16.3-4
militärische Triebwerke 16.3-2
Wartung 15-8
Ablenkung 16-6
Arbeitskarten 16.1.1-7
Auswirkung von Ermüdung 16-6
Beleuchtung 16-18
Dokumentationen 16-6
Fehleranalysen 16.4-3
Hubschrauber 16.3-8
Information 15.2.3-21, 16.1.1-4
Irrtümer, Fehler 16.2-2
notwendige Kennzeichnungen 16.3-8
Organisationsebenen 16.4-4
Outsourcing 16.1.1-9
Personal, Befragung bei Problemen 16.4-6
Schulungsprogramme 16-8
Verstöße 16-9
Wartungsfehler
Einfluss des Managements 16.4-1
Statistik der häufigsten Ursachen 16.4-1
Wartungsfreundliche Konstruktionen 16-1
Wartungshandbuch 16-18
Wartungshandbücher 15-3, 16.2-19
Brauchbarkeit 16.2-19
Empfehlungen aus der Praxis 16.2-21
Qualität für die Nutzung 16.2-19
Wartungsklappen 16.1.1-10
Wartungsliste 16.1.1-14
Wartungsmannschaft
Motivation 16.4-6
Wartungsöffnungen 16.1.1-10
Schichtwechsel 16.1.1-13
Wartungspersonal
Einsparungen 16.1.1-1
Erfahrung 16.1-15
Schulung 16-17
Weiterbildung 16.1-4
Wartungspersonals
Ausbildung 16.1-4
Wartungsprobleme
Rückmeldung von Abhilfeerfolg 16.4-6
Verbesserungen einführen 16.4-6
Verursacher 16.4-4
Wahrscheinlichkeit der Ursachen 16.4-3
Wartungsprogramms
Versagen 16-20
wartungstypische Einflüsse 16-1
Wartungsunglücke 16.4-3
Waschmittels
Oberflächenverunreinigung 18.3-11
Wasserstoff
Aufnahme an Graten 18.2-4
Wasserstoffaufnahme 18.8-6
Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion 18.7-20
Wasserstoffversprödung 18.7-4, 18.7-9, 18.7-22
Einfluss von Eigenspannungen 18.4-26
Rissbildung bei Lagerung 17.3-23
verzögerte Rissbildung 18.7-22
Wasserstrahlschneiden
Schwingermüdung 18.5-14
Weiterbildung 17.1-5, 17.1-8
Wartungspersonal 16.1-4
Weiterverwendbarkeit 16.1-13
Einschätzung 16.1-6
Welle
Bruch durch Cl-einwirkung 18.7-19
Rissbildung durch Entlackungsbad 18.7-19
Zahnrad, verbogen 16.3-10
Werkstattausrüstung 16.2-6
Werkstoffdaten
für die Auslegung 15.2.3-19
Werkstoff
Eigenschaften, Einfluss auf POD 17.3-6
empfindliche 17.2-4
Festigkeit zu hoch, Risiko 15.2.2-6
Versagensverhalten 15.2.2-7
Gerichtet erstarrter 15.2.2-12
Gesundheitsgefahr bei Radioaktivität 16.3-15
Gesundheitsgefahren 16.3-17
Gesundheitsschädlich 16-11
Sensibilisierung 17.2-9
Spröde 15.2.3-20
Verhalten 15-18
Vertauschen 17.1-13
Werkstofffehler, Wahrscheinlichkeit 15-24
Werkstoffgrenzen, Auslegung 17.2-4
Werkstoffschädigung, Überhitzung 16.1-13
Werkstoffspezifisches Versagen 15.2.3-16
Werkstofftechnologie 15.2-3
Potenzial 15.2-7
Werkstofftypische Fehler 15-25
Werkstoffumstellung, Risiko 17.3-1
Werkstück
Anlauffarben 17.1-18
aus Spannvorrichtung reißen 18.5-2

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Fressem mit Werkzeug 18.5-7
Werkstückeigenschaften, Auswirkung der Fertigung 17.2-7
Werkzeug
Bruch 18.5-1, 18.5-8
Fressem mit Werkstück 18.5-7
Handhabung 16.3-4
Standard 16.3-4
Schneide, Anlauffarben 17.1-18
ungeeignet 16.3-6
Wertanalyse 17.2-6
Wertschätzung 17.1-4
Wide chord-schaufeln
Schwingverhalten 15-26
Wide-Chord-Bauweise 18.9-6
Wide-chord-Schaufeln
Pumpgrenzabstand 15-35
Wiedererstarrte Zone 18.4-11
Wiedererstarrungszone. Siehe Recast Layer
Wiederverwendbarkeit
selbstsichernde Elemente 16.3-4
Wig-Schweißen 16.3-19
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Wirbelstromprüfung 16-20, 17.3-10
automatisiert 17.3-5
POD 17.3-5
Scheibenprüfung 18.6-17
Wirbelstromprüfungen
POD 17.3-5
Wismut
Bruch einer Turbinenschaufel 18.3-32
Gesundheitsgefahr 16.3-19
Lötrissigkeit 18.3-27
Verunreinigung 18.3-21
Wissensbasierten Ansatz
Fehlerbeseitigung 15.2.3-2
wissensbasiertes Konstruieren 15-2
Wolframdraht verstärkten Nickellegierungen 15.2.2-3
Wolframelektroden, Gesundheitsgefahr 16.3-19
Wuchtentnahme, Riefen 18.1-15

X

X-Ray Inspection. *Siehe* Röntgenprüfung
X-Ray Micro Focus. *Siehe* Mikrofokus Röntgen

Z

Zahnräder, Aauswirkung von Eigenspannungen 18.4-29
Zahnradwelle, verbogen 16.3-10
Zeichnungsangaben zur Rauigkeit 18.1-7
Zeitdruck /Zeitmangel 16-7
Schichtübergabe 16.1.1-3
Zentrierflächen aufschieben 18.5-2
Zerspanen
Druckspannungen in Titanlegierung 17.2-16
Eigenspannugnen 18.4-7
Einfluss der Rauigkeit 18.1-20
Einfluss der Wärmekapazität 17.1-15
Erprobung 17.1-14
Geräuschentwicklung 17.1-19
Pfeifgeräusche 18.5-13
Prozess
eigenmächtig verändern 18.5-5
Einfluss auf die Schwingfestigkeit 17.2-15
Richtung, Einfluss auf Verdichterschaufel 18.1-14
Schwingermüdung 18.5-13
Topografie 18.1-14
ungewöhnlicher Geruch 17.1-19
Verhalten, Rückschlüsse 17.1-17
Zugspannugnen 17.2-16
Zerstörende Prüfung 17.3-27
bei Wareneingang 17.3-28
Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) 17.3-1
auffindbare Rissgröße 18.7-2
Auffindwahrscheinlichkeit 17.3-2
Beeinflussung durch Riefen 18.1-18
bei Klebungen 15-40
Benetzbarkeit 17.3-2
Berücksichtigung von der Konstruktion 17.3-14
Bewertung von Anzeigen 17.3-20
Dokumentation des Befundes 17.3-2
Durchschlupf 17.3-2
Einfluss der Erfahrung 17.3-20
Einfluss der Zugänglichkeit 17.3-2
Einfluss des Erwartungshorizonts 17.3-19
Einfluss von Spezifikationsangaben 17.3-22
Erfahrung des Prüfers 17.3-20
Fehlstellen 17.3-1
Schwachstellen 17.3-1
Stärken und Schwächen 17.3-8
Überhitzung 18.6-27
Vorbereitung 17.3-2
Verfahrensauswahl 17.3-13
Zinn als Verunreinigung 18.3-21
Zugänglichkeit
Anbaugeräte 16.3-1
für Drehmomentschlüssel 15-40
für ZfP 17.3-2
Ölfilter 16.3-6
Rückölpumpe 16.3-10
Zuganker mit Riefen 18.1-15
Zugeigenspannungen 18.4-1
Entstehung bei Überhitzung 18.6-7
in der Oberfläche 17.2-2
in Graten 18.2-4
Zugspannungen
in Beschichtung 17.2-11
Zerspanung 17.2-16

© Axel Krossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz

Zulässigen Fehlstellen 15-21
Zulassung
Behörden, Technologieentwicklung 15.2.3-14
einer Nacharbeit 17.5-4
Prüfungen 17.3-27
Triebwerksteile 17.3-32
Zündstelle
Bruch einer Turbinenscheibe 18.6-17
Schweißung 18.6-14
Zusatzmaterial, Abweichungen 17.1-14
Zwischenmenschlicher Kontakt 16-3
Zwischenringe, rotierend. *Siehe* Spacer
Zwischenstufenlabyrinth, sichere Gestaltung 15-43
Zyklen bis zur Inspektion 16.1.1-16
Zyklische Schleuderversuche 17.3-29
Zyklischen Lebensdauer, Demoversuch 15.2.3-7

© Axel Rossmann - Turboconsult
als Schulungsunterlage nur mit Lizenz